

Національна академія аграрних наук України
Інститут олійних культур

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний технічний університет сільського
господарства імені Петра Василенка

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Алієв Ельчин Бахтияр огли

УДК 633.85–042.52:631.362 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПРЕЦИЗІЙНОЇ
СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ СОНЯШНИКУ**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

_____ Е. Б. Алієв

Науковий консультант: Шевченко Ігор Аркадійович, член-кореспондент
НААН, доктор технічних наук, професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Алієв Е. Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (133 – Галузеве машинобудування). – Інститут олійних культур, Національна академія аграрних наук України, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення первинного насінництва шляхом обґрунтування адаптивних механотронних систем цільового поділу та відбору насінневого матеріалу соняшнику.

На підставі системного підходу визначено структуру адаптивного техніко-технологічного забезпечення первинного насінництва соняшнику, що дозволяє здійснювати пошук слабких ланок в технологічних процесах доробки та біоінформативної систематизації насінневого матеріалу за якістю розподілу та продуктивністю ліній при мінімізації питомих витрат.

Визначено узагальнюючі коефіцієнти якості виконання технологічного процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу (коефіцієнти заповнення та розподілу, сумарна концентрація насіння).

Отримано математичні моделі технологічного процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику за його аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою та забарвленням по-верхні сім'янок, що описують зміни запропонованих коефіцієнтів якості в залежності від режимних параметрів.

Встановлено функціональні залежності і розроблено способи автоматизованого керування прецизійного механізованого процесу сепарації насінневого матеріалу на основі узгодження його режимних і технологічних параметрів.

Розроблено спосіб автоматичного фенотипування насіння соняшнику за його морфологічними показниками.

Отримали подальший розвиток фізико-математичний апарат руху насінневого матеріалу, як гранульованого газу в повітряному потоці під дією віброуючої поверхні з урахуванням пружно-демпферної взаємодії.

Удосконалено комплекс автоматизованого прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів.

Наукова новизна одержаних результатів, лягла в основу технічних рішень, які захищені патентами України на винахід (№ 120231, 120235) і корисну модель (№ 136828, 136829).

За вимогами до технологічних процесів очищення та розділення насінневої суміші для отримання насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів (сортова чистота – 98,0–99,9 %) для всіх ланок селекційно-насінницького процесу розроблена раціональна прецизійна технологічна схема лінії процесів сепарації, яка включає автоматизацію технічних засобів. Для підвищення ефективності селекційно-насінницького процесу соняшнику щодо розробленої технологічної лінії додано пристрій для автоматичного фенотипування насіння, що дозволяє значно інтенсифікувати та скоротити селекційний процес та поліпшити проектування програми схрещування за рахунок біоінформативного аналізу даних і сортування насіння.

Чисельним моделюванням і емпіричними дослідженнями процесу сепарації насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) отримано залежності масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів від ефективного діаметру насіння соняшнику

і швидкості повітря. Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких і легких компонентів від вищезазначених факторів досліджень. Отримані залежності дають змогу визначати швидкість потоку повітря виходячи з необхідних об'ємних мас та ефективного діаметру насіння соняшнику.

За результатами чисельного моделювання і експериментальних досліджень механіко-технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку отримано залежності розподілу кожної фракції насіння по довжині області (середнє значення; середньоквадратичне відхилення; коефіцієнт заповнення; коефіцієнт розподілу) і споживаної потужності від ефективного діаметра насіннини, швидкості подачі повітря та подачі насіння.

На підставі результатів досліджень розроблено адаптивний аеродинамічний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння і швидкість повітря) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму, який визначає технологічний процес сепарації насіннєвої суміші соняшнику за аеродинамічними властивостями з більш високою продуктивністю і якістю.

Чисельним моделюванням і експериментальними дослідженнями процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами під дією віброуючих решіт різних видів (пробивні, пруткові, точні) встановлено залежності зміни сумарної концентрації, продуктивності і споживаної потужності калібрувальної машини від подачі насіння, кута нахилу решета, частоти коливань решета і амплітуди коливань решета.

За результатами проведених досліджень розроблено адаптивний віброрешітний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння, кут нахилу і частота коливань решета) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму, який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насіннєвих сумішей соняшнику за геометричними розмірами з більш високою продуктивністю і якістю.

Процес сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою під дією віброуючої поверхні визначається коефіцієнтом заповнення, коефіцієнтом розподілу, продуктивністю і споживаною потужністю пневмовібросепаратора, які залежать від подачі насіння, кутів нахилу віброуючої поверхні, частоти коливань, амплітуди коливань та швидкості повітряного потоку.

На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей розроблено адаптивний вібропневматичний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння, швидкість повітряного потоку, частота коливань деки, кути нахилу деки) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму, який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за об'ємною масою з більш високою продуктивністю і якістю.

На базі чисельного моделювання та експериментальних досліджень технологічного процесу роботи фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала середній інтервал часу між падаючим насінням, сумарну концентрація насіння, продуктивність фотоелектронного сепаратора і його споживану потужність від подачі насіння, частоти коливань вібролотка, частоти обертання барабана, часової затримки спрацьовування форсунки, чутливості фотодатчика. В результаті експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора встановлено експоненціальну залежність зміни ймовірності реагування газової форсунки від інтервалу часу між падаючим насінням.

На підставі результатів досліджень удосконалено фотоелектронний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння, частота коливань вібролотка, частота обертання барабана, часова затримка спрацьовування форсунки, чутливість фотодатчика) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму, який дозволяє виконувати технологічний процес дворазової сепарації насінневої суміші

соняшнику за забарвленням поверхні сім'янок із продуктивністю і сумарною концентрацією насіння.

Розроблено математичну модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння соняшнику із реалізацією принципу відбракування за кількома параметрами (забарвлення, форма, геометричні розміри) за допомогою перетворювачів зображення, які реалізовані на визначенні забарвлення і контуру насіння у колірному просторі HSV. Результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння різних сортозразків соняшнику дали змогу встановити середню похибку визначення геометричних розмірів насіння соняшнику (довжини і ширини) – 0,06 мм.

Встановлені гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB при різному освітленні. В результаті аналізу отриманих гістограм розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB встановлено, що у випадку однорідності кольору найбільш виразно видно дискретність каналів при червоному освітленні. При цьому гістограма має по одному максимуму для кожного каналу, який зміщується в залежності від забарвлення насіння. Так для чорного забарвлення $R = 182-189$, $G = 194-202$, $B = 211-218$, а для білого $R = 112-118$, $G = 124-129$, $B = 133-139$. Також виявлено, що у випадку двокольорового забарвлення насіння соняшнику на гістограмах спостерігається два максимуми, кожен з яких відповідає певному кольору. Частоти цих максимумів відповідають інтенсивності кожного з кольорів. Враховуючи вищесказане можна визначити показник забарвлення насіння, як матрицю частот відповідних максимумів в колірному просторі RGB при червоному освітленні насіння.

Розроблено матричний і стрічковий пристрої для автоматичного фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику за його морфологічними і маркерними ознаками. Пристрої налаштовані на високу точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння соняшнику із визначенням їх форми і забарвлення та забезпечують низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння.

Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації фотоелектронного сепаратора впроваджені і використані на виробництві ПП «Агромех плюс» для виготовлення відповідного дослідного зразка. ТОВ «Атлант-Запоріжжя» прийняло для впровадження у виробництво науково-технічну продукцію – комплекти конструкторської та технічної документації на експериментальні зразки адаптивного аеродинамічного сепаратора, адаптивного віброрешітного сепаратора і адаптивного вібропневматичного сепаратора. Розроблена «Методика з визначення можливих максимальних втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищенні та розділенні» і алгоритми розрахунку, які реалізовані в програмному пакеті Microsoft Excel передані і впроваджені у виробництво ТОВ «Снек-продакшн». ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з виробничого контролю технологічних процесів очищення і розділення насінневого матеріалу соняшнику. Отримані експериментальні залежності використані і прийняті ФОП Лінчуком Є.В. в якості методичних засад для проведення налаштування і калібрування фотоелектронного сепаратора ТАІНО 6SXZ-252 CCD COLOR SORTER. Пристрої для автоматичного фенотипування насіння олійних культур використовується при наукових дослідженнях в області селекції і генетики в ІОК НААН. ТОВ «Нікертор» отримало рекомендації з ремонту і технічного обслуговування машин і устаткування для сепарації, розділення і очищення насіння олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей, конструктивно-технологічних і електричних принципових схем. Розроблена методика визначення несортованого насіння соняшнику в насінневій суміші використовується ПП «ЛЕНДФОРТ ДНІПРО» під час закупівлі та прийманні насінневого матеріалу соняшнику різних сортів і гібридів.

Ключові слова: соняшник, насінневий матеріал, сепаратор, прецизійність, фенотипування, геометричний розмір, об'ємна вага, аеродинамічні властивості, забарвлення, автоматизація, алгоритм.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- 1.Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с.
- 2.Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54. No. 1. P. 129-138.
- 3.Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54, No. 1. P. 95-104.
- 4.Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 56, No. 3. P. 119-128.
5. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. Volume 12 Issue 4. P. 135-142.
- 6.Elchin Aliev, Viktor Pryshliak, Vitaly Yaropud. (2017). Research of physical and mechanical properties of oilseed crops. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin – Rzeszów. Vol. 19. No 3. P. 103-108.
- 7.Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця. №2 (97). С. 19-23.
- 8.Алієв Е. Б., Шевченко, І. А. (2017). Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. №3 (769). С. 63-65.
- 9.Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. Житомир. №1 (58). Т.1 С. 173-180.

10. Алієв, Е. Б., Лабатюк, Ю. М. (2017). Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. Вип. 180. С. 67-71.

11. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Результати чисельного моделювання процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця. №4 (99). С. 18-23.

12. Алієв, Е. Б. (2017). Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією вібруючого решета. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 47. Ч. I. Кропивницький: ЦНТУ. С. 31-39.

13. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Драчов, А. В. (2017). Фізико-математична модель руху насіння по лопаті барабана вібродозатора. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка, сільськогосподарські науки, технічні науки, економічні науки*. Вип. 27. Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет. С. 97-104.

14. Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючого решета. *Механізація та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]*. Глеваха. Вип. 6 (105). С. 97-103.

15. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математична модель процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючої поверхні. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця: ВНАУ. № 1 (88). С. 54-59.

16. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б. (2018). Дослідження фотоелектронного процесу визначення забарвлення насіння олійних культур. *Техніка і технології АПК*. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, № 4 (103). С. 40-43.

17. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого). Дослідницьке. Вип. 22 (36). С. 61-65.*

18. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока подачі фотоелектронного сепаратора насіння олійних культур. *Проблеми надійності машин: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. Вип. 192. С. 185-193.*

19. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Кунда, В. Г. (2018). Фізико-математичний апарат взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. *Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”*. Вінниця. Вип. 3 (90) С. 5-10.

20. Алієв, Е. Б. (2018). Експериментальні дослідження процесу розділення насіння соняшнику під дією повітряного потоку. *Machinery & Energetics. Kyiv. Ukraine, Vol. 9, No. 3, P. 113-116.*

21. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2019). Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшника. *Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”*. Вінниця. №1 (92). С. 40-47.

22. Алієв, Е. Б. (2018). Критерії оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 48. Кропивницький: ЦНТУ. С. 170-176.*

23. Алієв, Е. Б., Гаврильченко, О. С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у*

тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. Вип. 201. С. 132-140.

24. Шевченко, І., Алієв, Е., Каминский Ян Р. (2019). Результати експериментальних досліджень процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшника за об'ємною вагою. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого)*. Дослідницьке. Вип. 24 (38). С. 252-259.

25. Алієв, Е. Б. (2019). Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника. *Науковий журнал «Наукові горизонти»*. № 5 (78). С. 23-30.

26. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка впровадження прецизійної технологічної лінії сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха. Вип. № 9 (108). С. 81-87.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Алієв, Е. Б. (2016). Техніко-технологічне забезпечення процесів очищення та розділення насіннєвого матеріалу олійних культур. *Роль наукових досліджень в забезпеченні процесів інноваційного розвитку аграрного виробництва України. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і спеціалістів 25–26 травня 2016 р.* НААН, ДУ ІЗК НААН, М-во аграр. політики та прод. України, Укр. ін-т експертизи сортів рослин. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД». С. 45.

28. 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. Тернопіль: Крок, С. 219-220.

29. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математичний апарат гранульованого газу шару насінневого матеріалу. *Технології АПК XXI століття: проблеми і перспективи розвитку: Зб. наукових-праць* (17-18 травня 2018 року, м. Ніжин). Ніжин. С. 285-294.

30. Алиев, Э. Б. (2018). Моделирование движения сыпучего материала под действием воздушного потока. *Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции* (Минск, 21–23 ноября 2018 года). Минск: БГАТУ. С. 126-129.

31. Алієв, Е. Б., Кутіщев, В. Л. (2016). Очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур. *Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. Тенденції та перспективи»* (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 134-135.

32. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., Кутіщев, В. Л. (2017). Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета. *Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур»* (16 листопада 2017 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 170-171.

33. Aliiev Elchyn (2019). Research of separation of sunflower seeds on selecting surface. *Тези наукових доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченої 85-річчю від дня народження академіка Л. В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К. Г. Шиндлера*. 13 вересня 2019 року. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке. С. 90-91.

34. Aliev, E. B. (2017). Modeling of the mechanical and technological processes for the separation of oilseeds. *Internationals research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference Proceedings*. December 27-28, 2017. Radom, Republic of Poland. Vol. 19. No 3. P. 107-110.

35. Aliiev, E. B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in aerodromic separator. *Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції* (26 жовтня 2018 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 70-71.

36. Алієв, Е., Яропуд В. (2018). *Математична модель взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. "Вібрації в техніці та технологіях", XVII Міжнародна науково-технічна конференція 11-12 жовтня 2018 р.:* тези доповідей. Дрогобич: Посвіт. С. 28-29.

37. Elchyn Aliiev. (2019). The results of studies of the separation of sunflower seed material by volume. *Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф.* 30 травн. 2019 р. Тернопіль: Крок. С. 96-98.

38. Aliiev E. B., (2019). Results of the experimental study of separation process seeds in photoelectronic separator. *Олійні культури: інновації та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції* (14 травня 2019 р.). Запоріжжя. ІОК НААН, 2019. С. 89-90.

39. Алієв, Е. Б. (2019). Результати досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння соняшник. *Наукові читання до 100-річчя від дня народження професора Івана Вікторовича Яшовського (Матеріали міжнародної наукової конференції 14-15 серпня 2019 року, Чабани)*. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ». С. 90-92.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

40. 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.

41. 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.

42. Алієв, Е. Б. (2019). 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.

43. Алієв, Е. Б. (2019). 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.

44. Алієв, Е. Б., Бакарджієв, Р. О. (2014). Статистична оцінка показників роботи дозатора безперервної дії. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. Запоріжжя. Випуск 21. С.131-136.

45. Алієв, Е. Б. (2017). Модель системи фотоелектронного сепаратора насінневого матеріалу. *Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України»*. Вип. 14. Кіровоград, КОД. С. 135-138.

46. Алієв, Е. Б., Чеботарьов, В. П. (2018). Раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшника. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. Запоріжжя: ІОК НААН. С. 154-159.

47. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. *Економічний розвиток держави, регіонів і підприємств: проблеми та перспективи Зб. наук. праць*. Ніжин. С. 224-227.

ABSTRACT

Aliiev E. B. Mechanical and technological bases of the precision separation process of sunflower seeds. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Doctor of Science Degree in specialty 05.05.11 “Machines and Means of Agricultural Production Mechanization” (133 – Branch Mechanical Engineering). – Institute of Oilseeds Crops, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the technical and technological support of primary seed production by substantiating adaptive mechanotronic systems of target division and selection of sunflower seed material.

On the basis of the systematic approach, the structure of adaptive technical and technological support of primary sunflower seeds was determined, which allows to search for weak links in the technological processes of processing and bioinformatic systematization of seed material by the quality of distribution and line productivity while minimizing specific costs.

The general quality coefficients for technological process performance of precision separation of seed material (coefficients of filling and distribution, total concentration of seeds) are determined.

Mathematical models of the technological process for precision separation of sunflower seed material by its aerodynamic properties, geometric dimensions, bulk mass and coloration of the upper seedlings were obtained, describing changes of the proposed quality coefficients depending on the regime parameters.

Functional dependencies are established and methods of automated control of precision mechanized process of seed separation are developed on the basis of coordination of its mode and technological parameters.

The method of automatic phenotyping of sunflower seeds according to its morphological parameters is developed.

The physical and mathematical apparatus for the movement of the seed material, as a granular gas in the air stream under the action of a vibrating surface, taking into account the elastic-damping interaction, was further developed.

The complex of automated precision technical and technological support for the processes of sunflower seed separation has been improved.

The scientific novelty of the obtained results formed the basis of technical solutions, which are protected by the patents of Ukraine for the invention (№ 120231, 120235) and utility model (№ 136828, 136829).

According to the requirements for the technological processes of purification and separation of the seed mixture to obtain the sunflower seed material of the parent components (varietal purity - 98,0-99,9%) for all parts of the breeding and seed production process, a rational precision technological scheme of the separation processes has been developed, which includes automation of technical processes of separation means. In order to increase the efficiency of the sunflower breeding and seed-growing process, a device for automatic seed phenotyping has been added to the developed technological line, which can significantly intensify and shorten the breeding process and improve the design of the breeding program through bioinformatic data analysis and seed sorting.

By numerical modeling and empirical studies of the seed mixture separation at a small aerodynamic separator (fans) it was obtained the dependence of the mass distribution of components by volume at the outputs of heavy and light components on the effective diameter of sunflower seeds and air velocity. In addition, the dependences of the change in the volumetric masses of the heavy and light components on the above factors were obtained. Obtained dependencies allow to determine the speed of air flow based on the required bulk mass and the effective diameter of the sunflower seeds.

According to the results of numerical modeling and experimental researches of the mechanical and technological process of the oilseeds moving under the air flow, it was obtained the dependences of the distribution of each seeds fraction along the length of the area (mean value; standard deviation; fill coefficient; distribution coefficient) and power consumption from effective seed diameter, air flow speed and seed delivery.

Based on the results of research, an adaptive aerodynamic separator with rationally agreed mode parameters (seed supply and air speed) was developed through the use of software based on an algorithm that determines the technological process of sunflower seed separating by aerodynamic properties with higher performance and properties.

By numerical modeling and experimental studies of the process of sunflower seed separation by geometric dimensions under the action of vibrating gratings of different types (punching, rod, exact) it was established the dependences of the total concentration changes, productivity and power consumption of the calibration machine on the seed supply, sieve angle, sieve oscillation frequency and sieve oscillation amplitude.

According to the results of the researches, an adaptive vibratory separator with rationally agreed mode parameters (seed supply, slope and frequency of sieve oscillations) was developed due to the use of software based on the created algorithm, which allows to carry out the technological process of sunflowers separation with better productivity and quality.

The process of separation of sunflower seeds by volume under the action of a vibrating surface is determined by the filling factor, the distribution coefficient, the productivity and power consumption of the pneumatic vibrator, which depend on the seeds supply, the angles of the vibrating surface, oscillation frequency, oscillation amplitude and airflow velocity.

Based on the obtained theoretical and experimental dependencies, an adaptive vibropneumatic separator was developed with rationally agreed mode parameters (seed supply, air flow speed, deck oscillation frequency, deck angles) due to the use of software based on the created algorithm, which allows to perform technological separation process by sunflower volume with better productivity and quality.

On the basis of numerical modeling and experimental researches of technological process of photoelectron separator operation, a physical and mathematical model was developed that linked the average time interval between falling seed, total seed concentration, productivity of photoelectron separator and its power consumption from seed supply, vibration frequency, vibration frequency of drum, time delay of injector

operation, photosensitivity. As a result of the experimental studies of the seed output in the photoelectron separator, the exponential dependence of the gas nozzle change from the time interval between the falling seeds has been established.

Based on the results of research, a photoelectron separator with rationally agreed mode parameters (seed delivery, vibration frequency, drum speed, time delay of the injector, sensitivity of the photo sensor) is improved due to the use of software based on the created algorithm, which allows to perform double separation of sunflower seeds by its coloring with productivity and the total concentration of seeds.

A mathematical model of a closed system of automatic phenotyping of sunflower seeds with the implementation of the principle of rejection in several parameters (color, shape, geometric dimensions) with the help of image converters, which are implemented to determine the color and contour of the seed in the HSV color space. The results of experimental studies of the automatic phenotyping of different sunflower varieties have made it possible to establish an average error of determining the geometric dimensions of sunflower seeds (length and width) – 0.06 mm.

The histograms of the color distribution of sunflower seeds in the RGB color space with different illumination are established. As a result of the obtained histograms analysis of the color distribution in the RGB color space, it is established that in the case of color uniformity, the discreteness of the channels with red illumination is most clearly seen. The histogram has one maximum for each channel, which shifts depending on the color of the seeds. So, for black color $R = 182-189$, $G = 194-202$, $B = 211-218$, and for white $R = 112-118$, $G = 124-129$, $B = 133-139$. It has also been found that in the case of two-color staining of sunflower seeds on the histograms there are two maxima, each of which corresponds to a specific color. The frequencies of these maxima correspond to the intensity of each color. So, it is possible to determine the seed color index as a matrix of frequencies of the corresponding maxima in the RGB color space with red illuminated seeds.

Matrix and tape devices for automatic phenotyping of sunflower seed material according to its morphological and marker features have been developed. The devices are

configured for high accuracy of individual measurement of the geometric dimensions of sunflower seeds with determination of their shape and color and provide low complexity and high technological implementation of the phenotyping process (determination, identification and separation) of seeds.

The results of the scientific and technical work in the form of design and technical documentation of the photoelectronic separator were implemented and used at the «Agromech Plus» company for the production of the corresponding prototype. «Atlant-Zaporizhzhia» LLC has accepted scientific and technical products, sets of design and technical documentation for experimental samples of an adaptive aerodynamic separator, an adaptive vibration separator and an adaptive vibropneumatic separator. A methodology for determining the maximum weight loss of a seed mixture of confectionery sunflower during the cleaning and separation has been developed and the calculation algorithms, implemented in the Microsoft Excel software package, have been transferred and introduced into the production of «Snack-production» LLC. LLC «Ukrnassinprom» has accepted scientific and methodological recommendations on the production control of technological processes of purification and separation of sunflower seed. The obtained experimental dependencies are used and adopted by private entrepreneur Linchuk Ye.V. as a methodological basis for setting up and calibrating the TAIHO 6SXZ-252 CCD COLOR SORTER photoelectron separator. Devices for automatic phenotyping of oilseeds are used in scientific research in the field of breeding and genetics at the Institute of Oilseed Crops of NAAS. «Nikertor» LLC has received recommendations for repairing and maintenance of machinery and equipment for the separation and purification of oil and grain seeds in the form of appropriate mathematical dependencies, structural, technological and electrical schematic diagrams. The developed methodology for determining unsorted sunflower seeds in the seed mix is used by the private company "LENDFORT DNIPRO" during the purchase and acceptance of sunflower seed material of different varieties and hybrids.

Keywords: sunflower, seed material, separator, precision, phenotyping, geometric size, bulk weight, aerodynamic properties, coloring, automation, algorithm.

List of published works on the topic of the thesis

List of publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Aliiev, E. B. (2019). Physico-mathematical models of the processes of precision separation of sunflower seeds: monograph. Zaporozhye: STATUS. 196 p.
2. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54. No. 1. P. 129-138.
3. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54, No. 1 1. P. 95-104.
4. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 56, No. 1 3. P. 119-128.
5. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). A study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. Volume 12 Issue 4. P. 135-142.
6. Elchin Aliev, Viktor Pryshliak, Vitaly Yaropud. (2017). Research on the physical and mechanical properties of oilseed crops. *MOTROL. Commission of Motorization and Energy in Agriculture*. Lublin – Rzeszów. Vol. 19. No 3. P. 103-108.
7. Aliiev, E. B. Yaropud, V.M. (2017). Physico-mathematical apparatus for the movement of seeds in the air stream. *All-Ukrainian scientific and technical journal "Engineering, Energy, Transport of AIC"*. Vinnytsia. No. 2 (97). Pp. 19-23.
8. Aliiev, E. B., Shevchenko, I.A. (2017). Investigation of the aerodynamic properties of oilseeds. *Bulletin of agrarian science*. No. 3 (769). Pp. 63-65.
9. Aliiev, E. B. (2017). Results of numerical simulation of mechanical and technological process of moving oilseed seed material under the action of air flow. *Bulletin of Zhytomyr National Agro-Ecological University*. Zhytomyr. No. 1 (58). Vol. 1, pp. 173-180.

10. Aliiev, E. B., Labatyuk, Yu. M. (2017). Numerical modeling of mechanical and technological processes of agro-industrial production. Modern problems of improvement of technical systems and technologies in animal husbandry: *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*. Kharkiv. No. 180. P. 67-71.

11. Aliiev, E. B. Yaropud, V. M. (2017). Results of numerical simulation of the process of operation of the seed feed unit of the photoelectron separator. *All-Ukrainian scientific and technical journal "Engineering, Energy, Transport of AIC"*. Vinnytsia. No. 4 (99). Pp. 18-23.

12. Aliiev, E. B. (2017). Physico-mathematical apparatus of elastic-damping interaction of seeds under the action of a vibrating sieve. *National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines*. No. 47. C. I. Kropyvnytskyi: TsNTU. Pp. 31-39.

13. Aliiev, E. B., Yaropud, V. M., Gavrilchenko, O. S., Drachov, A. V. (2017). Physico-mathematical model of seed movement on the blade of the vibrating drum drum. *Podilskyi Herald: Agriculture, Engineering, Economics, Agricultural Sciences, Engineering Sciences, Economic Sciences*. No. 27. Kamianets-Podilskyi: Podilsky State Agrarian and Technical University. Pp. 97-104.

14. Aliiev, E. B. (2017). Results of numerical simulation of the process of moving the seed of oilseeds under the action of a vibrating sieve. *Mechanization and Electrification of Agriculture: [National Collection]. They were staring*. No. 6 (105). Pp. 97-103.

15. Aliiev, E. B. (2018). Physico-mathematical model of the process of movement of seed material of oilseeds under the action of a vibrating surface. *All-Ukrainian Journal of Vibration in Engineering and Technology*. Vinnytsia: VNAU. No. 1 (88). Pp. 54-59.

16. Shevchenko, I. A., Aliiev, E. B. (2018). Investigation of the photoelectronic process for determining the coloration of oilseeds. *AIC technology and technology*. UkrNIIPVT them. L. Pogorilogo, No. 4 (103). Pp. 40-43.

17. Aliiev, E. B. (2018). The results of experimental studies of the seed output unit of the photoelectron separator. *Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for Ukrainian agriculture: collection of sciences. Prof. DNU "Ukrainian Research Institute for Forecasting and Testing Equipment and Technologies for Agricultural Production named after Leonid Pogorely"* (UkrNIPIPT named after L. Pogorely). Research. No. 22 (36). Pp. 61-65.

18. Aliiev, E. B. (2018). The results of the experimental studies of the feed unit of a photoelectronic separator of oilseeds. *Machine reliability issues: Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*. Kharkiv. No. 192. P. 185-193.

19. Aliiev, E. B., Yaropud, V. M., Gavrilenko, O. S., Kunda, V. G. (2018). Physico-mathematical apparatus for the interaction of bulk material with a vibrating sieve. *All-Ukrainian Journal of Vibration in Engineering and Technology*. Vinnytsia. No. 3 (90), pp. 5-10.

20. Aliiev, E. B. (2018). Experimental studies of the process of separation of sunflower seeds under the action of air flow. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Vol. 9, No. 1 3, P. 113-116.

21. Aliiev, E. B., Yaropud, V. M. (2019). Technical and technological support of precision separation of sunflower seeds. *All-Ukrainian Journal of Vibration in Engineering and Technology*. Vinnytsia. No. 1 (92). Pp. 40-47.

22. Aliiev, E. B. (2018). Criteria for evaluating the quality of the seed separation process. *National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines*. No. 48. Kropyvnytskyi: TsNTU. Pp. 170-176.

23. Aliiev, E. B., Gavrilenko, O. S. (2019). Substantiation of the automated air flow control system in the aerodynamic seed separator. *Modern problems of improvement of technical systems and technologies in animal husbandry: Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*. Kharkiv. No. 201. pp. 132-140.

24. Shevchenko, I., Aliiev, E., Kaminsky, Jan R. (2019). The results of experimental studies of the process of precision separation of sunflower seeds by volume. *Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for Ukrainian agriculture: collection of sciences. Ave. / DNU "Ukrainian Research Institute for Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production named after Leonid Pogorely"* (UkrNIPIPT named after L. Pogorely). Research. No. 24 (38). S. 252-259.

25. Aliiev, E. B. (2019). Substantiation of design parameters of photoelectronic sunflower seed separator. *Scientific journal "Scientific Horizons"*. No. 5 (78). Pp. 23-30.

26. Aliiev, E. B. (2019). Economic evaluation of the introduction of a precision technological line of separation of sunflower seed. *Mechanization and electrification of agriculture: a national collection. IMESG. They were staring*. No. No. 9 (108). C. 81-87.

Articles that certifying the approbation of the thesis:

27. Aliiev, E. B. (2016). Technical and technological support for the processes of purification and separation of oilseeds. *Role of scientific researches in providing of processes of innovative development of agrarian production of Ukraine. Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists May 25-26, 2016 NAAS, State University of Sciences of NAAS, M-agrar. policies, etc. Ukraine, Ukr. institute of examination of plant varieties. Vinnytsia: Nilan LTD. Pp. 4-5.*

28. Aliiev, E., Patzula, O., Strelchenko, Y. (2017). Mathematical model of the process of operation of the seed feed unit of the photoelectron separator. *Innovative technologies and intensification of the development of national production: materials IV. scientific-practical Conf. November 30 2017 Part 1. Ternopil: Step, pp. 219-220.*

29. Aliiev, E. B. (2018). Physico-mathematical apparatus of granulated gas layer of seed material. *AIC technologies of the XXI century: problems and prospects: Coll. scientific works (May 17-18, 2018, Nizhyn). Nizhyn. Pp. 285-294.*

30. Aliiev, E. B. (2018). Motion modeling of bulk material under the action of air flow. *Technical support of innovative technologies in agriculture: a collection of scientific*

articles of the International Scientific and Practical Conference (Minsk, November 21-23, 2018). Minsk: BGATU. Pp. 126-129.

31. Aliiev, E. B., Kutishchev, V. L. (2016). Purification and separation of oilseeds. *Proceedings of the International Scientific Internet Conference "Oilseeds. Trends and Prospects"* (November 1, 2016). Zaporozhye: IOC NAAN. Pp. 134-135.

32. Aliiev, E. B., Patzula, O. M., Kutishchev, V. L. (2017). Methods of numerical modeling of the process of moving the seed material of oilseeds under the action of a vibrating sieve. *Proceedings of the International Scientific Internet Conference "Modern directions of selection, technology of cultivation and processing of oilseeds"* (November 16, 2017). Zaporozhye: IOC NAAN. Pp. 170-171.

33. Aliiev Elchyn (2019). Research on the separation of sunflower seeds on a selection surface. *Theses of scientific reports of the XIX International Scientific Conference "Scientific and technical principles of development, testing and forecasting of agricultural machinery and technologies"*, dedicated to the 85th anniversary of the birth of Academician LV Pogorely and the 150th anniversary of the birth of Professor KG Schindler. September 13, 2019. UkrNIIPVT them. L. Pogorely. Research. Pp. 90-91.

34. Aliiev, E. B. (2017). Modeling of mechanical and technological processes for the separation of oilseeds. *Internationals Research and Practice Conference "Modern Methods, Innovations, and Experience of Practical Application in the Field of Engineering"*: Conference Proceedings. December 27-28, 2017. Radom, Republic of Poland. Vol. 19. No 3. P. 107-110.

35. Aliiev, E. B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in an aerodynamic separator. *Innovative technologies and modern breeding achievements in the production of oil raw materials*. Proceedings of the International Scientific Internet Conference (October 26, 2018). Zaporozhye: IOC NAAN. Pp. 70-71.

36. Aliiev, E., Yaropud V. (2018). A mathematical model of the interaction of bulk material with a vibrating sieve. *Vibrations in Engineering and Technology*, XVIII International Scientific and Technical Conference October 11-12, 2018: Abstracts. Drohobych: The Universe. Pp. 28-29.

37. Elchyn Aliiev (2019). The results of studies of the separation of sunflower seed material by volume. *Innovative technologies and intensification of development of national production: materials V intern. scientific-practical Conf. May 30 2019 Ternopil: Step. Pp. 96-98.*

38. Aliiev, E. B., (2019). Results of the experimental study of separation process seeds in photoelectronic separator. *Oilseed crops: innovation and perspectives. Proceedings of the International Scientific Internet Conference (May 14, 2019). Zaporizhzhia. IOC NAAN, 2019. pp. 89-90.*

39. Aliiev, E. B. (2019). Results of studies of the process of automatic phenotyping of sunflower seeds. *Scientific Readings to the 100th Anniversary of Professor Ivan Yashovsky's Birthday (Proceedings of the International Scientific Conference, August 14-15, 2019, Chabany). Vinnytsia: TOVORI LLC. Pp. 90-92.*

P List of articles reflecting further scientific results of the thesis:

40. Aliiev, E. B. (2019). Ukraine patent for invention 120231, IPC (2006) A01C 1/00, G01B 11/00, G01B 11/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G06T 7/00. Method for automatic phenotyping of seeds and device for its implementation. Applicant: Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, No. a201808708. Statement 10/25/2019 Publ. 25.10.2019, bul. № 20.

41. Aliiev, E. B. (2019). Ukrainian patent for invention 120235, IPC (2006) B07B 1/00, B07B 1/40 (2006.01), B07B 1/42 (2006.01), G05B 13/00, G05B 15/00. Adaptive vibratory separator. Applicant: Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, No. a201811084. Statement 10/25/2019 Publ. 25.10.2019, bul. № 20.

42. Aliiev, E. B. (2019). Utility Model Patent 136828, IPC B07B 4/02 (2006.01). Adaptive aerodynamic separator. Applicant: Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, No. u201902090. Statement 01.03.2019 Publ. 10.09.2019, bul. № 17.

43. Aliiev, E. B. (2019). Utility Model Patent 136829, IPC (2006) B07B 13/18, (2006.01) B07B 4/00. Photoelectronic separator. Applicant: Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, No. u201902091. Statement 01.03.2019 Publ. 10.09.2019, bul. № 17.

44. Aliiev, E. B., Bakardzhiev, R. A. (2014). Statistical evaluation of continuous dosing performance. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseeds of NAAS. Zaporizhzhia*. Issue 21. C.131-136.

45. Aliiev, E. B. (2017). Model of photoelectronic seed separator system. *Steppe Herald. Scientific collection. «The state and prospects of development of agro-industrial production of Ukraine»*. No. 14. Kirovograd, CODE. Pp. 135-138.

46. Aliiev, E. B., Chebotarev, V. P. (2018). The rational precision technological line of processes of separation of sunflower seed material. *Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oil Crops of NAAS. Zaporozhye: IOC NAAN*. Pp. 154-159.

47. Aliiev, E. B. (2019). Economic evaluation of precision separation of sunflower seeds. *Economic Development of the State, Regions and Enterprises: Problems and Prospects Coll. Sciences. wash. Nizhyn*. P. 224-227.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	32
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ. ПРОБЛЕМИ	
ТА НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ.....	39
1.1 Перспективність використання прецизійної сепарації насіннєвого	
матеріалу в селекційному процесі.....	39
1.2 Технологічна лінія процесів очищення та розділення насіннєвого	
матеріалу.....	41
1.3 Способи сепарації насіннєвого матеріалу.....	48
1.3.1 Сепарація насіннєвого матеріалу за аеродинамічними	
властивостями.....	48
1.3.2 Сепарація насіннєвого матеріалу за геометричними розмірами	52
1.3.3 Сепарація насіннєвого матеріалу за щільністю та питомою	
масою	55
1.3.4 Сепарація насіннєвого матеріалу за властивостями його	
поверхні	56
1.3.5 Сепарація насіннєвого матеріалу за забарвленням околоплоддя	57
1.4 Аналіз технічного забезпечення технологічних процесів очищення та	
розділення насіння.....	61
1.4.1 Аеродинамічні сепаратори	61
1.4.2 Віброрешітні сепаратори	62
1.4.3 Вібропневмосепаратори	65
1.4.4 Фотоелектронні сепаратори	67
1.4.5 Пристрій для автоматичного фенотипування насіння	72
1.5 Аналіз основних морфологічних показників і фізико-механічних	
властивостей насіннєвої суміші соняшнику	74
1.6 Аналіз наукових досліджень процесів сепарації насіння	80
1.7 Висновки з розділу. Мета і задачі досліджень	83

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ

НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ СОНЯШНИКУ	87
2.1 Модель впливу агротехнологічних і техніко-технологічних параметрів на насінневу суміш	87
2.2 Фізико-математична модель процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями.....	91
2.2.1 Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці...	91
2.2.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією повітряного потоку.....	97
2.2.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією повітряного потоку.....	104
2.3 Фізико-математична модель процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами	114
2.3.1 Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин.....	114
2.3.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією вібруючого решета	130
2.3.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією вібруючого решета	133
2.4 Фізико-математична модель процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою	139
2.4.1 Фізико-математичний апарат «гранульованого газу» шару насінневого матеріалу	139
2.4.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією вібруючої поверхні.....	149
2.4.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією вібруючої поверхні.....	153
2.5 Теоретичні дослідження процесу сепарації насіння соняшнику фотоелектронним сепаратором	161

2.5.1	Фізико-математичний апарат руху насіння по лопаті барабана	161
2.5.2	Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі	168
2.5.3	Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі	171
2.6	Модель автоматичного фенотипування насіння.....	175
2.7	Висновки з розділу.....	180
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....		
3.1	Програма експериментальних досліджень	184
3.2	Методика лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику	184
3.3	Методика експериментальних досліджень процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями	188
3.4	Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами	193
3.5	Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою	197
3.6	Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за забарвленням його околоплоддя	200
3.6.1	Методика експериментальних досліджень блока подачі насіння	200
3.6.2	Методика експериментальних досліджень блока виходу насіння	204
3.6.3	Методика експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора насіння	206
3.7	Методика експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння.....	210
3.8	Засоби статистичного оцінювання експерименту	214
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ		
		218

4.1	Результати лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику.....	218
4.2	Результати експериментальних досліджень процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями.....	222
4.3	Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами	227
4.4	Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою	233
4.5	Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за забарвленням.....	240
4.5.1	Результати експериментальних досліджень блока подачі насіння.....	240
4.5.2	Результати експериментальних досліджень блока виходу насіння.....	247
4.5.3	Результати експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора насіння.....	248
4.6	Результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння.....	254
4.7	Висновки з розділу.....	257
РОЗДІЛ 5	РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	262
5.1	Адаптивний аеродинамічний сепаратор насіння соняшнику	262
5.1.1	Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми.....	262
5.1.2	Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря	268
5.1.3	Експериментальна перевірка зразка обладнання.....	274
5.2	Адаптивний віброрешітний сепаратор насіння соняшнику.....	277
5.2.1	Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми.....	277
5.2.2	Алгоритм і програмне забезпечення визначення фракційного складу насіння соняшнику за фотозображенням	283

5.2.3 Експериментальної перевірка зразка обладнання.....	289
5.3 Адаптивний вібропневматичний сепаратор насіння соняшнику	292
5.3.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми	292
5.3.2 Калібрування блока вимірювання об'ємної маси	299
5.3.3 Експериментальна перевірка зразка обладнання	302
5.4 Фотоелектронний сепаратор насіння соняшнику	305
5.4.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми	305
5.4.2 Експериментальна перевірка зразка обладнання	311
5.5 Пристрій для автоматичного фенотипування насіння соняшнику	313
5.5.1 Спосіб автоматичного фенотипування насіння.....	313
5.5.2 Обґрунтування конструктивно-технологічних схем	316
5.5.3 Експериментальна перевірка макетного зразка обладнання	322
5.6 Висновки з розділу	325
РОЗДІЛ 6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ	
ДОСЛІДЖЕНЬ.....	328
6.1 Економічна оцінка впровадження результатів досліджень.....	328
6.2 Розроблені методики.....	331
6.3 Впровадження результатів у виробництво	335
6.4 Висновки з розділу	337
ВИСНОВКИ.....	339
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	344
ДОДАТКИ.....	394

ВСТУП

Актуальність теми. Станом на кінець 2019 р. в Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, зареєстровано більше 1400 сортів і батьківських компонентів соняшнику і лише 17 % вітчизняної селекції [1]. Це свідчить про загрозу національній продовольчій безпеці України. Тому, згідно з Державною цільовою програмою розвитку аграрного сектору на період до 2020 року необхідне «...стимулювання збільшення виробництва добазового та базового насіння сільськогосподарських культур вітчизняної селекції...» [2]. Посівна площа соняшнику в 2019 р. становить близько 5,8 млн. га [3], на яку витрачено близько 29 тис. т посівного насіннєвого матеріалу.

Створення нових високопродуктивних гібридів і сортів соняшнику, екологічно стабільних і пластичних щодо різних умов обробітку, з розвиненим імунітетом проти хвороб і шкідників – вкрай тривалий і витратний процес. Тому систематизація селекційного матеріалу за спадковими ознаками значно скоротить шлях і час прийняття рішень, а механотронні системи поділу, відбору та класифікації матеріалу, значно знизять витрати. Існуюче обладнання для виконання технологічних процесів сепарації насіння соняшнику за морфологічними (в тому числі маркерними) показниками та фізико-механічними властивостями до встановленої сортової чистоти (98,0–99,9 % [4]) в селекційно-насінницькому процесі вимагає великих капітальних вкладень і значних питомих експлуатаційних витрат, що підвищує собівартість насіннєвого матеріалу. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є удосконалення існуючих технічних засобів шляхом створення систем автоматизованого керування їх конструктивно-режимними параметрами.

Виходячи з цього, розробка й удосконалення техніко-технологічного забезпечення процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику в структурі систем автоматизованого керування їх конструктивно-режимними параметрами є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) згідно з планами науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт: «Розробити сепаратор насінневого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U4214005, 2016–2018 рр.), «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U003095, 2016-2020 рр.), «Розробити приладовимірювальний комплекс для автоматичного фенотипування насіння олійних культур» (№ ДР 0119U100121, 2019–2020 рр.).

Мета дослідження: підвищення ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення первинного насінництва шляхом обґрунтування адаптивних механотронних систем цільового поділу та відбору насінневого матеріалу соняшнику.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою прецизійність цільового поділу та відбору насінневого матеріалу соняшнику за його морфологічними показниками і фізико-механічними властивостями визначає ефективність його використання в подальшому селекційно-насінницькому процесі.

Задачі дослідження:

– розробити прецизійну технологічну лінію процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику на основі вимог до його якості та аналізу відповідного техніко-технологічного забезпечення;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями під дією повітряного потоку на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами під дією

вібруючого решета на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об’ємною масою під дією вібруючої поверхні на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– розробити фізико-математичну модель технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за забарвленням поверхні сім’янок на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– створити експериментальні зразки адаптивних систем керування аеродинамічним, віброрешітним, вібропневматичним і фотоелектронним сепараторами з раціонально узгодженими режимними параметрами;

– розробити структурну модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння соняшнику;

– створити експериментальний зразок пристрою для автоматичного фенотипування насіння та обґрунтувати його раціональні конструктивно-режимні параметри;

– дослідити фактори інтенсифікації селекційного процесу соняшнику, провести експериментальну перевірку і визначити техніко-економічну ефективність застосування результатів досліджень.

Об’єкт дослідження: технологічний процес прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику за морфологічними показниками і фізико-механічними властивостями.

Предмет дослідження: насінневий матеріал соняшнику та умови і закономірності протікання технологічного процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи чисельного моделювання з використанням основних положень теорій класичної механіки, газодинаміки, вібрації, ймовірності, пружності, моделей дискретних

елементів, багатофазної взаємодії, лагранжевої багатофазності. При цьому застосовувались методи диференційного та інтегрального числення.

Експериментальні дослідження проводились з використанням математичного методу планування експерименту, методів натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювались з використанням теорії ймовірності, кореляційно-регресійного аналізу.

Моделювання й обробка результатів досліджень здійснювались з використанням програмних пакетів STAR-CCM+ та Mathematica.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше:

– на підставі системного підходу визначено структуру адаптивного техніко-технологічного забезпечення первинного насінництва соняшнику, що дозволяє здійснювати пошук слабких ланок в технологічних процесах доробки та біоінформативної систематизації насінневого матеріалу за якістю розподілу та продуктивністю ліній при мінімізації питомих витрат;

– визначено узагальнюючі коефіцієнти якості виконання технологічного процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу (коефіцієнти заповнення та розподілу, сумарна концентрація насіння, показник забарвлення насіння);

– отримано математичні моделі технологічного процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику за його аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою та забарвленням поверхні сім'янок, що описують зміни запропонованих коефіцієнтів якості в залежності від режимних параметрів;

– встановлено функціональні залежності і розроблено способи автоматизованого керування прецизійного механізованого процесу сепарації насінневого матеріалу на основі узгодження його режимних і технологічних параметрів;

– розроблено спосіб автоматичного фенотипування насіння соняшнику за його морфологічними показниками.

Отримали подальший розвиток:

– фізико-математичний апарат руху насінневого матеріалу, як гранульованого газу в повітряному потоці під дією вібруючої поверхні з урахуванням пружно-демпферної взаємодії.

Удосконалено:

– комплекс автоматизованого прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів.

Наукова новизна одержаних результатів, лягла в основу технічних рішень, які захищені патентами України на винахід (№ 120231, 120235) і корисну модель (№ 136828, 136829).

Практичне значення одержаних результатів. Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації фотоелектронного сепаратора впроваджені і використані на виробництві ПП «Агромех плюс» для виготовлення відповідного дослідного зразка. ТОВ «Атлант-Запоріжжя» прийняло для впровадження у виробництво науково-технічну продукцію – комплекти конструкторської та технічної документації на експериментальні зразки адаптивних аеродинамічного, віброрешітного і вібропневматичного сепараторів. Розроблена «Методика з визначення можливих максимальних втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищенні та розділенні» і алгоритми розрахунку, які реалізовані в програмному пакеті Microsoft Excel передані і впроваджені у виробництво ТОВ «Снек-продакшн». ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з виробничого контролю технологічних процесів очищення і розділення насінневого матеріалу соняшнику. Отримані експериментальні залежності використані і прийняті ФОП Лінчуком Є.В. в якості методичних засад для проведення налаштування і калібрування фотоелектронного сепаратора ТАІНО 6SXZ-252 CCD COLOR SORTER. Пристрій для автоматичного фенотипування насіння олійних культур використовуються при наукових дослідженнях в області

селекції і генетики в ІОК НААН. ТОВ «Нікертор» отримало рекомендації з ремонту і технічного обслуговування машин і устаткування для сепарації, розділення і очищення насіння олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей, конструктивно-технологічних і електричних принципових схем. Розроблена методика визначення несортованого насіння соняшнику в насінневі суміші використовується ПП «ЛЕНДФОРТ ДНІПРО» під час закупівлі та прийманні насінневого матеріалу соняшнику різних сортів і гібридів.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: проведення чисельного моделювання і експериментальних досліджень технологічних процесів; проведення аналізу процесу і складання відповідних систем диференційних рівнянь; обґрунтування технологічної лінії прецизійної сепарації насінневого матеріалу; розробка показників оцінки якості процесу сепарації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених і спеціалістів (Україна, Вінниця, ДУ ІЗК НААН, 25 – 26 травня 2016 р.), на IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва» (Україна, Тернопіль, ТДСГДС НААН, 30 листопада 2017 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрна наука та освіта в XXI столітті: проблеми, перспективи та інновації» (Україна, Ніжин, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», 17 – 18 травня 2018 р.), на Міжнародній науково-практичній конференції «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Республіка Білорусь, Мінськ, БГАТУ, 21 – 23 листопада 2018), на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури. Тенденції та перспективи» (Україна, Запоріжжя, ІОК НААН, 1 листопада 2016 р.), на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур» (Україна, Запоріжжя, ІОК НААН, 16 листопада 2017 р.), на International research and practice

conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences» (Republic of Poland, Radom, 27 – 28 грудня 2017 р.), на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини» (Україна, Запоріжжя, ІОК НААН, 26 жовтня 2018 р.), на XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (Україна, Львів-Дрогобич, Національний університет «Львівська політехніка», 11 – 12 жовтня 2018 р.), на V міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва» (Україна, Тернопіль, Тернопільської державної сільськогосподарської дослідної станції ІКСГП НААН, 30 травня 2019 р.), на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури: інновації та перспективи» (Україна, Запоріжжя, ІОК НААН, 14 травня 2019 р.), на Міжнародній науковій конференції «Наукові читання до 100-річчя від дня народження професора Івана Вікторовича Яшовського» (Україна, Чабани, ННЦ «Інститут землеробства НААН», 14 – 15 серпня 2019 р.); на XIX Міжнародній науковій конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій» (Україна, Дослідницьке, УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 13 вересня 2019 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 47 наукових працях, у тому числі: 1 монографія; 21 стаття у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 1 у виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз); 4 публікації у закордонних виданнях; 13 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій; отримано 4 патенти (з них 2 на винахід).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 530 сторінок, у тому числі 22 додатки на 137 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 393 сторінки, містить 156 рисунків, 24 таблиці. Список використаних джерел нараховує 450 найменувань на 50 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ. ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

1.1 Перспективність використання прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу в селекційному процесі

Створення нових високопродуктивних гібридів соняшнику, екологічно стабільних і пластичних щодо різних умов обробітку, з розвиненим імунітетом проти хвороб і шкідників – вкрай тривалий і витратний процес. Тому систематизація селекційного матеріалу за спадковими ознаками значно скоротить шлях і час прийняття рішень, а механотронні системи поділу, відбору та класифікації матеріалу, значно знизять витратний процес.

Наприклад, наявність стабільних зовнішніх ознак насіння (фенотип насіння) соняшнику, які характеризують генетичні особливості цієї культури, дозволяють групувати генетично цінний матеріал відповідно завданням селекційних досліджень. Сформовані в результаті селекційної роботи під впливом ґрунтово-кліматичних умов і особливостей вирощування ознаки насіння соняшнику можуть бути носіями особливо цінної інформації.

У той же час, вся багаторічна плідна робота селекціонерів, біотехнологів, імунологів, фахівців з насінництва може бути зведена «нанівець» на останньому етапі отримання насіння елітних репродукцій батьківських компонентів – етапі збирання, доробки, сортування та зберігання ексклюзивного матеріалу [5, 6, 7].

Рішенням даної проблеми є комплексний розгляд послідовних завдань: забирання насіннєвого матеріалу з поля без втрат і травмування; доробка, сортування і калібрування; систематизація матеріалу під вихідні вимоги, сформульовані селекціонером.

Отримання кондиційного насінневого матеріалу високих репродукцій без генетичної чистоти селекційного матеріалу неможливе, що, в значній мірі, визначається повнотою очищення технічних засобів, що взаємодіють з вихідними матеріалами різного генетичного походження.

У зв'язку з цим, до технічних засобів, що працюють з селекційним матеріалом, висуваються жорсткі вимоги щодо очищення обладнання при зміні генетичного матеріалу. Технічні системи повинні дозволяти виконувати цю операцію з 99,9 % гарантією і мінімальними витратами, що визначається особливостями конструкцій машин [8, 9].

Згідно діючих державних стандартів України ДСТУ 2240-93 [4] і ДСТУ 4138-2002 [10] насінневий матеріал соняшнику за сортовими та посівними якостями, визначається, головним чином, його сортовою чистотою, яка повинна складати для елітного насіння (еліта, супереліта) – 98,0–99,9 %. Існуюче обладнання для виконання технологічних процесів очищення та розділення насіння олійних культур до зазначеної сортової чистоти вимагає великих капітальних вкладень і значних питомих експлуатаційних витрат, що підвищує собівартість насінневого матеріалу.

Для доробки насінневого матеріалу батьківських компонентів гібридів соняшнику, оригінального насіння – насіння первинних ланок насінництва (розсадник збереження лінії, розсадники випробування потомства першого та другого років – РВ–1, РВ–2, розсадник розмноження першого року – Р–1), необхідні більш досконалі технічні засоби. Для отримання однорідного генетичного насінневого матеріалу батьківських компонентів необхідно враховувати в комплексі всі ознаки і особливості сім'янки. Насіння соняшнику має значне різноманіття за геометричними розмірами, формою, об'ємною вагою, розташуванням центру тяжіння, профілем поверхні і кольору. Довжина, ширина, товщина, форма і об'ємна вага сім'янки – це кількісні ознаки, які впливають на продуктивність рослини [11, 12]. Інші ознаки або нововиявлені під час досліджень на базі інформаційних технологій зможуть

охарактеризувати генетичні особливості матеріалу і вимагають досконального вивчення.

Наприклад, забарвлення сім'янки соняшнику варіює від білого до чорного через сірі або коричневі відтінки і смугасті форми. Білий колір вказує на відсутність фітомеланіну, сірий колір – підсилює чорний колір, а при наявності антоціана утворюється вугільно-чорний колір з чорним відливом (блиском). Білий колір домінує по відношенню до всіх інших. А чорний колір домінує над коричневим, коричневий над сірим [13, 14, 15, 16, 17]. Для селекційного процесу колір сім'янок, як маркерна ознака відіграє вирішальну роль при ідентифікації відповідного сортозразка соняшнику, запобігає фальсифікації при його продажу.

З огляду на вищесказане можна стверджувати, що розробка прецизійних (точних) технологій поділу насіннєвого матеріалу за комплексом функціональних ознак у селекційному процесі соняшнику є актуальною і перспективною.

1.2 Технологічна лінія процесів очищення та розділення насіннєвого матеріалу

Селекційний процес в насінництві олійних культур висуває особливі вимоги до виконання технологічних операцій очищення, розділення і сепарації насіннєвого матеріалу [18, 19, 20, 21]:

– сортова чистота насіннєвого матеріалу повинна становити для елітного насіння (еліта, супереліта) – 98,0-99,9 % (таблиця 1.1);

Таблиця 1.1 – Вимоги до насіннєвого матеріалу соняшнику [4]

Категорія насіння	Сортова чистота, %	Вміст насіння		
		Основної культури, %	Інших видів, шт./кг	
			культурних	бур'янів
ОН	99,9	100	0	0
ЕН	99,8	99	3	2
РН-1-3	98,0	98	10	5

– в процесі збирання та очищення безповоротні втрати не повинні перевищувати 1,5 % для базового насінництва та 0,1 % – для добазового;

– технічні засоби для виконання технологічних операцій очищення, розділення і сепарації насінневого матеріалу повинні повністю очищатися від генетичного матеріалу попереднього доопрацювання;

– машини повинні мати високу виборчу продуктивність, систему автоматизованого управління і контролю якості роботи;

– технологічне обладнання повинно бути екологічно безпечним як для персоналу, так і для навколишнього середовища.

Сучасна технологічна лінія процесів очищення і сепарації насінневого матеріалу олійних культур включає поділ насінневих сумішей за їх фізико-механічними властивостями, станом поверхні і відтінкам кольору насіння на відповідних технічних засобах: віброрешітних станах, аспіраційних системах, трієрних циліндрах, пневмовібростолах, магнітних сепараторах, фотоелектронних сепараторах. Цільове призначення технічного обладнання та машин дуже широке і, як така, відсутня спеціалізація щодо селекційно-генетичних завдань насінництва [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30]. Узагальнена сучасна технологічна лінія процесів очищення, розділення та сепарації насінневого матеріалу олійних культур представлена на рисунку 1.1.

Згідно Закону України «Про насіння і садивний матеріал» [31] система насінництва складається з ланок добазового, базового і сертифікованого насіння. Розглянемо ці ланки, як основу всього селекційно-насінницького процесу (узагальнена схема представлена на рисунку 1.2).

Для добазового насінництва виключно стоїть завдання забирання з поля і виділення всього генетично цінного матеріалу з вороху, враховуючи цінність цього матеріалу. Добазовий насінневий матеріал підлягає прецизійному поділу і систематизації. Для базового насінництва ставляться інші завдання, оскільки робота ведеться з великими обсягами. Перш за все, розглядаються технологічні

і споживчі показники насіннєвого матеріалу для подальшого якісного висіву з максимально можливою реалізацією його біологічного потенціалу.

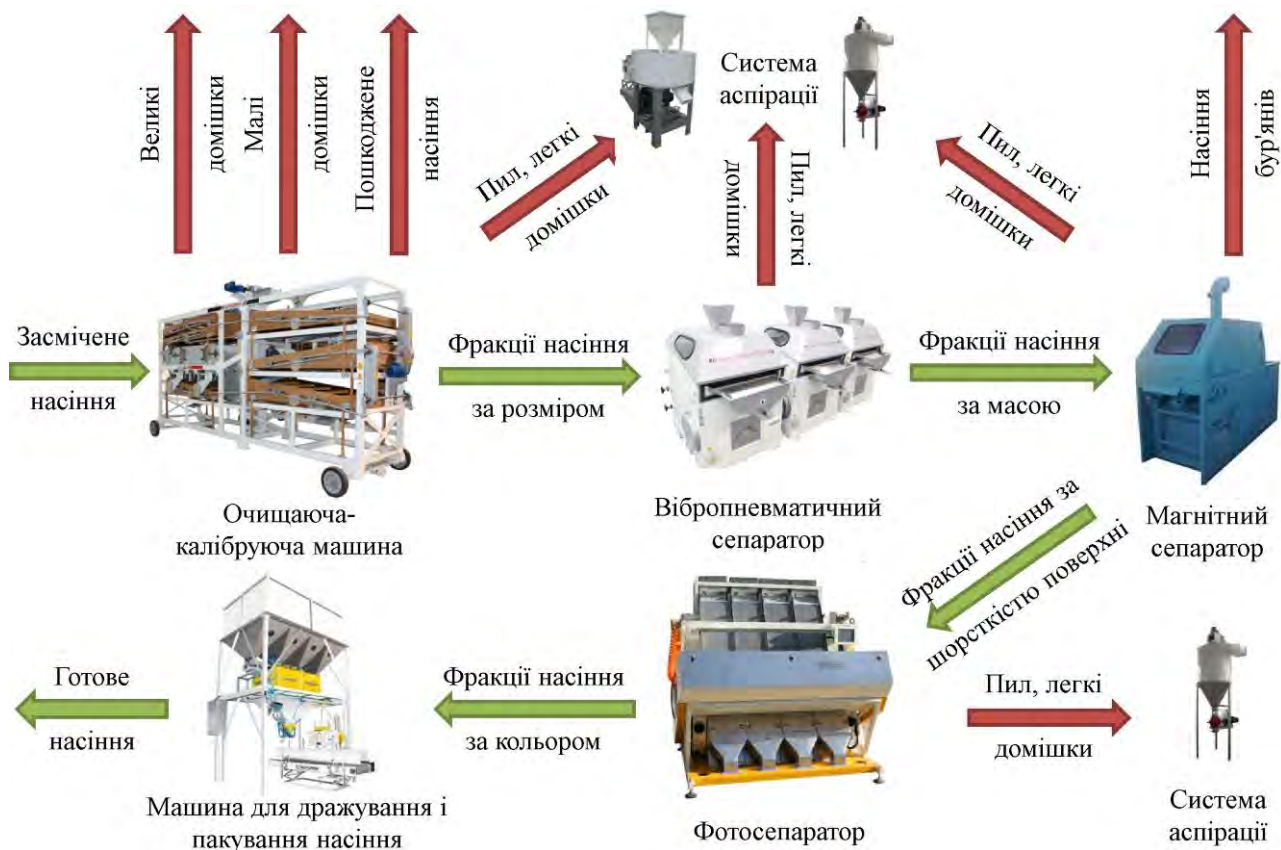


Рисунок 1.1 – Сучасна технологічна лінія процесів очищення, розділення та сепарації насіннєвого матеріалу олійних культур

На рисунку 1.2 також відмічено традиційне техніко-технологічне забезпечення процесу сепарації насіннєвого матеріалу. Так сепарація насіння з розсадників є зазвичай повністю ручною, а супер елітного насіння – супроводжується частково серійним обладнанням загального призначення. Очищення і калібрування елітного насіння і насіння першої репродукції проводиться на серійному обладнанні загального призначення. При цьому виникає велика втрата ліквідного насіннєвого матеріалу, особливо на перших етапах селекційно-насінницького процесу. З метою зниження цих втрат та із урахуванням маси насіннєвого матеріалу соняшнику який підлягає сепарації запропоноване раціональне прецизійне техніко-технологічне забезпечення

селекційно-насінницького процесу із елементами автоматизації (рисунки 1.3–1.5).

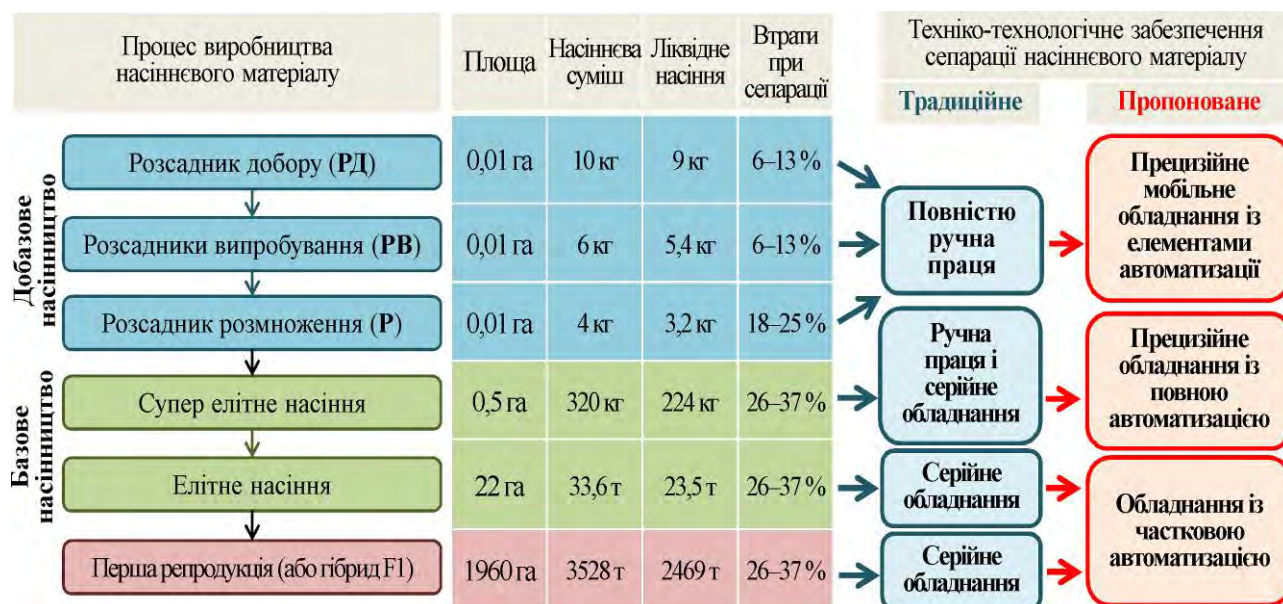


Рисунок 1.2 – Узагальнена схема селекційно-насінницького процесу соняшнику

Весь процес отримання насіннєвого матеріалу після його дозрівання можна розділити на три основних етапи: забирання матеріалу з поля – збирання, доопрацювання зернового вороху, систематизація селекційно-генетичного матеріалу (для добазового насінництва).

У процесі збирання селекційно-насіннєвих ділянок соняшнику формується вихідний насіннєвий ворох, склад якого визначає технічне оснащення і режими роботи його подальшого доопрацювання.

Збирання може бути:

– ручне – з обмолотом і доопрацюванням на стаціонарі або з обмолотом на полі і доопрацюванням на стаціонарі.

– з повним забиранням біологічного матеріалу з поля з подальшим обмолотом і доопрацюванням на стаціонарі;

– за класичною схемою – «обмолот – відділення незернової частини врожаю – очищення насіннєвого вороху з отриманням насіннєвого матеріалу з певним показником засміченості»;

– з обмолотом на корені і подальшим доопрацюванням матеріалу в комбайні на полі або на стаціонарі.

Цільове призначення матеріалу, що забирається, показник наявності основного матеріалу у вороху, його склад та вологість є основою для прийняття рішення щодо технологічного ланцюга доопрацювання матеріалу. Окремим елементом в технологічному ланцюгу може бути активне вентилявання (аспірація) за необхідності доведення матеріалу до заданої вологості.

Прецизійна технологічна лінія процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику, отриманого на базі розплідників і індивідуальних ізоляторів, (рисунок 1.3) включає ручне збирання головок соняшнику, стаціонарний або мобільний обмолот, очищення насінневого матеріалу, аеродинамічне сортування і системний відбір за морфологічними показниками, маркерними і оригінальними ознаками, заданими селекціонером, на приладовому комплексі для автоматичного сканування та фенотипування насіння. Однією з вимог для техніко-технологічного забезпечення добазового насінництва є мінімізація інтенсивності механічного впливу на насінневий матеріал з метою зменшення ймовірності його пошкодження.

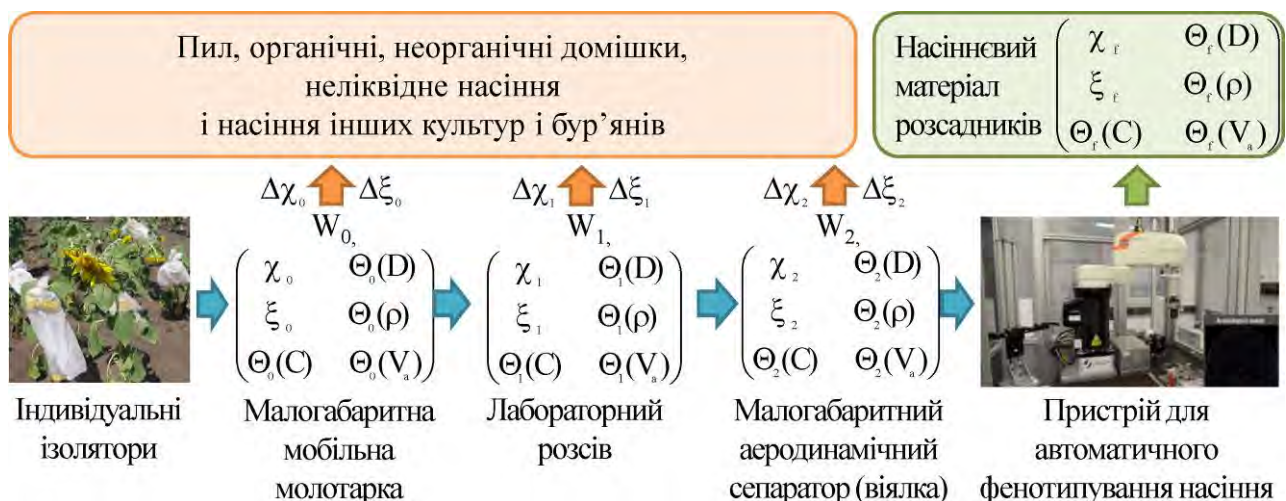


Рисунок 1.3 – Розроблена раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику розсадників

Ефективність роботи існуючих приладових комплексів для систематизації насіння визначається оригінальною автоматизованою інформаційно-аналітичною системою поділу генетичного матеріалу соняшнику і розробляється під конкретні завдання селекційних досліджень. Практично, завдання зводиться, в перспективі, до створення спеціалізованого автоматизованого робочого місця селекціонера.

Такий підхід дозволяє проводити біоінформативний аналіз насіння з систематизацією селекційного матеріалу, а також давати оцінку його якості.

Технологічна лінія процесу збирання і доопрацювання супер елітного насіннєвого матеріалу соняшнику (рисунок 1.4) включає етапи забору вороху соняшнику з під групових ізоляторів площею 0,5–1 га шляхом прямого комбайнування малим селекційним комбайном, або площею менше 0,5 га – шляхом ручного зрізу з обмолотом на мобільній молотарці. Доопрацювання і поділ насіннєвого матеріалу за фізико-механічними і морфологічними показниками відбувається з використанням селекційних сепараторів з елементами автоматизації контролю якості процесу сепарації. На фінішній операції виконується фенотипування насіння. Завдання пристрою для автоматичного фенотипування зводиться до відбору нетипових насінин із загального потоку, що значно підвищує однорідність матеріалу за генотипом.

Для базового насінництва прецизійна технологічна лінія процесів сепарації елітного насіннєвого матеріалу соняшнику і його першої репродукції (рисунок 1.5) об'єднує етапи механізованої первинної обробки та подальшого його калібрування за морфологічними показниками і маркерними ознаками. Прецизійність калібрування досягається шляхом застосування адаптивної системи управління режимними параметрами відповідного обладнання.

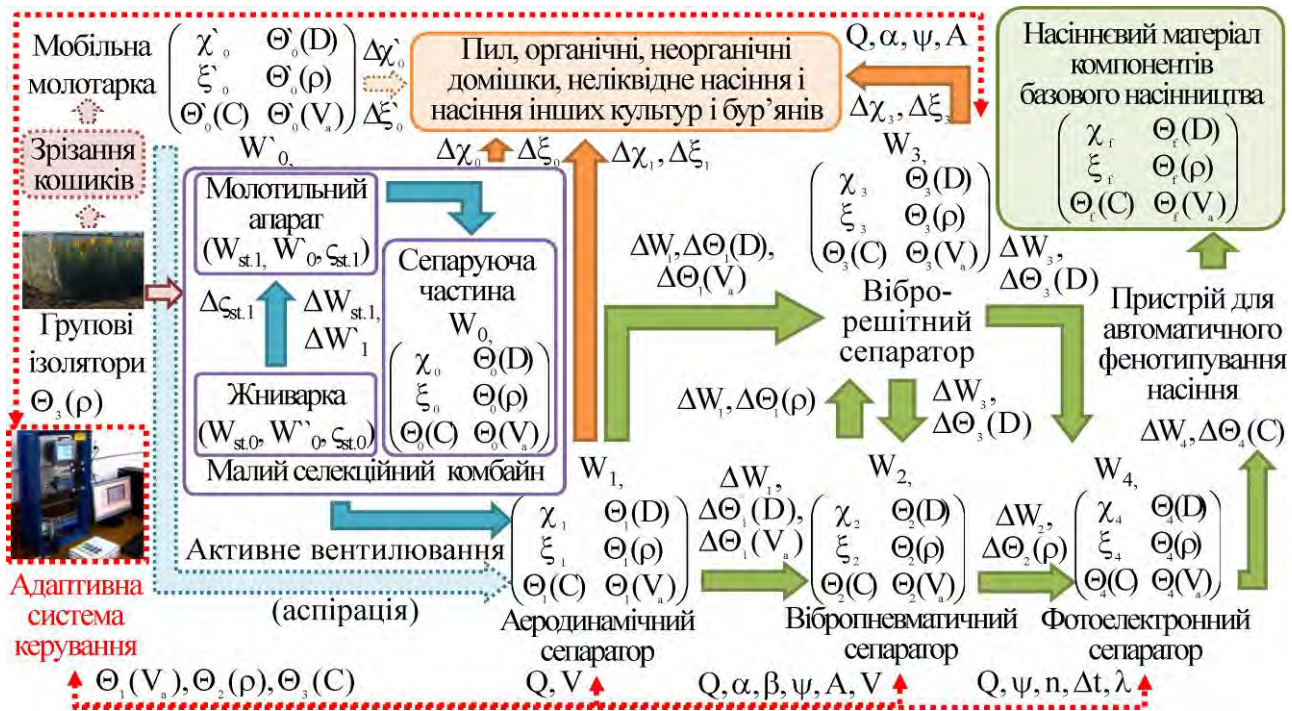


Рисунок 1.4 – Розроблена раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації супер елітного насіннєвого матеріалу соняшнику

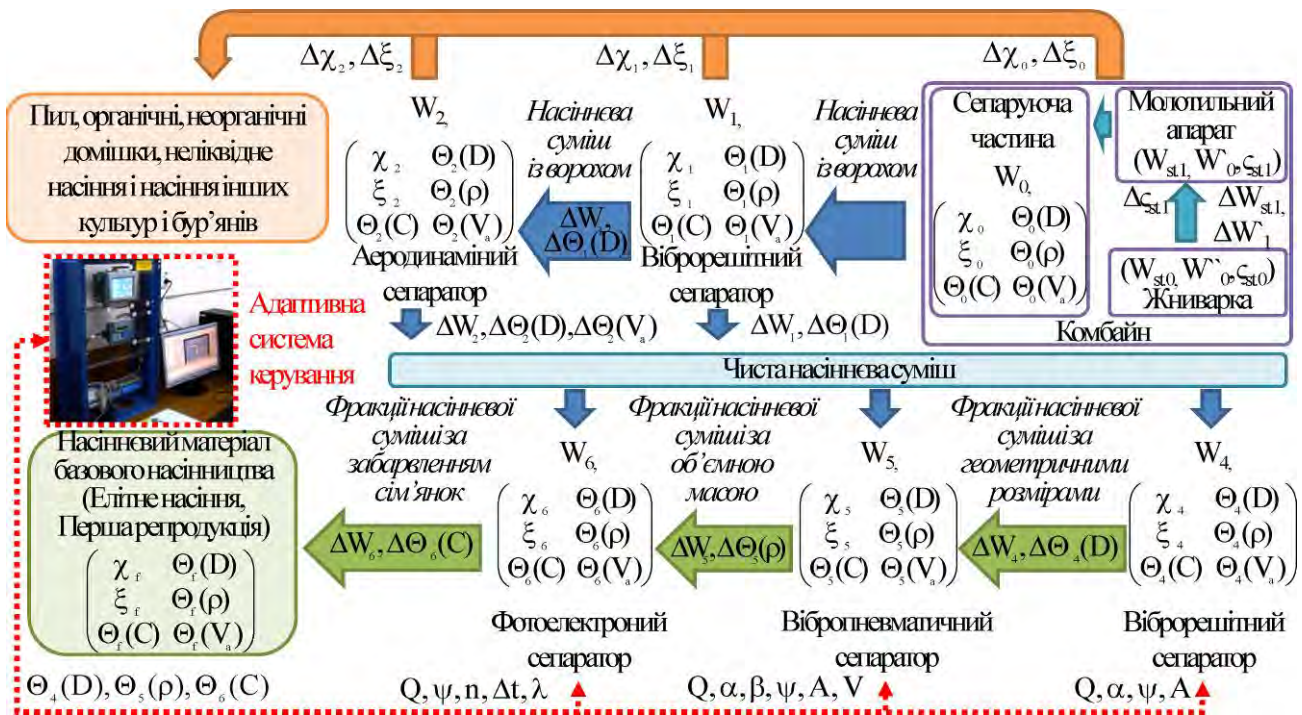


Рисунок 1.5 – Розроблена раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації елітного насіннєвого матеріалу соняшнику і його першої репродукції

1.3 Способи сепарації насіннєвого матеріалу

Всі способи сепарації насіннєвого матеріалу можна розділити за відповідними фізико-механічними властивостями насіння [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]:

- за аеродинамічними властивостями (у пневматичних колонках та інших повітряних каналах);
- за розмірними характеристиками (ширині та товщині на решетах із круглими і прямокутними отворами, довжині – на трієрах);
- за щільністю або об’ємною масою (на пневматичних столах, пневмовібросепараторах);
- за властивостями поверхні та формі (на гірках, фрикційних сепараторах);
- за пружністю (на відбивних сортувальних столах);
- за електрофізичними властивостями (у діелектричних сепараторах, сепараторах у полі коронного розряду);
- за кольором (фотосепаратори).

Велике значення має забезпечення більш повного виходу якісного насіннєвого матеріалу. Тому необхідно обґрунтувати мінімальне, але достатнє для одержання насіння число технологічних обробок [41, 42, 43, 44]. На сьогодні широке впровадження поточного методу при обробці насіння не завжди супроводжується застосуванням науково обґрунтованих поєднаних операцій.

1.3.1 Сепарація насіннєвого матеріалу за аеродинамічними властивостями

Сепарація насіннєвої суміші в повітряному потоці ґрунтується на відмінності аеродинамічних властивостей її компонентів. При відносному русі в повітрі частинка насіннєвої суміші зустрічає з його боку опір, що залежить від

форми, стану поверхні, маси і розташування частинки в повітряному середовищі [45].

Сукупність властивостей, що визначають здатність частинок насінневої суміші переміщатися під впливом повітряного потоку, називають аеродинамічними властивостями. Чим більший опір повітря відчуває частинка насінневої суміші, тим повільніше вона рухається і тим раніше впаде [46].

Для сепарації насінневого матеріалу за аеродинамічними властивостями застосовують горизонтальний, похилий або вертикальний напірний або всмоктуючий повітряні потоки, створювані вентилятором.

У похилому або горизонтальному повітряному потоці насіннева суміш, що надійшла з живильного бункера, піддається впливу повітряного струменю, в результаті чого важкі насінини, що мають мале відхилення при падінні, будуть потрапляти в перше відділення забірника, а легкі домішки будуть віднесені далі – в наступний забірник [47].

У вертикальному висхідному потоці насіння подається на сітку або безпосередньо в повітряний канал. Швидкість потоку регулюють так, щоб насіння залишалося на сітці, а легкі домішки піднімалися і надходили в осадочну камеру. Розділити насінневу суміш повітряним потоком можна тільки в тому випадку, якщо критичні швидкості (швидкості витання) насіння і домішок різні [48].

Процес поділу насінневої суміші в рухомому повітряному потоці аналогічний також випадку, коли частинки суміші під дією механічних пристроїв рухаються в нерухомому повітрі.

Сепарація насінневої суміші в повітряному потоці реалізована в пневмосепараторах або аспіраційних системах, вбудованих в зерноочисні машини. Пневмосепаратор застосовують для попереднього очищення зерна, що надходить від комбайна. У повітряному потоці від зерна відокремлюються шматочки соломи, полова, пил і насіння деяких бур'янів. Існують різноманітні

схеми і конструкції пневмосепараторів. За принципом дії їх можна розділити на три типи: пневмогравітаційні, пневмоімпульсні і пневмовідцентрові [49].

Пневмогравітаційні сепаратори з похилим (рисунок 1.6, а) або вертикальним (рисунок 1.6, г, д) повітряним потоком складаються з вентилятора 1, завантажувального пристрою 2, повітряного каналу 5, осадової камери 7 і приймачів 3, 4 для збору насіння. У цих сепараторах насіннева суміш надходить в повітряний канал самопливом (рисунок 1.6, а, д) або переміщається поперек каналу коливальним решетом 6 (рисунок 1.6, г). У повітряному потоці частки насінневої суміші поділяються. Важкі насіннини зберігають початковий напрямок руху і сходять в приймачі 3 і 4, а легкі домішки відхиляються від напрямку введення і несуться повітряним потоком [21, 50].

У пневмогравітаційних сепараторах на частинки насінневої суміші діють дві сили: тяжіння і аеродинамічна. Напрямок аеродинамічної сили може змінюватися в залежності від напрямку руху повітряного потоку. Тому швидкість повітряного потоку повинна бути менше швидкості витання насіння.

У пневмоімпульсних сепараторах (рисунок 1.6, б, в) насінневу суміш подають в камеру сепарації металником 8. На частинки насінневої суміші діють сили тяжіння, інерції і аеродинамічна. При роботі сепаратора частинки з низькою швидкістю витання несуться повітряним потоком, а основна частина суміші виводиться шнеком 10. Швидкість введення матеріалу в камеру сепарації може бути як завгодно велика, в зв'язку з чим частинки матимуть запас кінетичної енергії для подолання опору повітря. У таких сепараторах швидкість повітряного потоку може бути більше швидкості витання насіння. Збільшуючи швидкість повітря і швидкість подачі, можна інтенсифікувати робочий процес. Однак при цьому слід збільшити розміри камери сепарації [21, 51].

В сучасних насіннеочисних машинах застосовують в основному аспіраційні системи, що включають в себе пневмосепаруючий канал,

сепараційну камеру, вентилятор і механізм регулювання швидкості повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі.

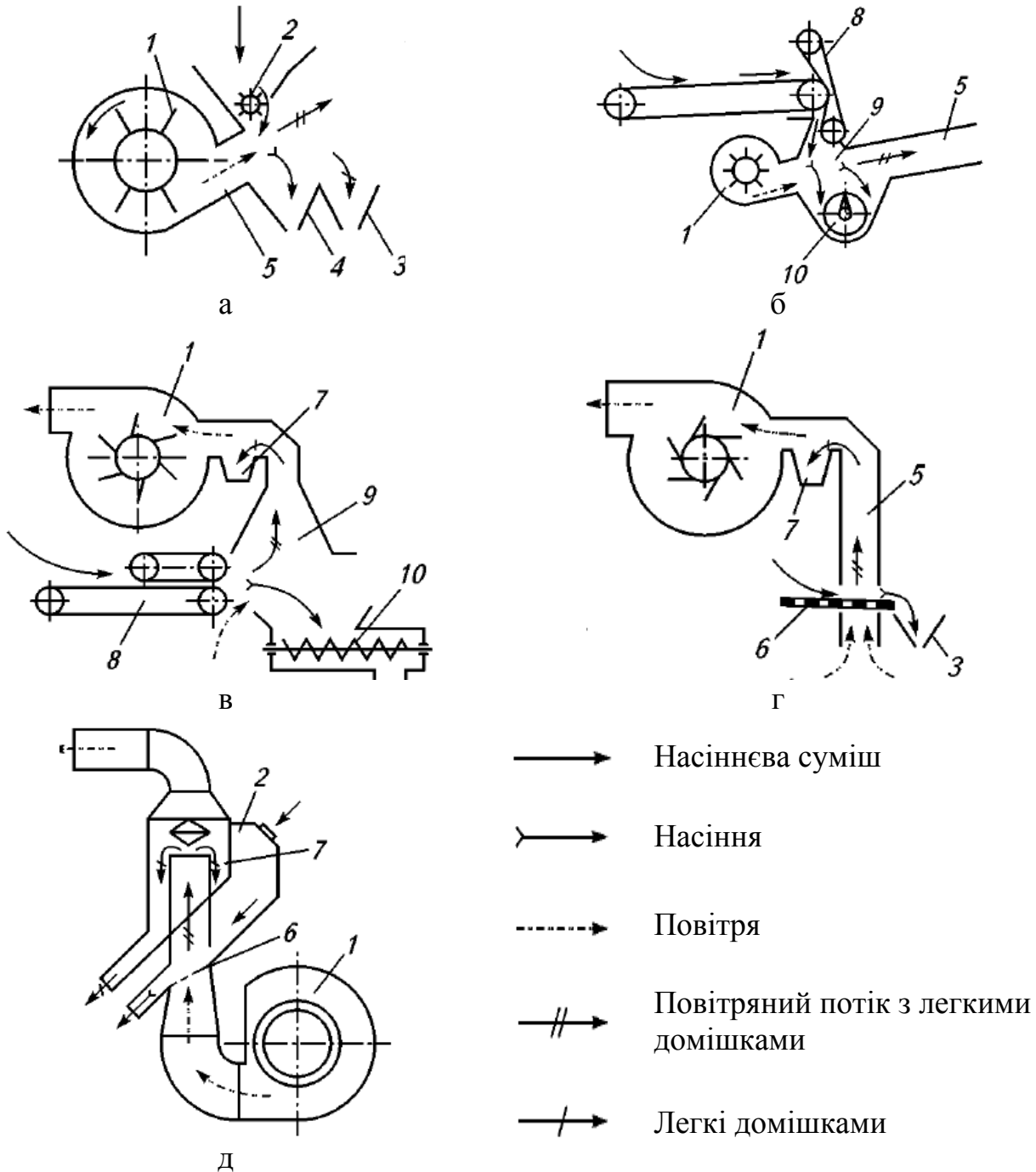


Рисунок 1.6 – Технологічні схеми пневмосепараторів [21]

Широко розповсюджені машини з однією і двома аспіраційними системами, в яких насіннева суміш очищається в повітряному потоці відповідно до решітного очищення або до і після решітного очищення. Такі машини

бувають замкнуті, замкнуто-розімкнуті і розімкнуті. У замкнутих аспіраційних системах повітря багаторазово циркулює в машині і не викидається в атмосферу. Це покращує санітарний стан на робочому місці, але з іншого боку, запилене повітря, проходячи через шар насіння, насичує насінини, особливо травмовані, пилом, що створює сприятливі умови для проживання та розмноження мікроорганізмів, які погіршують посівні і товарні якості насіння [52].

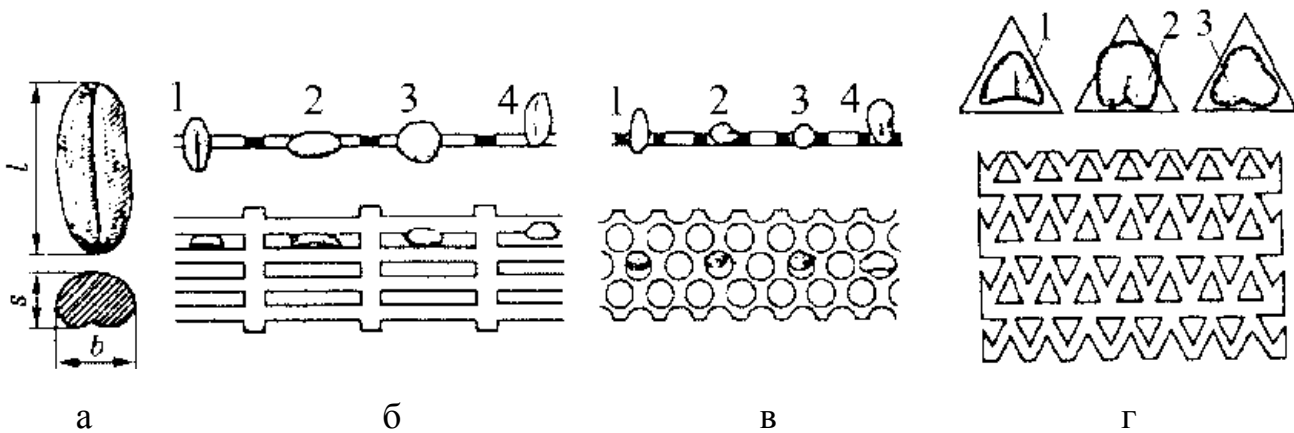
У розімкнутих аспіраційних системах повітря виводиться з машини, тобто запилене повітря не проходить повторно через шар насінневої суміші. У цьому випадку повітря не насичує насінневу суміш пилом і сприяє поліпшенню якості насіння [53].

1.3.2 Сепарація насінневого матеріалу за геометричними розмірами

Будь-яке насіння неправильної форми має довжину, ширину і товщину. За розмірами насіння кожна культура значно відрізняється. На цьому засновані принципи очищення насінневої суміші від домішок і сортування її на фракції [54, 55, 56, 57].

Поділ насіння за товщиною і шириною відбувається на плоских (рисунок 1.7) або циліндричних решетах. Насіння і домішки, які пройшли крізь отвори решета, називають проходом, а насіння і домішки, які зійшли з решета – сходом [58, 59, 60].

Для поділу насіння за товщиною застосовують решета з продовгуватими отворами. Такі решета бувають з рядним, зміщеним і похилим розташуванням отворів. Для поділу насіння за шириною застосовують решета з круглими отворами, а також дротяні решета з квадратними отворами – плетені і ткані. У першому випадку робочим розміром отвору є його ширина, у другому – діаметр. Решета стандартизовані. Їм привласнені номери, що відповідають значенням ширини або діаметру отвору [61, 62].



а – основні розміри насіння; б – розділення насіння за товщиною на решетах з прямокутними отворами; в – розділення насіння за шириною на рештах з круглими отворами; 1, 2, 3 – насінина проходить крізь отвір; 4 – насінина не проходить крізь отвір; г – розділення насіння за товщиною на решетах з трикутними отворами: 1 і 3 – насінина проходить крізь отвір; 2 – насінина не проходить крізь отвір

Рисунок 1.7 – Розділення насіння на решетах [124]

Для очищення гречки і виділення бур'янистого насіння, що має тригранну форму, застосовують решета з отворами трикутної форми, а для очищення насіння льону – з чечевицеподібними отворами. У цих випадках насіння ділять за формою їх поперечного перерізу, тобто одночасно по ширині і товщині [63].

Якість роботи решета залежить від його корисної площі. Корисна площа решета – це сумарна площа всіх його отворів. Відношення корисної площі до загальної площі решета називають відносною корисною площею. Чим більше цей показник, тим інтенсивніше і з меншою засміченістю працює решето [64].

Застосовують різні схеми розміщення решіт в решітних станах: одноярусну трьохрешітну, двоярусну чотирьох- або шестирешітну, триярусну шестирешітну. При одноярусній трьохрешітній схемі розміщення решета встановлюють в такій послідовності: підсівне – для виділення дрібних домішок, сортувальне – для виділення фуражної фракції, колосове – для виділення великих домішок [65, 66, 67].

При двох'ярусній чотирьох- або шестирешітній схемах розміщення в верхньому ярусі встановлюють розділові решета, які поділяють насінневу суміш на дві приблизно рівні частини. Сход з цього решета (великі насінини основної культури і великі домішки) надходить на колосове решето, на якому сходом виділяються великі домішки, а проходом – чисті зерна основної культури. Прохід розділового решета надходить на підсівне решето, де виділяються проходом дрібні домішки, а сход надходить на сортувальне решето. На цьому решеті у прохід виділяється дрібне, щупле і подрібнене насіння, а сходом йде очищений насінневий матеріал, який об'єднується з насінням, що пройшло через колосове решето [68, 69, 70, 71].

При триярусній шести- або семирешітній схемі розміщення решіт в верхньому ярусі встановлюють розділове і колосове решета, у другому ярусі – сортувальні решета, а в нижньому ярусі – підсівне решето. Цю схему застосовують в основному для сортування соняшнику. Відомі й інші схеми розміщення решіт, які застосовують рідше [72, 73, 74, 75].

Решета підбирають з урахуванням розмірів компонентів насінневої суміші.

Сепарація по довжині відбувається в трієрних циліндрах із внутрішньою комірчастою поверхнею. При обертанні циліндра коротке насіння западає в осередку глибше, ніж довге. Тому з осередків спочатку випадає довге, а потім – коротке насіння. Перше, залишаючись в циліндрі, переміщається до його виходу, а друге потрапляє в жолоб, з якого видаляється шнеком [76, 77].

Трієр для виділення коротких домішок (ляльковий) забезпечений дрібними осередками, для виділення довгих домішок (овсюжний) – великими. В осередок овсюжного трієра западає насіння основної культури, лялькового – короткі домішки [78].

Частота обертання трієрних циліндрів повинна бути такою, щоб все насіння випадало з комірок. Якщо частота обертання циліндра більше критичної, то відцентрова сила утримає частину насіння в осередках і точність

поділу насінневої суміші на фракції знизиться. Трієрні циліндри встановлюють в складних зерноочисних машинах, зерноочисних агрегатах і комплексах [79, 80].

1.3.3 Сепарація насіннєвого матеріалу за щільністю та питомою масою

Одним зі способів сепарації насіннєвого матеріалу за щільністю або питомою масою є його розділення в псевдозрідженому шарі. Поділ в псевдозрідженому шарі може здійснюватися різними способами [81, 82]:

– вібраційний [83, 84] (вплив на насіннєвий шар тільки вібраціями опорної поверхні);

– пневматичний (вплив на насіннєвий шар постійним або пульсуючим повітряним потоком);

– вібропневматичний (вплив на насіннєвий шар вібраціями опорної поверхні і повітряним потоком одночасно);

– пневмовідцентровий (вплив на насіннєвий шар надає поле відцентрових сил і повітряний потік).

Найбільш ефективним способом сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику є вібропневматичний. Реалізується він в вібропневмосепараторах і пневмосортувальних столах. При цьому загальна схема поділу здійснюється наступним чином: суміш потрапляє на перфоровану віброуючу поверхню (деку), яка продувається потоком повітря. В результаті відбувається розшарування суміші і групування (сегрегація) в шарах часток з близькими фізичними ознаками. Після розшарування суміш розділяють різноманітними засобами. Підбираючи частоту коливання і кут нахилу деки, домагаються, щоб частинки, розташовані на різних рівнях і з різною щільністю, виводилися в різних місцях [85, 86].

Поділ насіння за щільністю застосовують для отримання найбільш життєздатних насінин, а також для відділення важко відокремлюваних

домішок. Чіткість розділення за цією ознакою значно зростає, якщо насінневу суміш попередньо розділити за розмірами [87, 88].

1.3.4 Сепарація насінневого матеріалу за властивостями його поверхні

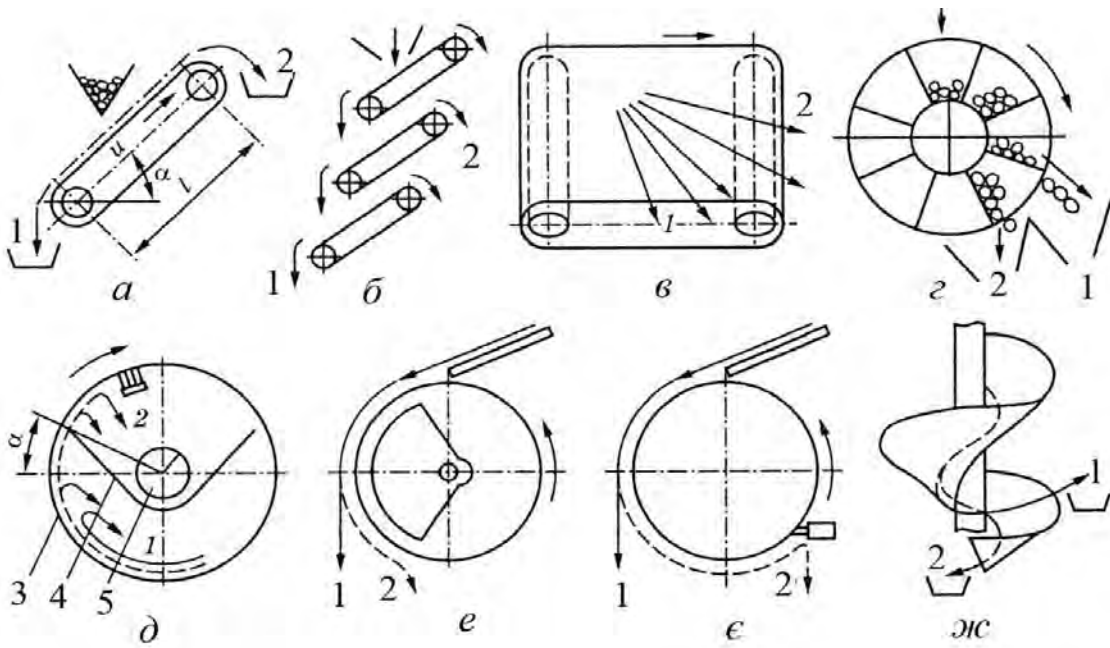
Поверхні окремих компонентів насінневої суміші можуть бути гладкі, шорсткі, з борозенками, покритими плівками, пушком та ін. За формою насіння буває округле, плоске і неправильної форми [89].

Основний принцип поділу насіння за станом і формою поверхні полягає в тому, що гладке насіння краще переміщається по похилій поверхні, ніж шорстке, округла форма насіння сприяє його переміщенню, а плоска – перешкоджає [90]. На цьому заснована робота полотняної гірки (рисунок 1.8, а).

У гірках в якості фрикційної поверхні застосовують похиле шорсткувате полотно, що рухається рівномірно вгору. Якщо на це полотно подавати насінневу суміш, частинки з малим коефіцієнтом тертя скочуються вниз, а з великим – забираються вгору [91, 92].

Більш ефективний спосіб – виділення шорсткуватих бур'янів за допомогою електромагнітів (рисунок 1.8, е, є). Для цього насіння змішують з дрібним порошком, до складу якого входять залізо і крейда (трифолін). Шорсткі насінини добре обволікаються цим порошком. Отриману суміш направляють на обертовий барабан, усередині якого встановлений електромагніт. Гладкі насінини скочуються з барабана, а шорсткі, покриті порошком, притягуються до його поверхні на ділянці дії електромагнітного поля, а потім потрапляють під нього [124].

Для розділення компонентів насінневої суміші застосовують фрикційні сепаратори (рисунок 1.8): одно- і багатоярусні гірки з поздовжнім рухом конвеєра (рисунок 1.8, а, б); з поперечним рухом (рисунок 1.8, в); лопатеві та гвинтові (рисунок 1.8, г, ж); фрикційні трієри (рисунок 1.8, д); електромагнітні та магнітні барабани (рисунок 1.8, е, є) [124].



а – похилий поздовжній конвеєр (гірка); б – ярусні гірки; в – похилий поперечний конвеєр; г – лопатевий барабан; д – фрикційний трієр; е – електромагнітний барабан; е – електричний барабан; ж – гвинтовий сепаратор (змійка); 1 – кругле гладеньке зерно; 2 – плоске шорстке зерно; 3 – фрикційний циліндр; 4 – лотік; 5 – шнек

Рисунок 1.8 – Розділення компонентів зернової суміші за властивостями поверхні [124]

1.3.5 Сепарація насіннєвого матеріалу за забарвленням околоплоддя

Одним зі шляхів підвищення ефективності процесу поділу насіннєвого матеріалу в насіннеочисному комплексі є його фракціонування шляхом застосування фотоелектронного сепаратора на кінцевій стадії обробки насіння. Він дозволяє відокремити не тільки не виконане (не ліквідне) насіння за кольором, але і розділити різні сортозразки з вираженим морфологічним забарвленням [93, 94, 95].

Специфіка фотосепаратора – вибракування важко відокремлюваних домішок, які дуже складно, а часто, і неможливо прибрати традиційними очисними машинами механічного і аеродинамічного типу. У більшості

домішок, які пройшли разом з основним продуктом первинне сортування, схожі фізичні характеристики: однакові форма і маса. Принцип сортування таких продуктів заснований на порівнянні кольору гідної і негідної насінини, причому не тільки у видимому спектрі світла. Якість роботи фотосепаратора при відділенні таких домішок дуже висока, і часто досягає 99,99 % чистоти [96].

Фотосепарація – процес поділу обстежуваного матеріалу за рахунок обробки сигналів з камер або фоточутливих сенсорів. Фотосепаратор є високопродуктивним обладнанням, призначеним для вилучення з сипучих матеріалів домішок, що відрізняються за кольором. Апарат визначає найдрібніші відхилення в сортованому продукті і відбраковує його [97, 98, 99].

Фотосепарація відноситься до завершальних етапів тонкого очищення. Це пов'язано з тим, що механічне очищення не дає необхідної чистоти культури насіння, що сортирується. Насіння механічно відсівається за такими параметрами як маса, форма, розмір, електропровідність і аеродинамічні властивості. При цьому частина бур'янів у культурі має такі ж характеристики і пропускається усіма попередніми ступенями очищення разом із основною культурою [100, 101, 102, 103].

Спроби розпізнавання кольору зерна дослідниками застосовувалися і раніше. Так, одним з доступних і економічних способів візуального визначення кольору зерна було замочування насіння у воді [104]. Розвиток сучасних цифрових технологій відкрив нові можливості для вивчення морфометричних (розмір і форма) і колориметричних (варіації кольору) характеристик такого об'єкта селекції як насіння. Вчені Селекційно-генетичного інституту (м. Одеса) В.М. Цевма, А.Н. Хохлов та ін. [105, 106, 107, 108] досліджували потенційні можливості цифрових систем розпізнавати колір зерна пшениці.

Параметри, найбільш характерні для етапу фотосепарації, це колір, тип і рельєф поверхні. Колір найбільш просто і швидко розпізнається у обстежуваного об'єкта і дозволяє відрізнити, наприклад, темні сміттєві насіння

від світлих злакових культур. Тип поверхні може служити відмітним показником глянцевиx насінин і матових. Рельєф може бути заданий як нерівним краєм, так і западинами і тріщинами в центрі об'єкта, що також може говорити про його приналежність до певної культури [109].

Виходячи з проведеного аналізу науково-технічної літератури [110, 111, 112] складена класифікація існуючих алгоритмів обробки оптичних сигналів, які представлені на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Класифікація алгоритмів обробки оптичних сигналів

Загальний алгоритм нейромережевого розпізнавання включає наступні етапи створення «навчальної» бази даних (БД) для спектрального аналізу плоского зображення насінин і подальшого розпізнавання зображень [110, 113]:

- отримати зображення насінин на однотонному фоні;
- виділити піксельні зображення окремих одиничних насінин;
- встановити центр мас об'єкта і прив'язати його до осей координат;
- нормалізувати розміри об'єкта таким чином, щоб геометричні розміри всіх насінин збігалися;
- провести дискретне вейвлет-перетворення колірних складових всіх пікселів, що належать виділеній в попередніх пунктах області;
- впорядкувати отримані коефіцієнти;
- зберегти отримані дані в БД одиничних вейвлет-спектрів;
- сортувати зерноsumіші за вейвлет спектром [111].

Наступним алгоритмом є кольоровий аналіз, який ґрунтується на оцінці контрасту колірних компонентів. Цей алгоритм використовують, наприклад, для контролю якості газової суміші при її горінні (рисунок 1.10) [114, 115].

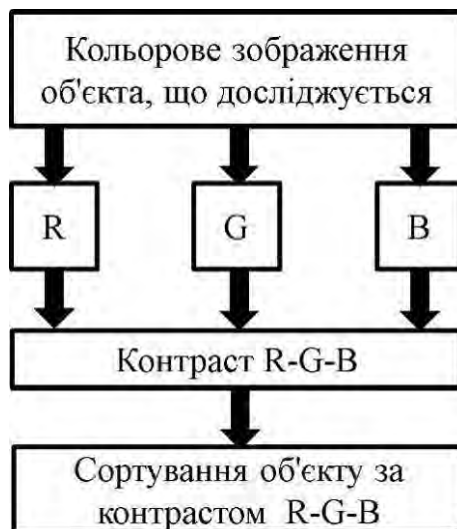


Рисунок 1.10 – Схема реалізації сепарації насіння методом оцінки контрасту колірних компонентів

Метод містить наступні основні етапи [115]:

- отримують зображення досліджуваного об'єкта;
- виконують статистичну обробку числових значень R-, G-, B-компонентів;
- виявляють закономірності зміни числових значень колірних компонентів;
- розраховують значення контрастів RGB складових;
- сортують продукт по розрахованому RGB контрасту [115].

Виходячи з основних етапів колірного аналізу, даний алгоритм підходить для сортування насіння соняшнику. Причинами вибору алгоритму є:

- критерій сортування, що забезпечує однозначне визначення придатного продукту і домішки;
- відсутність складної обробки зображення, що сприяє збільшенню продуктивності сортувального апарату.

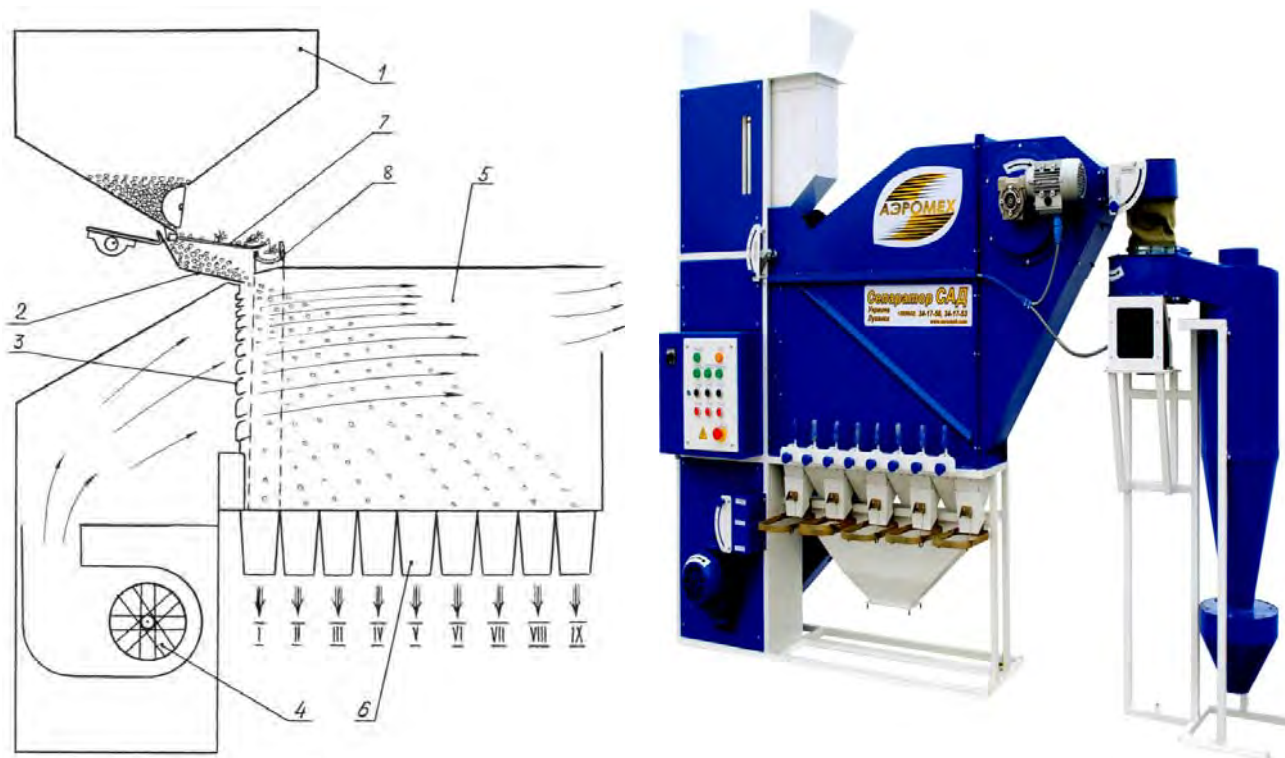
1.4 Аналіз технічного забезпечення технологічних процесів очищення та розділення насіння

1.4.1 Аеродинамічні сепаратори

На сьогодні існує велика кількість аеродинамічних сепараторів. Однак розглянемо більш узагальнену конструкцію на прикладі аеродинамічних сепараторів «Сад», «Алмаз», СПС та ін. (рисунок 1.11, таблиця А.1). Аеродинамічний сепаратор «Сад» містить бункер 1 для завантаження насінневого матеріалу, що підлягає сепаруванню, з вібрлотком 2, встановлений під ними генератор 3 каскаду повітряних струменів, який пов'язаний з джерелом 4 подання повітря під тиском у генератор 3, та сепараційну камеру 5. Під сепараційною камерою 5 розташовані збірники фракцій 6 (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX). На початку вібрлотка 2, між ним та виходом з бункера 1 встановлена скальператорна гребінка 7. Під вільним консольним кінцем гребінки 7 розташований збірник великих домішок, виконаний у вигляді двоскатного каналу 8, що сполучається зі збірником першої фракції 6 (I) [116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123].

До недоліків відомого обладнання слід віднести низьку якість виконання операцій сепарації і калібрування неоднорідної зернової або насінневої суміші за аеродинамічними властивостями (питома парусність) на фракції через наявність постійного коливання швидкості повітряного потоку в сепараційній камері, що призводить до потрапляння небажаних (не ліквідних) частинок зернової або насінневої суміші до збірників ліквідних фракцій. Також подібні сепаратори мають низьку продуктивність через велику неоднорідність зернового або насінневого матеріалу, який необхідно розділити на фракції. Це викликає потребу в необхідності постійного налаштування швидкості повітряного струминного потоку в аеродинамічному просторі і подачі вихідного матеріалу для забезпечення високої якості розділення. Постійне переналаштування режимних параметрів сепаратора призводить до зниження

продуктивності машин і збільшення трудомісткості виконання зазначеного процесу.



- 1 – бункер; 2 – вібралоток; 3 – генератор каскаду повітряних струменів;
 4 – джерело подання повітря; 5 – сепараційна камера; 6 – збірники фракцій;
 7 – скальператорна гребінка; 8 – збірник великих домішок

Рисунок 1.11 – Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд аеродинамічних сепараторів «Сад», «Алмаз», СПС та ін.

1.4.2 Віброрешітні сепаратори

Класифікувати віброрешітні сепаратори можна за ознаками розділення насіння (таблиця 1.2). Віброрешітні сепаратори бувають безперервної та періодичної дії. Найбільше застосування знайшли сепаратори безперервної дії. Особливості технологічних і конструктивних схем цих машин в залежності від ознак і способів поділу насіння, робочих органів і траєкторій їх руху приведені в роботі [124].

Таблиця 1.2 – Класифікація віброрешітних сепараторів за ознаками розділення насіння

Ознаки поділу насіння		Спосіб поділу	Робочі органи	Форма коливань	Галузева назва машини
Основні	Супутні				
Розміри	Щільність, форма	Ситовий	Сита (решета)	Прямолінійні, кругові і еліптичні в горизонтальній або вертикальній площині	Грохоти, ситові сепаратори, розсіви
Форма	Коефіцієнт зовнішнього тертя, щільність	Вібраційне транспортування	Коміркові або шорсткі поверхні	Прямолінійні похилі до горизонтальної площини	Вібро-сепаратори

Залежно від призначення машини відрізняються за типом приводу, кількістю і розташуванню ситових корпусів, що коливаються, за характером їх руху. Класифікації вібромашин наведено на рисунку 1.12.

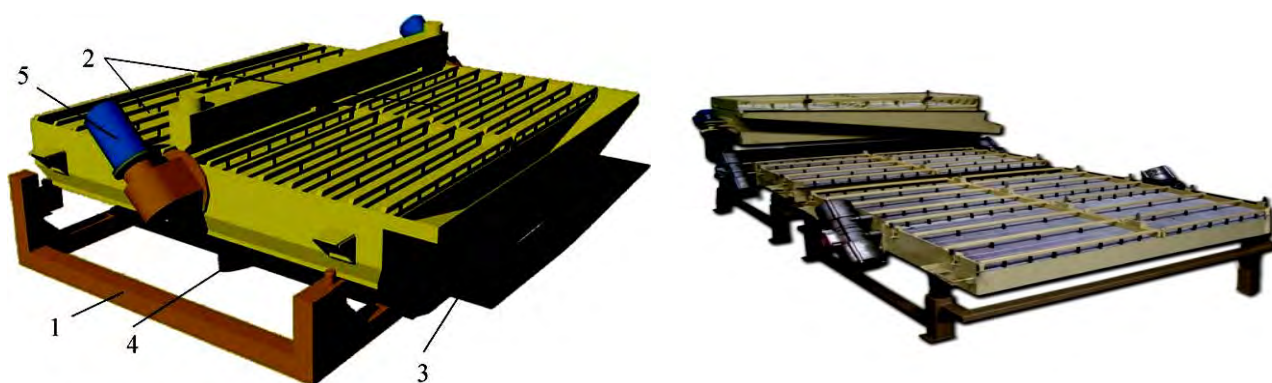
Велику групу складають машини для очищення насіннєвих сумішей від домішок (сепаратори типу ЗСМ, ЗПС, ЗВС-20, Р8-УЗК-50, А1-БІС, А1-БЛС, А1-БСФ, «Класифайер», «ОКМФ», фірм «Petkus», «Wintersteiger» і «Cimbria», таблиця А.1). Відомі конструкції зерноочищувальних сепараторів [125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134], що містять раму 1, кузов з решітними рамами 2, забірник сходу 3, забірник проходу 4, привід 5, виконаний у вигляді двох електровібраторів, симетрично встановлених на протилежних боках кузова (рисунок 1.13).

До недоліків відомого обладнання слід віднести низьку продуктивність і якість виконання операцій сепарації і калібрування неоднорідної зернової або насіннєвої суміші за геометричними розмірами на фракції через необхідність постійного переналаштування частоти обертання вібродвигунів і як наслідок частоти коливань решітної рамки. Також існуючі віброрешітні сепаратори мають низьку продуктивність через велику неоднорідність зернового або насіннєвого матеріалу, який необхідно розділити на фракції. Це викликає

потребу в необхідності постійного налаштування кутів нахилу решіт для попередження утворення затримки потоку неоднорідної зернової або насінневої суміші, що призводить до зниження продуктивності машини, погіршення якості калібрування матеріалу на фракції і збільшення трудомісткості виконання зазначеного процесу.



Рисунок 1.12 – Класифікація віброрешітних сепараторів з плоскими решетами



1 – рама; 2 – кузов з решітними рамами; 3 – забірник сходу;
4 – забірник проходу; 5 – електровібратор

Рисунок 1.13 – Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд віброрешітного сепаратора «ОКМФ»

1.4.3 Вібропневмосепаратори

З технічних засобів для відділення домішок за комплексом фізико-механічних властивостей найбільше застосування знайшли вібропневмосепаратори. Їх можна розділити за такими основними ознаками [135, 136]: за типом повітряної частини – з вакуумною і нагнітальною пневмосистемою; за формою деки – з прямокутною, трапецієподібною декою і декою, що має форму тіла обертання; за типом дільників потоку – ножовим, решітним, шахтним. Також вібропневмосепаратори можна класифікувати за ознаками розділення насіння (таблиця 1.3) [137, 45, 138].

Таблиця 1.3 – Класифікація вібропневмосепараторів за ознаками розділення насіння

Ознаки поділу насіння		Спосіб поділу	Робочі органи	Форма коливань	Галузева назва машини
Основні	Супутні				
Щільність	Форма, розміри	Само-сортування	Шорсткуваті поверхні (плоскі або конічні) із зливними патрубками	Кругові в горизонтальній площині, кругові сферичні	Каміні-відбірник, фракціонуючі
Щільність	Коефіцієнт зовнішнього тертя, форма	Вібропневматичний без просіювання	Шорсткувата плоска поверхня	Прямолінійні похилі до горизонтальної площини	Вібропневматичні сепаратори
Щільність і розміри	Форма	Вібропневматичний з просіюванням	Сита і повітряні канали	Прямолінійні похилі до горизонтальної площини	Ситовійка, повітряні грохоти, пневмостіл
Пружність	Щільність, коефіцієнт тертя	Ударно-вібраційний	Похилі, гладкі опорні поверхні з вертикальними бічними стінками	Горизонтальні, прямолінійні і обернено-обертальні	Сортувальні столи падді-машини

За типом перетворення енергії в енергію механічних коливань приводу вібропневмосепаратори діляться на три групи (рисунок 1.14). Найпростішими з них є кінематично жорсткі приводи. Недоліком такого приводу є дія великих інерційних сил на ланки пристрою. При зворотно-поступальному русі деки застосовують ексцентрикний коліватель.



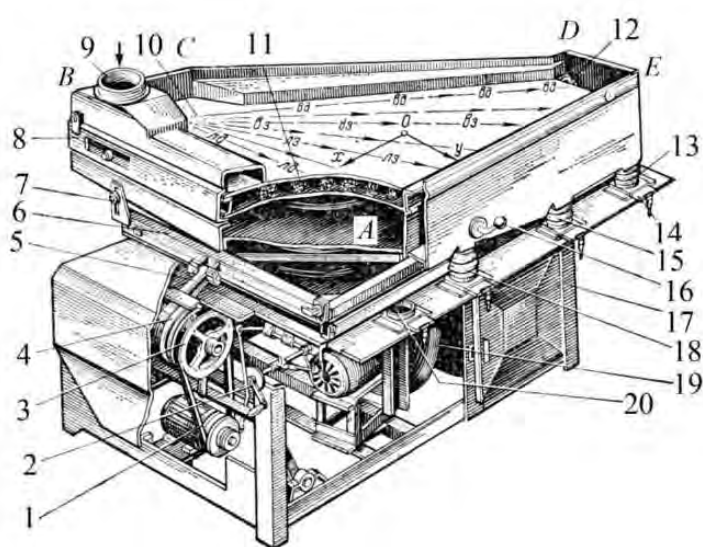
Рисунок 1.14 – Класифікація приводів робочих органів вібропневмосепараторів

До наступної групи приводних пристроїв відносяться інерційні колівателі. Амплітуда коливань насіннеочисних машин з інерційними колівателями залежить від співвідношення частот вимушених і власних коливань, маси робочих органів і оброблюваного продукту [139].

Існує велика кількість вібропневмосепараторів, однак їх конструкції можна узагальнити [140, 141, 142, 143, 144, 145]. Найбільш поширеним є пневматичний сортувальний стіл ПС (таблиця А.1), який складається з варіатора 1, регулятора 2, механізму привода 3, противаги 4, шатуна 5, рамки 6, кронштейна 7, деки 8, горловини 9, сітки 10, повітровирівнювальної решітки 11, клапана 12, приймальників 13, 15, 18 і 20, заслінки 14, важеля 16, рами 17, вентилятора 19.

До недоліків відомого обладнання слід віднести його низьку продуктивність і якість виконання операцій сепарації, очищення та розділення неоднорідної зернової або насінневої суміші за об'ємною масою на фракції через необхідність постійного переналаштування частоти коливань деки й швидкості повітряного потоку через робочу поверхню деки, що в значній мірі

впливає як на продуктивність машини, так і на якість розділення насіння на фракції. Також зазначені вібропневмосепаратори мають низьку продуктивність через велику неоднорідність зернового або насінневого матеріалу, який необхідно розділити на фракції. Це викликає потребу в необхідності постійного налаштування кутів подовжнього й поперечного нахилів деки для забезпечення рівномірного розподілу матеріалу по всій площині робочої поверхні, що призводить до зниження продуктивності машини, погіршенню якості розділення матеріалу на фракції і збільшенню трудомісткості виконання зазначеного процесу.



- 1 – варіатор; 2 – регулятор; 3 – механізм привода; 4 – противага; 5 – шатун;
 6 – рамка; 7 – кронштейн; 8 – дека; 9 – горловина; 10 – сітка;
 11 – повітровирівнювальна решітка; 12 – клапан; 13, 15, 18 і 20 – приймальник;
 14 – заслінка; 16 – важіль; 17 – рама; 19 – вентилятор

Рисунок 1.15 – Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд пневматичного сортувального столу ПС

1.4.4 Фотоелектронні сепаратори

Вперше у світовій практиці до дослідження процесу поділу компонентів сипучої маси за кольором звернулася англійська фірма «Sortex». На ринку

з'явилися фотоелектронні сепаратори цієї фірми. Конструкція сучасних фотосепараторів ввібрала новітні досягнення електроніки, мікропроцесорної техніки, область застосування їх поширилася практично на всі сипучі продовольчі продукти, включаючи заморожені ягоди, овочі, фрукти, але принцип дії залишився тим самим: сепарований за кольором продукт подається спеціальним пристроєм поштучно в зону контролю, де відбувається порівняння електричного сигналу, утвореного фотоелементом під дією світла, відбитого від аналізованої частинки, з еталонним сигналом, відповідним світлу, відбитому доброякісною частинкою. При збігу величини сигналів в прийнятих межах частинка вільно потрапляє до збірки доброякісного продукту, а при помітній відміні контрольного сигналу цей сигнал посилюється і подає команду на механізм відбракування, що виводить зернівку короткочасним повітряним імпульсом. Сопло, що спрямовує повітряний струмінь на забраковану зернівку, розташоване нижче по траєкторії її падіння від точки виявлення на таку відстань, яку вона пролітає за час спрацьовування електронної та пневматичної систем. Під дією, повітряного струменя забракована частка відхиляється від траєкторії польоту доброякісного зерна і потрапляє до збірки недоброякісного продукту [146, 147].

Фірмою «Gimsoifs Sortex Ltd.» (Великобританія) був запропонований багатоканальний фотоелектронний сепаратор з мікропроцесорним управлінням [148]. Цією ж фірмою розроблений фотооптичний сепаратор на базі електронно-логічного пристрою [149]. У США розроблений фотоелектронний сепаратор з двома проєкційними екранами [150]. Японською фірмою «Satake» запропонована комбінована фотоелектронна сортувальна установка для розділення насіння за розміром, формою і кольором ядер [151]. В іншій конструкції фотоелектронного сепаратора, розробленого фірмою «Satake» [152, 153], насіння подається з приймального бункера тонким струменем, що проходить між джерелом світла і кольороаналізатором. В [154] розглянуто сепаратор, що сортує зерна за кольором з використанням електронної обробки

сигналу. В [155] розглянуті питання дослідження пшеничного зерна методом аналізу відеозображення в ближній інфрачервоній області спектра, розглянуто застосування фотолінійки і аналізу відеозображення, проведено дослідження зерна методом відеоспостереження. В [156] наведені дані про розробку сепаратора промислового використання, в основу якого було покладено принципи поділу за кольором компонентів зернової маси, однорідної за фізико-механічними властивостями. В [157] розглянуто ще один варіант стенду для сепарування зернопродуктів за кольором на основі монохроматичної оптичної схеми.

У світовій практиці застосування та виробництво фотоелектронних сепараторів зростає, розширюється і перелік фірм що випускають це обладнання. Принцип його дії знаходить у розробників різних фірм різні рішення, які мають свої переваги і недоліки. На підставі порівняльного аналізу відомих на сьогодні конструкцій в роботі [158] наведено класифікацію зарубіжних моделей фотоелектронних сепараторів. За представленою інформацією розроблена класифікація оптичних фотосепараторів за принципом конструктивних параметрів робочих органів та технологічного процесу сортування насіння [159]. В основу запропонованої класифікації фотоелектронних сепараторів покладено різні варіанти виконання їх основних блоків: харчування; оптичного, що включає джерело світла і сенсор (фотоелемент) з системою лінз; електронного; вилучення забракованих за кольором часток; управління роботою сепаратора і, іноді, контролю відходів. Для зручності в класифікації позначені фірми, що реалізують конкретні варіанти рішень в своїх моделях фотоелектронних сепараторів. Ряд фірм, які застосовують аналогічні рішення, не винесені в класифікацію. Класифікація фотоелектронних сепараторів за кольором представлена на рисунку 1.16 і таблиці А.2.

Узагальнюючи проведений аналіз можна висунути вимоги до фотоелектронних сепараторів.

1. Що стосується технологічної ефективності, що включає якість кінцевих продуктів, то перевага фотоелектронних сепараторів тут є очевидною в силу того, що в механічних сепараторах відбір ведеться по всій сортованій насіннєвій суміші, а в фотоелектронних сепараторах – по кожній частинці окремо, що, природно призводить до підвищення якості очищення насіннєвого матеріалу.

2. Надійність і технологічність конструкції фотоелектронних сепараторів також явно виграє на тлі механічних аналогів. Так як в фотоелектронних сепараторах число рухомих механічних деталей зведено до мінімуму, це значно підвищує час напрацювання машини «на відмову», а, отже, підвищує їх надійність.

3. Економічна ефективність машини забезпечується прогресивним робочим процесом, високою продуктивністю, міцністю і надійністю, технологічністю виконання збірки, низькою металоємністю, масою, енергоємністю і експлуатаційними витратами, високим ресурсом і ступенем механізації і автоматизації, простотою і безпекою обслуговування, зручністю в управлінні.

4. Відповідність вимогам ергономіки, СНіП, протипожежної безпеки і техніки безпеки. Будь-яка машина не могла б вийти з конвеєра підприємства виробника, якби вона не відповідала вимогам, винесеним у заголовок цього абзацу, на момент її випуску. Це стосується і механічних сепараторів, і фотоелектронних сепараторів, і інших механізмів і машин.

Відомий сепаратор оптичний [160], що містить пристрій подачі матеріалу, освітлювачі, відеокамеру, перетворювач сигналу, комп'ютер з платою відеозахвату, блок управління форсунками з мікроконтролером, видувальні форсунки, системи подачі стиснутого повітря, ємності для різнокольорового матеріалу.

До недоліків відомого обладнання слід віднести нестабільність його роботи через неоднорідність подачі матеріалу до області відеозахвату. Це в

значній мірі впливає на швидкість реєстрації матеріалу і погіршує якість процесу сепарації.

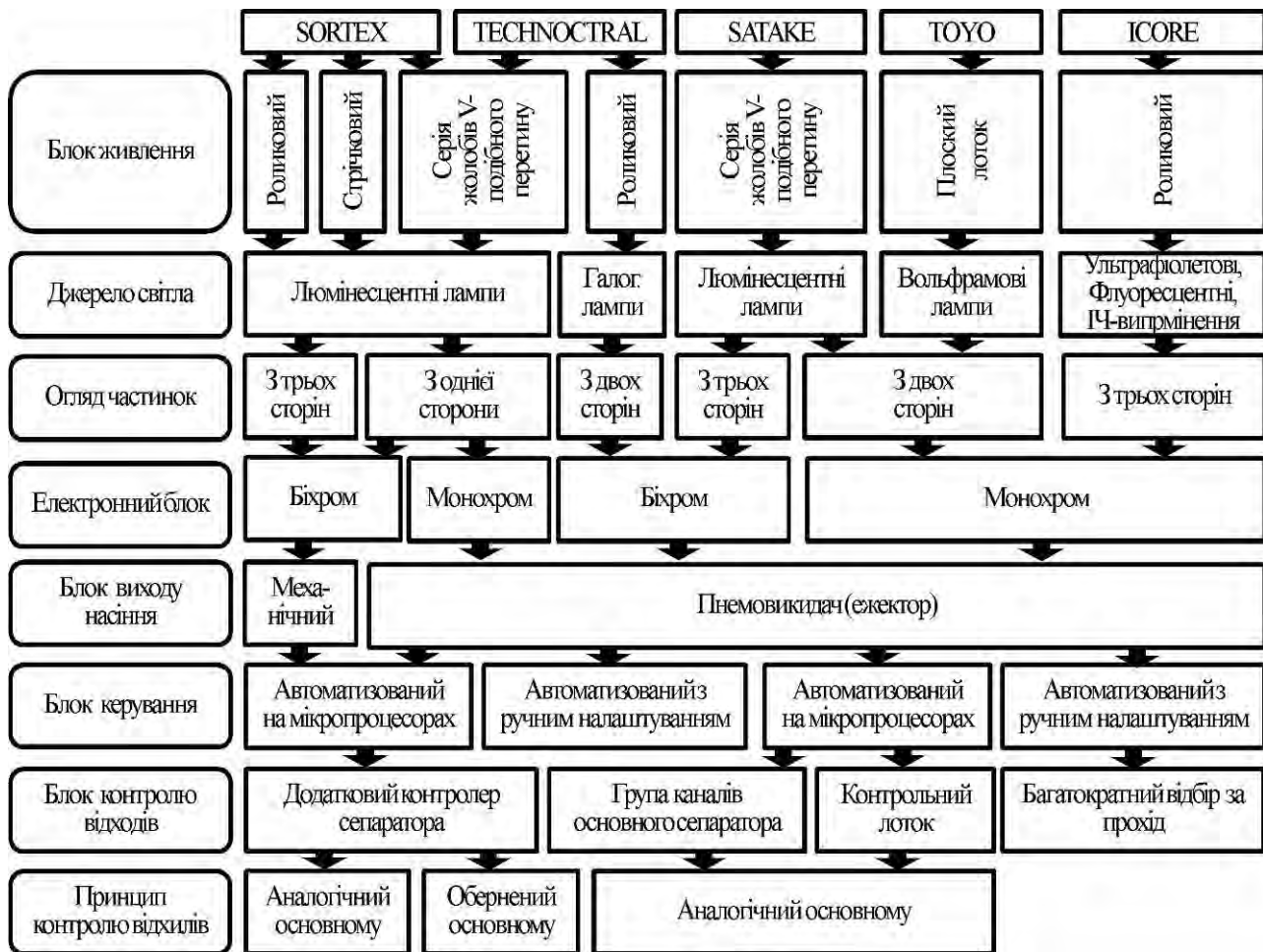


Рисунок 1.16 – Класифікація фотоелектронних сепараторів

Відомий також оптоволоконний лазерний сортувальник [161], що містить пристрій транспортування матеріалу, пристрій лазерного освітлення матеріалу, пристрій розгортки лазерного пучка, пристрій зчитування й обробки зображення, пристрій для видалення дефектних матеріалів.

До недоліків відомого обладнання слід віднести його неузгодженість. Так зі збільшенням подачі матеріалу погіршується якість процесу сортування, і навпаки, при дотриманні високої якості процесу сортування матеріалу знижується продуктивність. Також до недоліків слід віднести постійне налаштування оператором пристрою транспортування матеріалу з метою встановлення необхідної подачі зі збереженням якості процесу сортування.

1.4.5 Пристрій для автоматичного фенотипування насіння

Фенотипування насіння – процес типування, визначення, ідентифікації і розділення насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними та маркерними ознаками (наприклад, забарвлення, форма і геометричні розміри) [162].

Насіння рослин можуть приймати різноманітну геометричну форму і відповідно до цього мати різні геометричні розміри. Процес визначення форми і розмірів індивідуальних насінин різних сортів однієї культури потребує величезних часових витрат, що призводить до погіршення ефективності селекційного процесу [162].

Окрім цього насіння рослин мають цілий спектр забарвлення, що визначає цей показник важливою маркерною ознакою. Враховуючи різноманіття забарвлень насіння різних сортів однієї культури, виникає надзвичайна потреба в їх ідентифікації та систематизації. В зв'язку з тим, що сприйняття кольору для кожної людини є індивідуальним, то виключення людського фактору і застосування інструментальних можливостей розпізнавання забарвлення насіння є дуже актуальним.

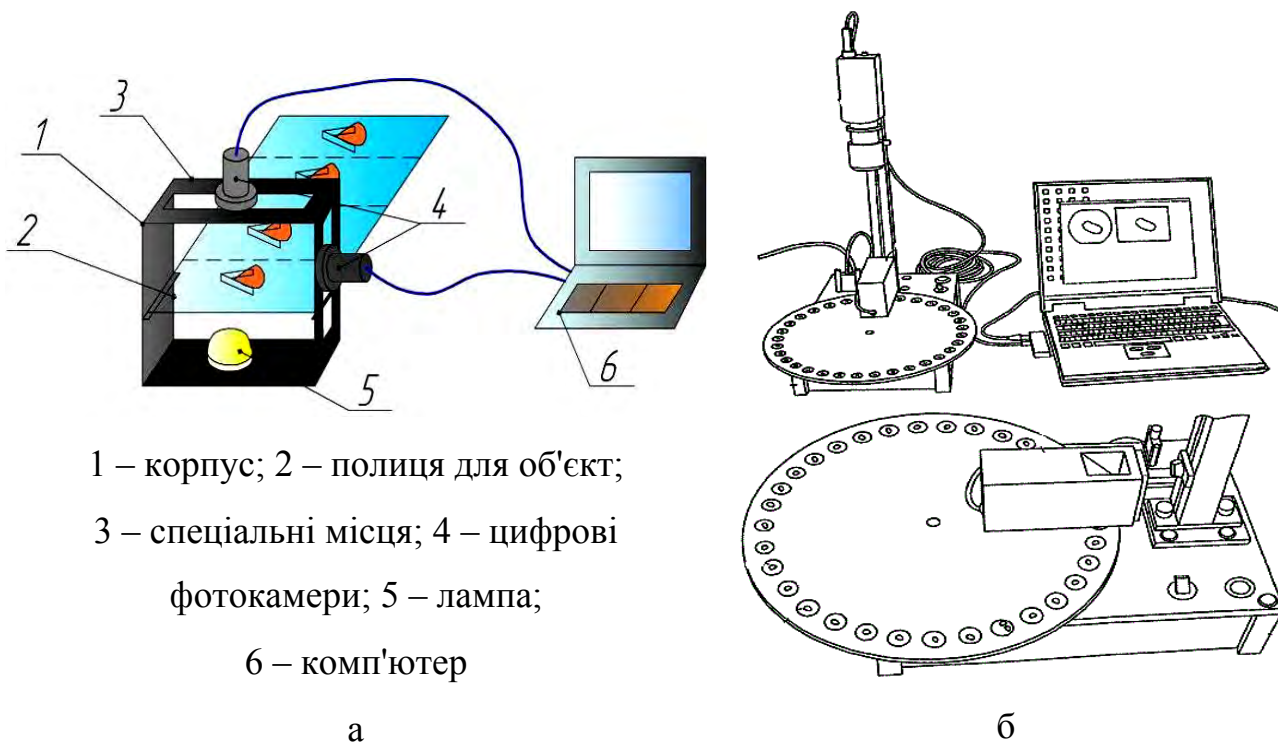
Відомий спосіб визначення розмірів насіння [163], який включає формування вибірки насіння, її сканування і обробку зображення з визначенням дійсних розмірів компонентів вибірки. При цьому обробка зображення виконується за допомогою комп'ютерної програми, яка автоматично розпізнає об'єкт та розбиває його на задану сітку, визначаючи максимальні, мінімальні та середні розміри в міліметрах у двох двовимірних взаємно перпендикулярних площинах. Для реалізації зазначеного способу на корпусі 1 (рисунок 1.17, а) розташовано полицю для об'єкта 2, що досліджується. У спеціальні місця 3 під кутом 90°, один від одного, встановлюються дві цифрові фотокамери 4. Для підвищення якості зображень насіння, що розташовуються в одному напрямку на полиці 2, відбувається їх підсвічування лампою 5. Цифрові фотокамери 4 з'єднано з комп'ютером 6.

Відомий спосіб визначення розмірних характеристик насіння [164] який включає формування вибірки насіння і поштучне вимірювання спеціальними засобами розмірних характеристик кожної насінини, шляхом сканування, перенесення зображення у файл програми «AutoCAD», проставляння в цій програмі умовних їх розмірів, визначення коефіцієнту перерахунку і обчислення дійсних розмірів компонентів вибірки.

Недоліками вищезазначених способів є їх висока трудомісткість, зумовлена необхідністю постійного ручного формування вибірки насіння, а також неможливість автоматичного його розділення за геометричними розмірами і формою. Також недоліком є те, що дані способи дозволяють ідентифікувати насіння лише за двома морфологічними показниками – розмір і форма.

Відомі пристрій (рисунок 1.17, б) і відповідний спосіб визначення однорідності партії насіння за їх характеристиками кольору, розміру й форми [165], який включає поетапне виконання наступних операцій: кожне насіння поміщають в задану зону, що має колір з довжиною хвилі, відмінною від довжини хвилі, що характеризує колір насіння; приводять кожну задану зону в положення, що забезпечує можливість її зйомки з отриманням її цифрового зображення в кольорі; висвітлюють задану зону видимим світлом під час отримання її цифрового зображення; знімають камерою задану зону з отриманням її цифрового зображення; зображення обробляють з отриманням значень колірного тону, а при необхідності – і насиченості, колірної моделі HSI (колірний відтінок, насиченість та інтенсивність, скор. від англ. "Hue, Saturation, Intensity") для розпізнавання об'єктів, розташованих в межах заданої зони, переважно дискретних об'єктів, що виконується в кожній заданій зоні шляхом сегментації; для кожного об'єкта визначають розмір, форму і колір на основі колірного тону, а при необхідності – і насиченості, колірної моделі HSI шляхом виділення ознак; щодо кожного об'єкта визначають, чи відповідає він заданому для насіння діапазону розмірів чи діапазону кольору або діапазону форм; для кожного об'єкта, що відповідає критеріям, визначають фактичні розмір, форму, колірний розподіл і колір на

основі колірного тону, а при необхідності – і насиченості, і виводять звіт щодо кольору, колірного розподілу, фактичного розміру і форми насіння в партії із забезпеченням показника однорідності партії.



а – Патент на корисну модель UA 101069 U [163]; б – Патент RU 2388203 [165]

Рисунок 1.17 – Конструктивно-технологічна схема пристроїв для визначення геометричних розмірів і забарвлення насіння

До недоліків відомого способу слід віднести трудомісткість підбору довжини хвилі електромагнітного випромінювання, не висока точність визначення розміру, форми і кольору партії насіння через вибір колірної моделі HSI, відсутність можливості автоматичного виділення і розділення окремих насінин з загальної партії за вищезазначеними морфологічними показниками.

1.5 Аналіз основних морфологічних показників і фізико-механічних властивостей насінневої суміші соняшнику

Вплив морфологічних показників насінневого матеріалу соняшнику на його фізико-механічні властивості (рисунок 1.18) дадуть можливість створити відповідну базу даних і провести систематизацію насіння ряду сортів. На

основі виявлення характерних морфологічних показників для кожного сорту або гібриду соняшнику, за якими здійснюється процес очищення та розділення, можна розробити новітні технології і технічні засоби для здійснення вище зазначених процесів [166].

До компонентів насінневої суміші, окрім насінневого матеріалу, відносять наступні домішки: технологічні (каміння, частки ґрунту, пил та ін.), рослинні (уламки стеблин, шматки соломи, частки листя та ін.), насіння інших культур, насіння бур'янів, пошкоджене насіння (розламане, відбите, облущене та ін.). Для насінневої суміші соняшнику частіше присутнім є насіння культурних рослин – суданська трава, льон кудряш, пшениця м'яка озима, ячмінь ярий та ін.; насіння бур'янів – гречка витка березовидна, лобода біла, щириця звичайна, півняче просо, паслін чорний, мишій сизий, капустяні, гумай, гірчак рожевий та ін. [167, 168, 169, 170].

Для видового визначення насіння і плодів культурних рослин і бур'янів використовуються зовнішні морфологічні ознаки. Одні з них (контур, форма, поверхня) є стійкими; інші (забарвлення, розміри) можуть змінюватися.

При визначенні насіння приймається наступна послідовність основних морфологічних ознак.

Контур насіння (плоду) дає перше уявлення про їх форму і є найбільш стійкою характерною ознакою. Контур може бути округлим, яйцеподібним, овальним, ниркоподібним, серцеподібним, трикутним, прямокутним, веретеновидним, булавовидним і т. п. Визначається двома вимірами – довжиною і шириною. Залежно від того, з якого боку його розглядати, насіння або плід у більшості видів бур'янів може мати кілька різних контурів. Лише правильно округла форма з усіх боків округляє контур. Тому характеристику контуру насіння (плодів) дають в проекції з широкої сторони їх на площині. В інших випадках робиться застереження: контур з боку спинки, черевця або збоку.

Форма (таблиця Б.1) визначається трьома вимірами – довжиною, шириною і товщиною.

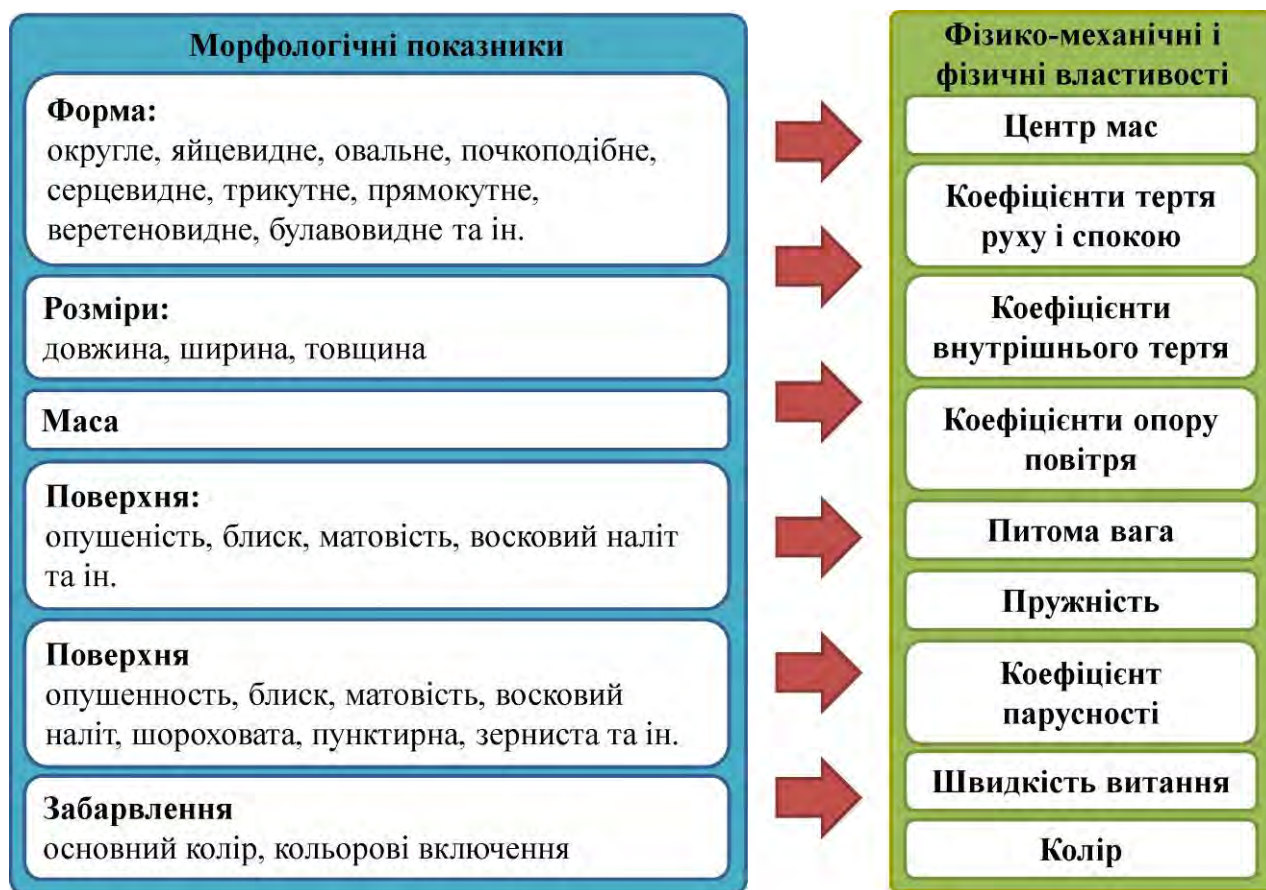


Рисунок 1.18 – Зв'язок морфологічних та фізико-механічних властивостей насінневого матеріалу соняшнику

Довжиною в ботанічному визначенні вважається відстань від основи насіння до його вершини; шириною – відстань між бічними сторонами, тобто вимір ширини буде перпендикулярно до довжини. У звичайному понятті довжина – найбільший, ширина – середній, товщина – найменший розмір.

Зовнішня структура насінневих і плодових оболонок надзвичайно різноманітна. Основні структурні ознаки поверхні насіння бур'янів і культурних рослин є стійкими. Вони часто доповнюються опушенням, блиском, матовістю, восковим нальотом, які в процесі зберігання насіння можуть втрачатися. Різноманітність поверхні насіння бур'янів і культурних рослин зводиться до наступних основних типів.

Безструктурна поверхня може бути блискучою, матовою (тьмяною), голою і опушеною. Блискуча поверхня насіння обумовлена будовою їх

оболонки, яка відображає світлові промені. Блиск часто залежить від ступеня зрілості насіння, він є і показником свіжості. При тривалому зберіганні з підвищеною вологістю блиск втрачається і поверхня насіння стає тьмяною. Матова поверхня обумовлена не відображенням, а поглинанням променів і здається шорсткою. Гола поверхня позбавлена будь-яких виростів. Опушена – на противагу голої поверхні – відрізняється розвитком клітин покриву насінневих оболонок з утворенням волосків різної довжини і густоти. Залежно від будови волосків опушення може бути м'яким або жорстким. Волоски можуть розташовуватися густо або рідко, бути довгими або короткими, легко стиратися або бути стійкими.

Тонкоструктурна поверхня. Гладка – позбавлена будь-яких нерівностей. Шорстка – утворюється дрібними, мало помітні навіть при збільшенні (лупою), густо розташованими і слабопомітними шипиками, борозенками, горбками, що зливаються в загальну структуру поверхні. Точкова – більш-менш гладка поверхня, покрита чітко помітними точково-горбкуватими або точково-втиснутими утвореннями. Пунктирна – має ясно виражені пунктирні лінії, найчастіше розташовані від заснування насіння до його вершині. Зерниста – характеризується дуже невеликими блискучими точками, що зливаються в загальну точково-блискучу поверхню.

Грубоструктурна поверхня. Ямчата – утворюється заглибленнями в поверхні різної глибини, форми і величини. Часто ямки бувають утворені взаємно пересічними зморшками. Сітчасто-чарункова – є чіткий сітчастий малюнок. Осередки можуть розташовуватися в певному порядку або безладді. Зморшкувата – утворюється виступаючими різними за формою і величини зморшками. Розташування зморшок на поверхні насіння і плодів носить зазвичай безладний характер. Борозниста – утворена борознами, являє подовжені поглиблення на гладкій поверхні. Величина, форма, розташування, глибина і ширина борозен різноманітні. Горбкувата – поверхня насіння або плодів покрита різноманітними за формою і величиною горбками. Характер

горбкуватої поверхні обумовлюється і розміром самого насіння і плодів. В розташуванні горбків часто відзначається певна правильність – вони утворює паралельні ряди або концентричні кола. Ребриста – поверхня, на якій виявлені ребра. Вони можуть бути вузькі або широкі, сильно виступаючі або слабо виражені, тупі або гострі, гладкі або покриті зубчиками, шипиками або щетинками. Жилкувата – характерна переважно для насіння злакових бур'янистих рослин. Жилкування виражено різному – від яскраво вираженого до неявно вираженого, ледь помітного. Шипувата – покрита загостреними шипами або колючками. Шипи можуть бути різної величини і різного походження, розташовуватися на гладкій поверхні або по ребрах. Поверхня вважається шипуватою, якщо на ній розташовується велика кількість шипів або колючок.

Забарвлення. Насіння різняться між собою за кольором і за характером забарвлення. Кольори, в які забарвлені насіння і плоди, різноманітні – від білого до чорного з усіма перехідними тонами і відтінками. Типовою вважається забарвлення зрілих насіння і плодів. Вона може бути одноколірної, строкатою, плямистої, крапчастий, мармурової і т.п. Характер забарвлення – від слабкого до інтенсивного [171].

Однак навіть у одного виду рослини забарвлення насіння може бути неоднаковою. У злакових бур'янів в межах одного виду забарвлення насіння більш однорідна. Різноманітні за забарвленням насіння дводольних рослин. Пігментні речовини, що визначають забарвлення насіння, змінюються в залежності від зрілості, умов збирання та зберігання. Тому для багатьох видів бур'янів забарвлення їх насіння є слабостійкою характерною ознакою. Найчастіше його використовують для визначення насіння і плодів близьких видів.

За величиною насіння бур'янів і культурних рослин (за ознакою довжини) розподіляються на наступні групи:

– дуже дрібні – не більше 1 мм; дрібні – від 1 до 2 мм;

- середні – від 2 до 4 мм;
- великі – від 4 до 8 мм;
- дуже великі – понад 8 мм.

Величина насіння навіть у одного певного виду – малопостійний показник. Середній розмір не дає уявлення про можливі відхилення в ту або іншу сторону. Більш постійною величиною вважається і відношення між довжиною, шириною і товщиною насіння. При описі насіння вказують їх верхню і нижню межі. Однак і це співвідношення може змінюватися в залежності від ступеня розвитку і дозрівання насіння.

Фізичні та аеродинамічні характеристики насіння можуть сильно впливати на їх переміщення в сепараторах. Знання фізичних характеристик насіння є суттєвим для конструкторів і операторів сільськогосподарських машин. В дослідженнях [172, 173, 174, 175, 176, 177] вивчалися фізичні та аеродинамічні властивості сортів соняшнику в діапазоні вологості від 7 % до 30 % вологості. При зниженні вологості щільність насіння соняшнику знизилася з 561 до 440 кг/м³. Для вивчення аеродинамічних властивостей (швидкість витання і коефіцієнт опору) відношення маси (г) до площі перерізу (см²) насіння розглядалося як індекс К. Швидкість витання насіння зменшувалася зі зменшенням індексу К і вологості. Найвища середня швидкість була при вмісті вологи 30 % для 6,97-7,08 м/с, а найнижча – при вологості 7 % – 5,39-5,46 м/с. Зі зниженням вологості, коефіцієнт опору мав тенденцію до збільшення, так що його значення змінилося з 0,59 до 0,95.

В дослідженнях [178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185] були визначені деякі фізичні властивості насіння соняшнику як функція вмісту вологи в межах 4-22% з використанням стандартних методик. Середня довжина, ширина, товщина, середній геометричний діаметр, еквівалентний діаметр, арифметичний діаметр, сферичність, площа поверхні і кут природного укосу варіювали від 12,14 до 12,57 мм, 5,79 до 6,38 мм, від 3,86 до 4,09 мм, від 6,47 до 6,85 мм, від 6,56 до 6,97 мм, 7,27-7,61 мм, 53,33% до 55,42%, 112,16 до 125,01

мм² і 41-57 ° С, оскільки вміст вологи збільшувався з 4 % до 22 %, відповідно. Маса 1000 насінин збільшилася з 80,3 до 96,8 г, тоді як насипна щільність зменшилася з 410 до 380 кг/м³ і при збільшенні діапазону вологості 4–22 %. Пористість коливалася від 44,59 до 61,22 %. Статичний коефіцієнт тертя насіння соняшнику лінійно збільшувався проти різних поверхонь конструкційних матеріалів, а саме пластику (0,29–0,55), фанери (0,36–0,53), оцинкованого заліза (0,36–0,55), а статичний кут природного укусу збільшувався з 41 ° до 57 °, відповідно при підвищенні вологості з 4 % до 22 %.

1.6 Аналіз наукових досліджень процесів сепарації насіння

Значний внесок у розвиток теоретичних і експериментальних досліджень післязбиральної обробки насіння, зокрема, його очищення, розділення і сепарації внесли такі вітчизняні та зарубіжні вчені, як Тищенко Л. М. [55, 69, 70, 71, 76, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194], Ковріков І. Т. [195, 196, 197, 198, 199], Галкин В. Д. [23, 32, 33, 81, 135, 200, 201, 202, 203, 204], Шевцов І. В. [205, 206, 207], Харченко С. О. [55, 59, 62, 69-71, 77, 189, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221], Заїка П. М. [38-39, 83-84, 85-86, 364, 222, 223], Котов Б.І. [224, 225, 226, 227], Дідух В. Ф. [228, 229, 230, 231], Завгородній О.І. [232, 233, 234, 235, 236], Єрмак В.П. [237, 238], Захаров С. Є. [239], Хессро М. Х. [240, 241, 242], Богомолов О. В. [243, 244, 245, 246, 247, 248], Дондокова Г. Ж. [249, 250, 251], Мілохіна А. В. [252, 253, 254], Перетягин Є. А. [26, 255, 256, 257], Перепелкін М. А. [258, 259], Пріпоров І. Є. [25, 27-30, 66-67, 96, 100, 109, 260, 261], Попов І. Ю. [262, 263], Ісупов В. І. [264, 265], Московський М. М. [266, 267], Шевченко І. А. [18, 19], Шафоростов В. Д. [24-28, 66-67, 96, 100, 255-256, 260], Дринча В. М. [34], Федоренко В. Ф. [22, 35, 43], Макаров П. І. [36], Фадєєв Л. В. [42], Чеботарьов В. П. [43, 45], Саїтов В. Е. [47-53, 89], Войтюк Д. Г. [54, 58, 61], Пивень М. В. [55, 69, 73, 139, 189, 208-210], Пастушенко М. Г. [72, 78], Козлов В. Г. [33, 90-91, 268], Михайлов А. Д. [86, 124], Брутто А. Ф. [269], Сайд Ель Шахат Абдалла Ель Санди [270].

В дослідженнях Тищенка Л. М. [55, 69-71, 76, 186-194] на підставі гідродинамічної аналогії розроблено математичні моделі гармонічних коливань зернових потоків при віброрешітній сепарації зернових сумішей. Досліджено коливання швидкості в плоскому і кільцевому зернових шарах без урахування та з урахуванням поділу суміші на дві фракції. Комп'ютерними розрахунками проілюстровано можливості розроблених математичних моделей.

Дослідженнями [195-199] встановлено, що за допомогою розкритих взаємозв'язків між якісними і експлуатаційними параметрами процесу пневмосепарації і розроблених математичних моделей, достовірно описано рівномірний розподіл зернових об'єктів по площі поперечної сепарації вертикального каналу.

В результаті досліджень [23, 32, 33, 81, 135, 200-204] розроблені математичні моделі зональної технології попереднього очищення насінневої суміші з виділенням і сушінням насіння; математичні моделі оцінок поділу насінневих сумішей з різних ознак, що враховують зміну відносного змісту компонентів в зерновому потоці, що надходить на очистку; математичні моделі робочого процесу універсальної зональної приставки з циліндричним решетом для додаткового відділення дрібних засмічених домішок і недозрілих насінин основної культури.

В роботах [205-207] розроблені математичні моделі і отримані закономірності процесу сепарації на решеті з перемичками кругового перетину, що здійснює коливання в своїй площині по еліптичних траєкторіях з зменшується амплітудою поперечних коливань по довжині решета.

Роботи [55, 59, 62, 69-71, 77, 189, 208-220] були спрямовані на встановлення поля швидкості зернової суміші при просіюванні на плоских та циліндричних віброрешетах, яке дозволяє враховувати вплив параметрів об'ємних та епіциклоїдних активаторів за допомогою розроблених дво- та тривимірних нелінійних гідродинамічних моделей бульбашкових псевдорідин; встановлення функціональні залежності складових швидкості зернової суміші з

періодично-структурними, кінематичними параметрами плоского та циліндричного віброрешіт з активаторами.

В роботах [38-39, 83-84, 85-86, 364] автор обґрунтував механіко-технологічні основи теорії вібраційних зерноочисних машин і вібросепарування зернової суміші: вібраційне переміщення, просіювання насіння через отвори решіт, сегрегація насіння в шарі.

Дослідження в роботах [240-242] спрямовані на встановлення закономірностей процесу сепарації зерна в циліндричному решеті, що здійснює планетарне обертання; отримання залежностей, що визначають конструктивно-режимні параметри циліндричного решета, що здійснює планетарне обертання.

В роботах [243-248] запропоновано і теоретично обґрунтовано нову концепцію енергозберігаючих процесів сепарації, що базується на спрямованій зміні траєкторій переміщення частинок в робочому органі сепаратора. Також в роботах [249-251] встановлені закономірності зміни повноти просіювання різних компонентів через каскадний решітний сепаратор зі ступенчатим зазором в залежності від кількості ярусів решіт.

В результаті досліджень [252-254] визначенні теоретичні залежності для знаходження конструктивних параметрів молотильно-очісуючого ротора, обґрунтуванні раціональні режими роботи роторного сепаратора, отриманні математичні моделі для визначення ступеня виділення і показника сепаруючої здатності.

В роботах авторів [26, 255-257] визначені детерміновані і статистичні математичні моделі процесів системної сепарації суміші насіння соняшнику в зерноочисних машинах і агрегатах, що дозволяють проводити багатовимірну оцінку їх функціонування.

Роботи [258-259] спрямовані на розробку та дослідження роторно-повітряного сепаратора для відділення з суміші соняшнику легких домішок і недозрілого насіння; теоретичне і експериментальне обґрунтування параметрів роторно-повітряної системи з урахуванням аеродинамічних властивостей і

геометричних характеристик суміші соняшнику. Також у роботах [] встановлені математичні вирази для визначення траєкторій переміщення компонентів суміші насіння великоплідного соняшнику в вертикальному пневматичному каналі.

Новизна досліджень [262-263] полягає в удосконаленні технологічного процесу очищення суміші соняшнику застосуванням решета з регульованими отворами і гофрами, теоретичним обґрунтуванням закономірностей вмісту засмічених домішок в проході суміші через решето і насіння в сході від його конструктивних і режимних параметрів. В роботах [264-265] виведено математичну залежність для розрахунку амплітуди коливань заслінки-вібратора при зміні її довжини і ступеня відкриття, кута установки обмежувача і основних конструктивних параметрів валика пневматичного сепаратора.

Авторами робіт [266, 267] виявлено нові закономірності зміни технологічних показників функціонування різних зерноочисних агрегатів при широкій варіації технологічних властивостей вихідного зернового матеріалу і їх подач в агрегати. В роботі [270] побудовані статистичні математичні моделі процесу сепарації суміші насіння соняшнику на окремих неоднорідних решетах і їх підсистемах і знайдені закономірності відносного переміщення компонентів суміші насіння соняшнику по решетам.

Аналіз літературних джерел і світових наукових досліджень показав, що необхідно розробити такі математичні моделі прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику, які є основою створення алгоритмів автоматизованого керування відповідних механізованих технологічних процесів.

1.7 Висновки з розділу. Мета і задачі досліджень

На підставі проведеного аналізу техніко-технологічного забезпечення процесів сепарації насінневого матеріалу можна зробити наступні **висновки**:

1. В результаті аналізу встановлено, селекційний процес в насінництві олійних культур висуває особливі вимоги до виконання технологічних операцій

очищення, розділення і сепарації насінневого матеріалу: сортова чистота насінневого матеріалу повинна становити для елітного насіння (еліта, супереліта) – 98,0-99,9 %; в процесі збирання та очищення безповоротні втрати не повинні перевищувати 1,5 % для базового насінництва та 0,1 % – для добазового; технічні засоби для виконання технологічних операцій очищення, розділення і сепарації насінневого матеріалу повинні повністю очищатися від генетичного матеріалу попереднього доопрацювання; машини повинні мати високу виборчу продуктивність, систему автоматизованого управління і контролю якості роботи; технологічне обладнання повинно бути екологічно безпечним як для персоналу, так і для навколишнього середовища.

2. Виходячи з необхідних вимог до технологічних процесів очищення та розділення насінневої суміші запропонована раціональна прецизійна технологічна схема лінії процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику для всіх ланок селекційно-генетичного процесу, яка включає автоматизацію технічних засобів. Ефективність селекційного процесу соняшнику на стадії систематизації визначається, головним чином, пристроєм для автоматичного фенотипування насіння, яке дозволяє значно інтенсифікувати і скоротити за часом цей процес за рахунок біоінформативного аналізу даних. Таким чином, пристрій для фенотипування насіння може служити основою для розробки інформаційно-аналітичного програмного комплексу селекціонера.

3. В результаті аналізу технологічних способів сепарації насінневого матеріалу соняшнику і їх технічного забезпечення встановлено, що основними тенденціями розвитку прецизійних насіннеочисних технічних засобів є створення адаптивних систем їх керування, які дозволяють проводити динамічну оптимізація режимів роботи робочих органів без втручання операторів.

4. Аналіз літературних джерел і світових досліджень основних морфологічних показників і фізико-механічних властивостей насінневої суміші

соняшнику показав, що необхідно більш детально їх дослідити у власних дослідженнях задля визначення їх природи.

5. Аналіз літературних джерел і світових наукових досліджень показав, що необхідно розробити такі математичні моделі прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику, які є основою створення алгоритмів автоматизованого керування відповідних механізованих технологічних процесів.

Як **гіпотезу** приймаємо припущення про те, що прецизійність цільового поділу та відбору насінневого матеріалу соняшнику за його морфологічними показниками і фізико-механічними властивостями визначає ефективність його використання в подальшому селекційно-насінницькому процесі.

Для досягнення поставленої мети необхідно рішення наступних **завдань**:

– розробити прецизійну технологічну лінію процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику на основі вимог до його якості та аналізу відповідного техніко-технологічного забезпечення;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями під дією повітряного потоку на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– створити експериментальний зразок адаптивної системи керування аеродинамічним сепаратором з раціонально узгодженими режимними параметрами;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами під дією вібруючого решета на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– створити експериментальний зразок адаптивної системи керування віброрешітним сепаратором з раціонально узгодженими режимними параметрами;

– розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою під дією віброуючої поверхні на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– створити експериментальний зразок адаптивної системи керування вібропневматичним сепаратором з раціонально узгодженими режимними параметрами;

– розробити фізико-математичну модель технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за забарвленням поверхні сім'янок на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;

– створити експериментальний зразок фотоелектронного сепаратора з раціонально узгодженими режимними параметрами;

– розробити структурну модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння соняшнику;

– створити експериментальний зразок пристрою для автоматичного фенотипування насіння та обґрунтувати його раціональні конструктивно-режимні параметри;

– дослідити фактори інтенсифікації селекційного процесу соняшнику, провести експериментальну перевірку і визначити техніко-економічну ефективність застосування результатів досліджень.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [271, 272, 273, 274].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ СОНЯШНИКУ

2.1 Модель впливу агротехнологічних і техніко-технологічних параметрів на насіннєву суміш

Представимо насіннєву суміш у вигляді об'єкта, стан якого визначається набором вхідних і вихідних параметрів. Всі впливові на насіннєву суміш фактори можуть бути віднесені до зовнішніх або внутрішніх. Їх зміна на попередній стадії впливу дозволить, в свою чергу, змінити їх у наступній стадії. Параметри стану об'єкта будемо розглядати, як внутрішні чинники. А будь-які дії на насіннєву суміш розглядаємо, як зовнішні чинники.

Модель впливів на об'єкт (насіннєву суміш) представлена на рисунку 2.1 і містить три групи входів, що впливають, і дві групи виходів.



Рисунок 2.1 – Модель впливів на об'єкт (насіннєву суміш)

Одна з груп входів X характеризується n-мірним вектором

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

частково керованих впливів (селекція, підготовка ґрунту, післяпосівна обробка та ін.).

Інша група входів Y характеризується m -мірним вектором випадкових некерованих впливів (погода, температура, механічні пошкодження під час збирання та ін.)

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m). \quad (2.2)$$

Третя група входів Z характеризується e -мірним вектором керованих фізичних впливів (всі види сепарації)

$$Z = (z_1, z_2, \dots, z_e). \quad (2.3)$$

Інформація на вході системи

$$L = f(X, Y, Z) \quad (2.4)$$

є скалярною величиною, що характеризує якість насінневого матеріалу (чистий вихід продукції).

Крім виходу L стан об'єкта U описується деяким k -мірним вектором діагностичних параметрів

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_k), \quad (2.5)$$

які можуть змінювати її та залежать від X, Y, Z і деякого вектора H

$$H = (h_1, h_2, \dots, h_e), \quad (2.6)$$

який, в свою чергу, є вектором похибки вимірювань. Таким чином можна записати, що

$$U = f(X, Y, Z, H). \quad (2.7)$$

Значення вектора U , як показника стану об'єкта, повинно знаходитися в деяких межах

$$U_s(X, Y, Z, H) \leq U_s', \quad (2.8)$$

де $s = 1, 2, \dots, p$;

U_s' – допустима межа s -го параметра. Нерівністю (2.8) задається область допустимих параметрів об'єкта, межі якого залежать від X, Y, Z, H .

Із запропонованої моделі чітко видно, що реально вплинути на насінневу суміш з метою отримання якісного насінневого матеріалу можна тільки за допомогою фізично керованих впливів (Z). Дією як некерованих (Y) так і частково керованих (X) впливів можна знехтувати, оскільки визначати якісний

склад вже зібраної насінневої суміші вони не можуть. Фізично керовані впливи ґрунтуються на достовірній інформації про стан (якість) об'єкта, яка, в свою чергу, базується на діагностичних параметрах (U).

Ці параметри діляться на п'ять груп.

Ботаніко-фізіологічні. До цих показників якості насінневого матеріалу відносяться: культура (рід рослини), її вид, форма (озима або яра); сорт, морфолого-анатомічні особливості, колір, схожість й енергія проростання. Одні з них визначаються при огляді (культура, колір, іноді вид), – інші за документами (форма, сорт). Для характеристики анатомічної будови, схожості і енергії проростання необхідно провести лабораторний аналіз.

Органолептичні. Відносяться показники якості насіння (колір, запах, смак), що визначаються за допомогою органів почуттів. Вони є показниками свіжості насіння, повноцінності споживчих речовин.

Фізико-механічні властивості насінневого матеріалу мають велике значення для їх зберігання і переробки. Ці властивості лежать в основі методів визначення якості, прийомів переміщення, очищення і переробки насінневого матеріалу. До фізичних властивостей насіння відносяться: форма зернівки, лінійні розміри і крупність, об'єм, виповненість і щуплість, маса 1000 насінин, скловидність, щільність, плівчастість і лущинність, об'ємна маса, механічні пошкодження насіння, тріщинуватість, механічні властивості, аеродинамічні властивості, зараженість шкідниками, засміченість.

До *хімічних показників якості* насінневого матеріалу відносять: вологість, зольність, кількість білкових речовин, кислотність, зміст і якість клейковини.

При *технологічній оцінці якості* насінневого матеріалу необхідно враховувати вимоги, що пред'являються до насіння і продуктів його переробки [275].

Розглянемо більш детально вектор керованих фізичних впливів (всі види сепарації) Z. Після кожної сепарації фізико-механічні і морфологічні властивості насінневої суміші змінюються. Ввівши відповідні позначення зміну

стану насінневої суміші можна визначити за допомогою матриць перетворення (рисунки 1.3–1.5):

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} W_{st.0} \\ W_{0} \\ \zeta_{st.0} \end{pmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \begin{pmatrix} W_{st.1} \\ W_{0} \\ \zeta_{st.0} \end{pmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow W_{0,} \begin{pmatrix} \chi_0 & \Theta_0(D) \\ \xi_0 & \Theta_0(\rho) \\ \Theta_0(C) & \Theta_0(V_a) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow \\ & \rightarrow \dots \rightarrow W_i, \begin{pmatrix} \chi_i & \Theta_i(D) \\ \xi_i & \Theta_i(\rho) \\ \Theta_i(C) & \Theta_i(V_a) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \rightarrow W_f, \begin{pmatrix} \chi_f & \Theta_f(D) \\ \xi_f & \Theta_f(\rho) \\ \Theta_f(C) & \Theta_f(V_a) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де 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 масою ρ , %;

$\Theta(C)$ – фракційний склад за забарвленням сім'янок C – RGB або C – HSV, %;

індекси 0, i , f – початковий, проміжний і кінцевий стан насінневої суміші;

індекс st – стеблова частина;

ζ – коефіцієнт солемистості, %.

Система автоматизованого, i , як наслідок, адаптивного управління на основі отриманих діагностичних параметрів U стану насінневої суміші дозволяє змінювати конструктивно-режимні параметри обладнання (рисунки 1.3–1.5). Однак, для здійснення зазначеного управління необхідно вдосконалити конструкції відомого обладнання або розробити нове обладнання, яке визначає найбільш слабкі ланки системи. Розроблена адаптивна система управління дозволяє змінювати наступні конструктивно-технологічні параметри обладнання. Для адаптивного аеродинамічного сепаратора – подача насіння Q , кг/год; швидкість повітря V , м/с. Для адаптивного віброрешітного сепаратора – подача насіння Q , кг/год; кут нахилу решета α , °; частота коливань решета ψ , s^{-1} ; амплітуда коливань решета A , м. Для адаптивного вібропневматичного

сепаратора – подача насіння Q , кг/год; швидкість повітря V , м/с; кути нахилу поверхні α і β , °; частота коливань поверхні ψ , s^{-1} ; амплітуда коливань поверхні A , м. Для фотоелектронного сепаратора – подача насіння Q , кг/год; частота коливань вібралотка ψ , s^{-1} ; n – частота обертання барабана, об/хв; Δt – часова затримка спрацьовування форсунки, мс; λ – чутливість фотодатчика, %.

2.2 Фізико-математична модель процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями

2.2.1 Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці

Розділення насіння за щільністю (питомій вазі) проводиться із попереднім його калібруванням за геометричними розмірами. В іншому випадку з'являється дві змінні: парусність і щільність. Очевидно, що при однаковій щільності насіння, насінина меншої маси під впливом повітряного потоку летить далі, а насінина більшої маси – ближче. Крім того, в залежності від орієнтації насінини до вектору швидкості повітряного потоку з'являється діапазон парусності, що призводить до випадкової траєкторії руху насінини. Звичайно, при тривалому впливі повітряного потоку насіння займе найбільш аеродинамічне положення при якому спостерігається найменший опір.

Окрім вище зазначеного, потік повітря повинен мати рівномірну структуру, як за параметрами турбулентності (масштаб і інтенсивність), так і по епюрі швидкості.

Розуміючи всі складнощі поставленого завдання, необхідно дослідити процес переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку.

Як показав аналіз літературних джерел та фахових наукових публікацій [276, 277, 278], дослідженню процесу переміщення насіннєвого матеріалу (гранульованого середовища) під дією повітряного потоку присвячено багато теорій та методик розрахунку координатних положень насіння. В основу цих досліджень покладено фізико-математичний апарат переміщення матеріальної

точки під дією різноманітних сил, що не враховує взаємодію насіння між собою, які мають випадкове початкове положення. Задача взаємодію потоку насіння з повітряним потоком відноситься до класичної задачі газодинаміки двофазних потоків.

Для дослідження процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку необхідно визначити математичний апарат, який дозволить отримати траєкторії, діаграми сил і величини ковзання при русі насіння в потоці повітря з градієнтом швидкості.

Запишемо систему диференціальних рівнянь руху однієї насінини в заданій області швидкостей потоку повітря [279]:

$$\begin{cases} \Omega_p \cdot \rho_p \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \bar{F}, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \bar{\nabla}, \end{cases} \quad (2.10)$$

де Ω_p – об'єм насінини, м³;

ρ_p – щільність насінини, кг/м³;

\bar{V}_p – вектор швидкості руху насінини, м/с;

\bar{S}_p – вектор переміщення насінини, м;

\bar{F} – вектор результуючої сили, що діє на насінину, Н.

Форма насіння має свої характерні особливості для кожної культури і визначається співвідношеннями довжини, ширини і товщини. Насіння деяких культур близькі до еліпсоїда, деякі – мають чечевицеподібну, подовжену або конусоподібну форму. Для характеристики форми насіння відомі поняття «коефіцієнт форми» і «показник сферичності». Коефіцієнт форми – це відношення площі поверхні насіння до поверхні еквівалентної кулі, об'єм якої дорівнює об'єму насіння. Показник сферичності – це відношення площі поверхні рівновеликої за об'ємом кулі до площі зовнішньої поверхні насіння.

При проведенні оцінки геометричних параметрів насіння соняшнику, було помічено, що їх форма близька до еліпсоїда. Ще однією характеристикою насіння є її ефективний діаметр, який визначається, як діаметр рівновеликої за об'ємом кулі. Тому об'єм еквівалентного еліпсоїда визначається за формулою:

$$\Omega_p = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c = \frac{\pi \cdot D_p^3}{6}, \quad (2.11)$$

де a, b, c – піввісі еліпсоїда, м;

D_p – ефективний діаметр насінини, м.

З рівняння (2.11) отримуємо:

$$D_p = 2(a \cdot b \cdot c)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.12)$$

Процес вирішення системи рівнянь (2.10) аналітичними способами є досить складним:

а) загальне число сил, що діють на насінину в повітряному потоці, є невизначеним, оскільки не до кінця описані процеси, що визначають поведінку насінини в потоці;

б) аналітичні вирази для деяких сил правої частини рівняння (2.10) невідомі (наприклад, вираз для гідродинамічної сили повітря).

Сили, що діють на насінину при її русі в турбулентному потоці повітря, на підставі причин, що викликають їх появу, можна розділити на наступні групи [280, 281]:

1. Сила тяжіння [282]:

$$\overline{F}_g = \Omega_p \rho_p \overline{g}, \quad (2.13)$$

де \overline{F}_g – вектор сили тяжіння, Н.

2. Сила Архімеда [282]:

$$\overline{F}_A = \Omega_p \rho_a \overline{g}, \quad (2.14)$$

де \overline{F}_A – вектор сили Архімеда, Н;

ρ_a – щільність повітря, кг/м^3 .

3. Зусилля, що зумовлена зміною тиску в напрямку руху несучого потоку за рахунок його прискорення [279, 283]:

$$\overline{F}_{ac} = \Omega_p \rho_a \frac{d_a \overline{V}_a}{dt}, \quad \frac{d_a}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \overline{V}_a \cdot \nabla, \quad (2.15)$$

де \overline{F}_{ac} – зусилля, що зумовлене зміною тиску, Н;

\overline{V}_a – вектор швидкості руху повітря, м/с.

4. Зусилля в'язкого опору, що виникає при русі насінини з деякою відносною швидкістю в повітряному потоці [284, 285]:

$$\overline{F}_D = \frac{1}{2} \pi D_p^2 \rho_a f_M(\text{Re}) (\overline{V}_a - \overline{V}_p) |\overline{V}_a - \overline{V}_p|, \quad (2.16)$$

де \overline{F}_D – зусилля в'язкого опору, Н;

$f_M(\text{Re})$ – коефіцієнт в'язкого опору.

5. Сила, еквівалентна впливу приєднаної маси представляється як

$$\overline{F}_m = \frac{1}{2} \Omega_p \rho_a \frac{d}{dt} (\overline{V}_a - \overline{V}_p), \quad (2.17)$$

і виражає собою зростаючу інерційність насінини при нестационарному її русі [284, 286, 287]. Помірне збільшення маси насінини походить від інерційності елементів середовища, яким насінини при своєму русі повинні додати додаткове прискорення. Цей додатковий рух середовища еквівалентно руху деякої фіктивної маси (приєднаної маси), яка рухається з тією ж відносною швидкістю, що і насінини.

7. Сумарна сила контактної взаємодії насінин між собою і стінкою, яка базується на пружино-демпферній контактній моделі Герца-Міндліна [288, 289, 290]:

$$\overline{F}_{\text{contact}} = \overline{F}_n + \overline{F}_t, \quad (2.18)$$

де $\overline{F}_{\text{contact}}$ – зусилля взаємодії між насінинами і стінкою, Н;

\overline{F}_n – нормальна складова зусилля, Н;

\overline{F}_t – тангенціальна складова зусилля, Н.

Нормальна складова сили визначається наступним рівнянням:

$$\bar{F}_n = -K_n \bar{d}_n - N_n \bar{V}_n; \quad (2.19)$$

де K_n – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с²;

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}; \quad (2.20)$$

N_n – нормальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{n \text{ damp}}. \quad (2.21)$$

Згідно досліджень [288, 289] тангенціальна складова сили визначається, як

$$\bar{F}_t = -K_t \bar{d}_t - N_t \bar{V}_t \quad (2.22)$$

якщо $|K_t \bar{d}_t| < |K_n \bar{d}_n| C_{fs}$, де C_{fs} – статистичний коефіцієнт тертя між насінинами, або стінкою. В іншому випадку тангенціальна складова сили визначається наступним рівнянням:

$$\bar{F}_t = \frac{|K_n \bar{d}_n| C_{fs} \bar{d}_t}{|\bar{d}_t|}; \quad (2.23)$$

де K_t – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с²;

$$K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_t R_{eq}}; \quad (2.24)$$

N_t – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферної складової, кг/с;

$$N_t = \sqrt{(5K_t M_{eq})} N_{t \text{ damp}}; \quad (2.25)$$

N_{damp} – коефіцієнт загасання

$$N_{damp} = \frac{-\ln(C_{n \text{ rest}})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}}; \quad (2.26)$$

R_{eq} – еквівалентний радіус двох насінин А і В, м;

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{2}{D_A} + \frac{2}{D_B}}; \quad (2.27)$$

M_{eq} – еквівалентна маса двох насінин А і В, кг;

$$M_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}; \quad (2.28)$$

E_{eq} – еквівалентний модуль Юнга двох насінин А і В, Па;

$$E_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1-v_A^2}{E_A} + \frac{1-v_B^2}{E_B}}; \quad (2.29)$$

G_{eq} – еквівалентний модуль зсуву двох насінин А і В, Па;

$$G_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{2(2-v_A)(1+v_A)}{E_A} + \frac{2(2-v_B)(1+v_B)}{E_B}}; \quad (2.30)$$

M_A, M_B – маси насінин А і В, кг;

d_n, d_t – віртуальне перекриття насінин А і В в нормальному і тангенціальному напрямках, м [289];

D_A, D_B – ефективні діаметри насінин А і В, м;

E_A, E_B – модулі Юнга насінин А і В, Па;

ν_A, ν_B – коефіцієнти Пуассона насінин А і В;

\bar{V}_n, \bar{V}_t – нормальний і тангенціальний компонент відносної швидкості поверхні насінини в точці контакту, м/с;

Для процесу взаємодії насінин зі стінкою залежності (2.18)–(2.30) є адекватними, однак для стінки приймається радіус $D_{\text{wall}} = \infty$ і маса стінки $M_{\text{wall}} = \infty$. В результаті вирази (2.27)–(2.28) перетворюються в

$$\begin{aligned} R_{\text{eq}} &= D_p/2, \\ M_{\text{eq}} &= M_p. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для подальших досліджень кінематичних і динамічних характеристик насінини при русі її в повітряному потоці приймаємо наступні припущення.

1. Насінини – жорсткі еліпсоїди із визначеним ефективним діаметром, які не відрізняються одне від одного.

2. Відсутній теплообмін між насінням і середовищем.

3. За несучий потік приймається повітряний потік, що стаціонарно рухається у зазначеній області при ізотермічних умовах.

Підставляючи (2.13)-(2.31) в (2.10) маємо систему диференціальних рівняння руху насінини в повітряному потоці:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \bar{g} + \frac{\rho_a}{\rho_p} \bar{g} + \frac{\rho_a}{\rho_p} \frac{d_a \bar{V}_a}{dt} + \frac{\rho_a}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (\bar{V}_a - \bar{V}_p) + \\ + \frac{\pi D_p^2 \rho_a f_M(\text{Re})}{2\Omega_p \cdot \rho_p} (\bar{V}_a - \bar{V}_p) |\bar{V}_a - \bar{V}_p| + \frac{\bar{F}_{\text{contact}}}{\Omega_p \cdot \rho_p}, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \bar{\nabla}, \\ \bar{F}_{\text{contact}} = \begin{cases} \bar{F}_n + \bar{F}_t, & \bar{S}_{pA} = \bar{S}_{pB}, \\ 0, & \bar{S}_{pA} \neq \bar{S}_{pB}. \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Рішенням системи диференціальних рівнянь (2.32) є траєкторія польоту, вектор швидкості і прискорення насіння, що дають змогу визначити місце падіння насінин в залежності від її фізико-механічних і реологічних властивостей.

В результаті теоретичних досліджень складено систему диференціальних рівняння руху насінини соняшнику в повітряному потоці, що дає змогу визначити місце їх падіння в залежності від їх фізико-механічних і реологічних властивостей. Представлена система диференціальних рівнянь покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу.

2.2.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією повітряного потоку

Система диференціальних рівнянь процесу переміщення насіння в повітряному потоці (2.32) в загальному вигляді не вирішується аналітичними методами. Дослідженнями [291, 292, 293, 294, 295] запропоновано вирішення

подібних систем методом кінцевих елементів, який реалізовано при моделюванні в програмному пакеті STAR-CCM+. Сам процес моделювання може здійснюватися за допомогою різних підходів, і в дійсний час їх класифікація включає наступні методи [296]:

- емпіричні;
- аналізу структури потоків матеріалу за допомогою функції розподілення часу перебування часток;
- механіки суцільних середовищ;
- ентропійно-інформаційні;
- статистичні.

Широке розповсюдження серед дослідників отримали наступні типові математичні моделі структури потоку матеріалу: моделі ідеального витиснення та ідеального змішування, дифузійна та комбінована моделі [297, 298].

Стратегія комплексного системного аналізу фізико-механічної системи передбачає, на початковому етапі, якісний аналіз. При цьому, для процесу змішування виділяються два рівня ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ:

- сукупність фізико-механічних явищ в елементарному об'ємі (мікрорівень);
- сукупність фізико-механічних явищ в об'ємі всього апарату (макрорівень).

Тому необхідно провести чисельне моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку і визначити його фізико-математичну модель.

При моделюванні процесу методом кінцевих елементів задаються початкові положення, швидкості насінин і повітряного потоку. Потім, виходячи з цих початкових даних заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються зусилля, що діють на кожен насініну в кожній інтервал часу. Для кожної насінини обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізьку часу, результатом якої є початкові дані для

наступного кроку. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: k - ϵ модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії [299, 300, 301]. Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжевих моделей багатофазного середовища. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те що насінини представляються у вигляді однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Були прийняті фізико-механічні властивості насіння: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 200-400 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. 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. Розмір комірки сітки моделювання складав 0,001 м.

Чисельне моделювання процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями було проведено в два етапи.

На першому етапі досліджувалася сепарація насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки), розрахункова схема якого представлена на рисунку 2.2.

Факторами для чисельного моделювання є швидкість подачі повітря V , об'ємна маса ρ_p і ефективний діаметр компонентів насінневої суміші D_p .

Ефективний діаметр насінини соняшнику D_p визначався за формулою (2.12). Згідно досліджень [302] геометричні розміри компонентів насінневої суміші соняшнику складають $2a = 8-15$ мм, $2b = 3-8$ мм, $2c = 2-4$ мм, тоді можна стверджувати, що ефективний діаметр насінини соняшнику D_p змінюється в діапазоні 3–7 мм, а їх об'ємна маса згідно розділу 4.1 може змінюватися в діапазоні 140-260 кг/м³ (щільність 200-400 кг/м³). Потік маси

насіннєвої суміші соняшника був представлений 7 фракціями однаковою кількістю з однаковим ефективним діаметром і об'ємною масою в діапазоні $140\text{-}260\text{ кг/м}^3$ (щільність $200\text{-}400\text{ кг/м}^3$).

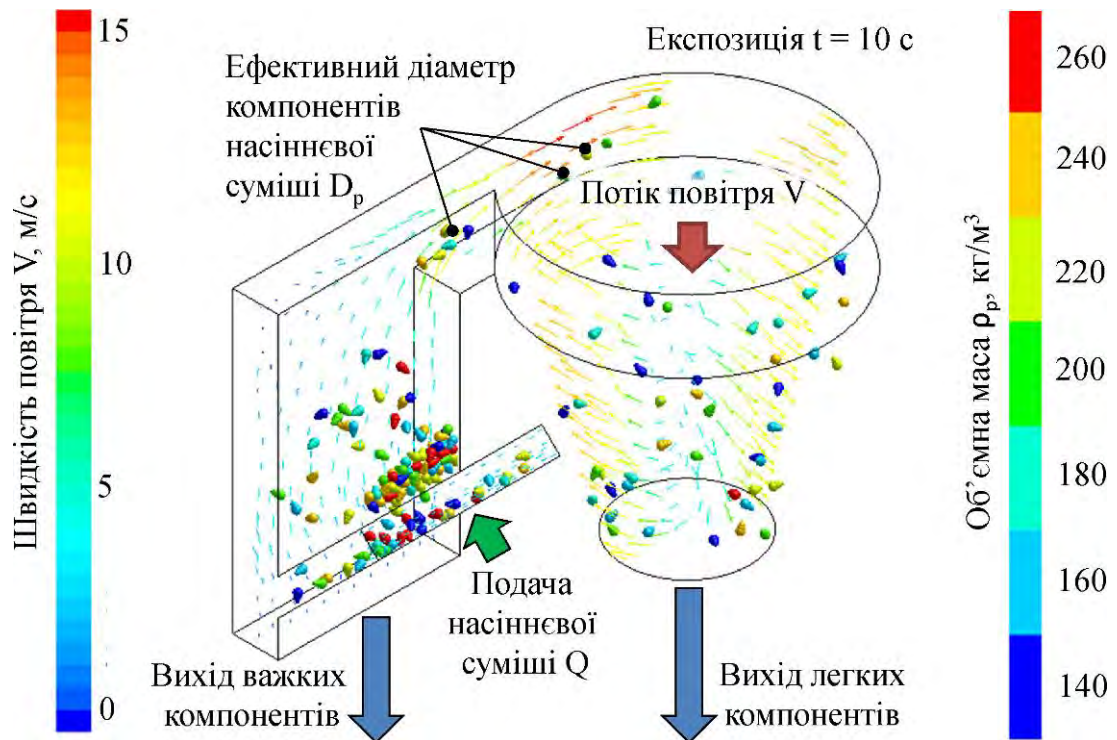


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема процесу сепарації насіннєвої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – 24, матриця якого представлена в таблиці В.1.

В якості критерію оцінки якості процесу сепарації було прийнято масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів – $\xi(\rho)$. В результаті обробки даних необхідно встановити залежності концентрації компонентів певної об'ємної маси $\xi(\rho)$ і безпосередньо об'ємної маси важких ρ_h і легких ρ_l компонентів від факторів чисельного моделювання.

Для реалізації другого етапу чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення падаючого насіння під дією повітряного потоку (рисунок 2.3).

За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні технологічні параметри: ефективний діаметр насінини D_p , швидкість подачі повітря V , подача насіння Q (межі варіювання представлені в таблиці 2.1).

Таблиця 2.1 – Рівні та інтервали варіацій факторами чисельного моделювання процесу переміщення насіння в повітряному потоці

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Ефективний діаметр насіння D_p , мм (x_1)	Подача насіння Q , т/год (x_2)	Швидкість повітря V , м/с (x_3)
Верхній рівень (+)	7	3	15
Основний рівень (0)	5	2	10
Нижній рівень (-)	3	1	5
Інтервал варіацій факторів	2	1	5

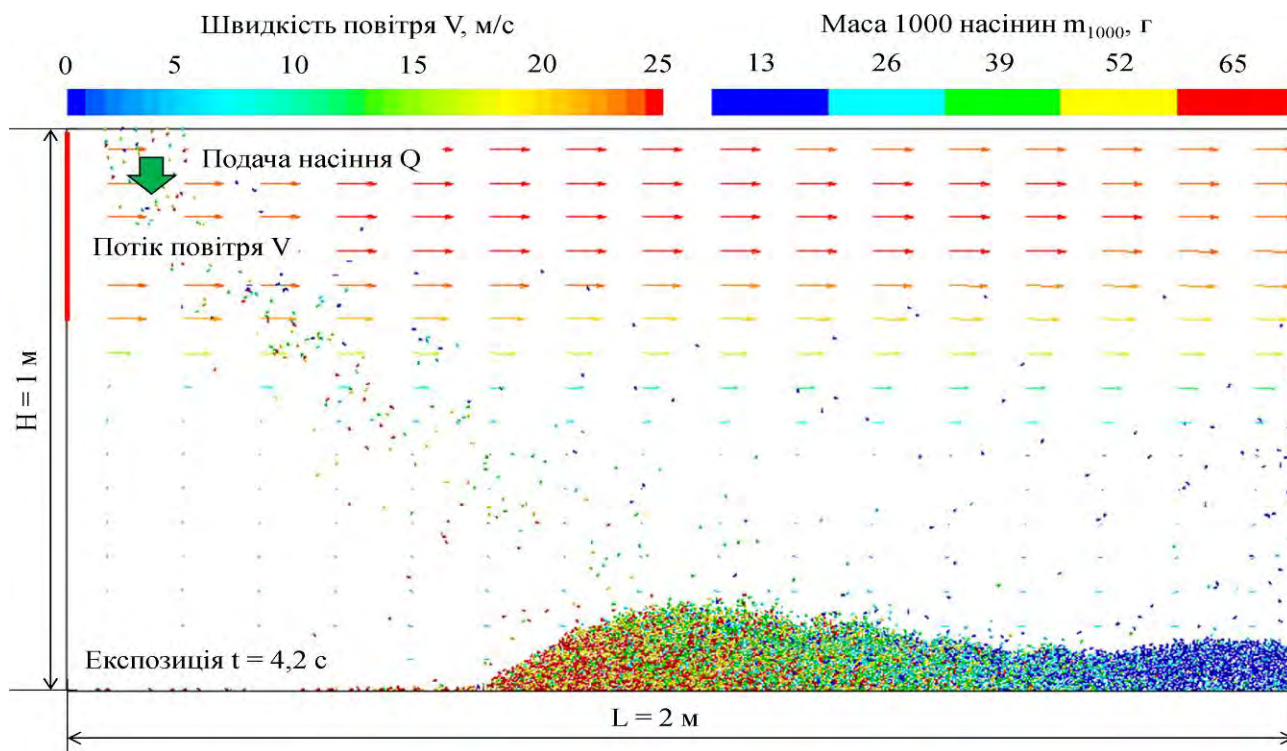


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема процесу переміщення падаючого насіння під дією повітряного потоку

Ефективний діаметр насінини соняшнику D_p визначався за формулою (2.12). Згідно досліджень [302] ефективний діаметр насінини соняшнику D_p змінюється в діапазоні 3–7 мм. В зв'язку з тим, що насіння можуть бути

виконані, неповністю виконані і пусті, то згідно досліджень [302] їх щільність може змінюватися в діапазоні 200-400 кг/м³ (об'ємна маса 140-260 кг/м³). Потік маси насіння був представлений 5 фракціями насіння однакової кількості з однаковим ефективним діаметром і щільністю в діапазоні 200-400 кг/м³ (об'ємна маса 140-260 кг/м³). При цьому маса 1000 насінин для визначеного ефективного діаметра представлена в таблиці 2.2.

Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^3 = 27$, матриця якого представлена в таблиці В.2.

Таблиця 2.2 – Маса 1000 насінин для визначеного ефективного діаметра m_{1000} , Г

Щільність насіння ζ , кг/м ³ Ефективний діаметр насіння D_p , мм	200	250	300	350	400
3	3	6	9	12	15
5	13	26	39	52	65
7	36	72	108	144	180

В результаті розділення насіння під дією повітряного потоку розподіл кожної фракції по довжині області може бути представлений нормальним розподілом із визначеним середнім \bar{x} і середньоквадратичним відхиленням σ (рисунок 2.4). Для нормального розподілу в області $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$ спостерігається ймовірність 95,45 %.

Відповідно до рисунку 2.4 найкраще розділення (95,45 %) досягається при умові:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \quad (2.33)$$

або

$$\chi = \frac{\bar{x}_5 - \bar{x}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max, \quad (2.34)$$

де χ – коефіцієнт заповнення.

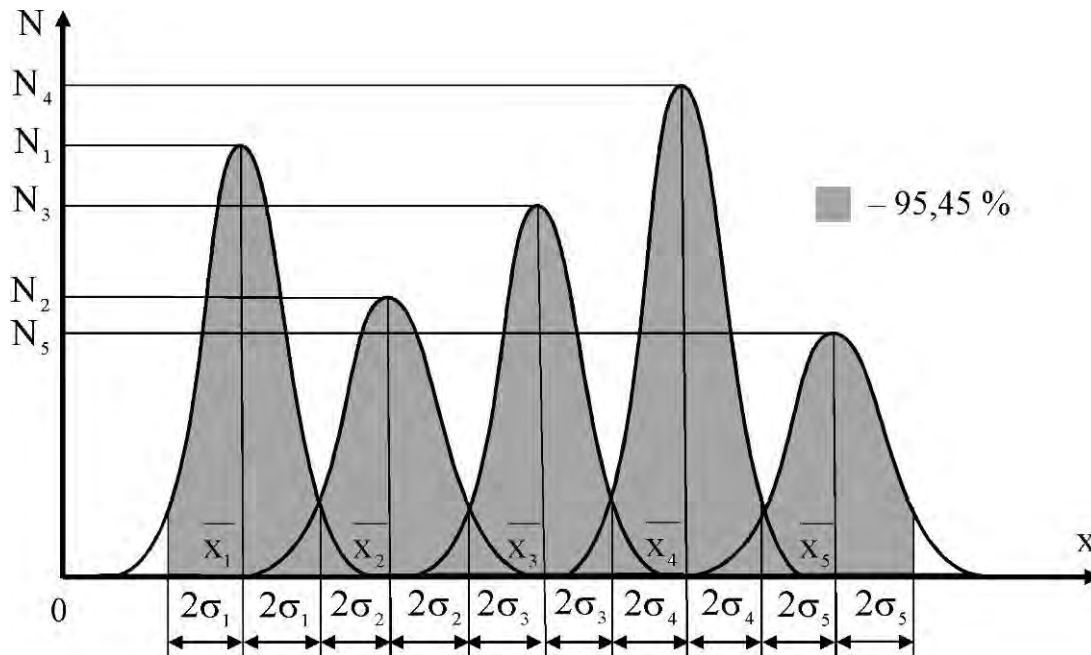


Рисунок 2.4 – Функції нормального розподілу кожної фракції по довжині області

Слід зазначити, що вся область була поділена на 20 однакових вертикальних зон, для кожної з яких визначалось кількість насіння кожної фракції. Експозиція складала від 3 до 7 с.

Вищезазначені коефіцієнт заповнення χ , середні значення розподілу фракцій по довжині \bar{x} і їх середньоквадратичні відхилення σ характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників). Однак зазвичай у існуючих аеродинамічних сепараторах застосовуються забірники однакових розмірів, що ускладнює оцінку якості процесу сепарації. Тому введено ще один критерій якості розподілу фракцій в забірниках – коефіцієнт розподілу δ , який визначається наступним чином. Нехай вхідний матеріал необхідно розділити на N фракцій, тоді кількість забірних областей повинно дорівнювати N . Для кожної забірної області визначається фракційний склад насінневої суміші, який математично можна представити у вигляді квадратної матриці $N \times N$:

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix}, \quad (2.35)$$

де w_{ij} – масова доля фракції i в збірнику j :

$$w_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij}} \cdot 100\%; \quad (2.36)$$

m_{ij} – маса фракції i в збірнику j .

Коефіцієнт розподілу δ визначається як найбільша сума діагональних елементів матриці (2.35):

$$\delta = \max \left(\sum_{k=1}^N w_{kk}, \sum_{k=1}^{N-1} w_{k(k+1)}, \dots, \sum_{k=1}^1 w_{k(k+N-1)}, \sum_{k=1}^{N-1} w_{(k+1)k}, \dots, \sum_{k=1}^1 w_{(k+N-1)k} \right), \quad (2.37)$$

де k – натуральне число.

2.2.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією повітряного потоку

В результаті першого моделювання було отримано масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів, який зведено в таблиці В.3. Аналіз таблиці дозволяє апроксимувати отримані числові дані у вигляді наступної залежності:

$$\xi = C_1 - C_2 \arctg(C_3 + C_4 D + C_5 \rho + C_6 V), \quad (2.38)$$

де $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – константи при змінних.

Підбираючи константи при змінних до моменту отримання найбільшого коефіцієнту кореляції ($R = 0,93$) в програмному пакеті Mathematica остаточно маємо

– для виходу важких компонентів малогабаритного аеродинамічного сепаратора:

$$\xi_h = 50 - 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417 D + 0,0520833 \rho + 1,39583 V); \quad (2.39)$$

– для виходу легких компонентів малогабаритного аеродинамічного сепаратора:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= 100 - \xi_h = \\ &= 50 + 31,831 \operatorname{arctg}(28,9167 + 0,260417D + 0,0520833\rho + 1,39583V). \end{aligned} \quad (2.40)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.39) представлена на рисунку 2.5. Як видно з рисунку, із збільшенням ефективного діаметра насіння соняшнику D_p і швидкості повітря V масова концентрація важких компонентів ξ зменшується і зміщується вздовж вісі об'ємної маси ρ . Це можна пояснити тим фактом, що із збільшенням діаметру насінини збільшується її аеродинамічний опір, який не дає їй у разі великої об'ємною маси можливості долати силу тяжіння.

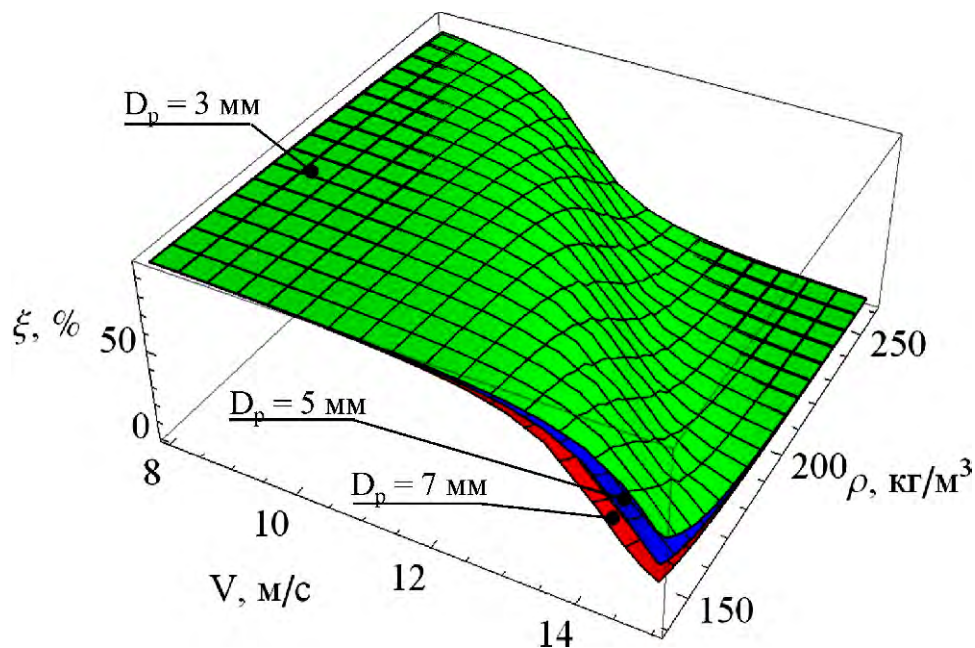


Рисунок 2.5 – Масовий розподіл компонентів за об'ємною масою на виході важких компонентів малогабаритного аеродинамічного сепаратора (віялки)

Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких ρ_h і легких ρ_l компонентів від факторів досліджень

$$\rho_h = -239,795 - 1,51159 D_p + 128,401 V - 11,6563 V^2 + 0,323668 V^3, R = 0,92; \quad (2.41)$$

$$\rho_l = -16,6528 - 1,27037 D_p + 83,8197 V - 7,73953 V^2 + 0,210855 V^3, R = 0,93. \quad (2.42)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.41), (2.42) представлена на рисунку 2.6. Як видно з рисунку різниця між ρ_h і ρ_l практично не змінюється і складає $58,2 \pm 2,2 \text{ кг/м}^3$. Із збільшенням ефективного діаметру насіння соняшнику D_p і швидкості повітря V значення ρ_h і ρ_l зменшуються. Отримана залежність дає змогу визначати швидкість повітря V виходячи з необхідних об'ємних мас ρ_h і ρ_l та ефективного діаметру насіння соняшнику D_p .

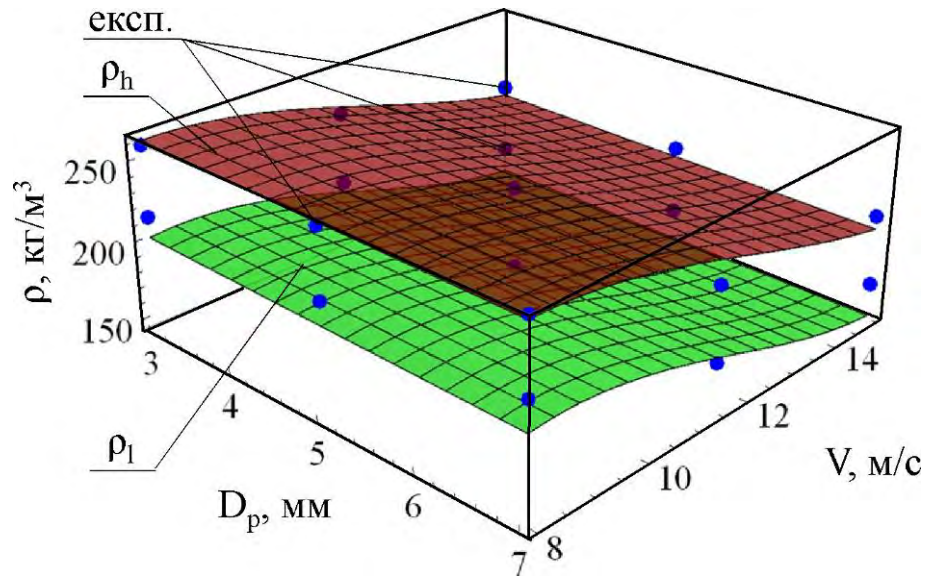


Рисунок 2.6 – Залежності зміни об'ємних мас важких ρ_h (2.41) і легких ρ_l (2.42) компонентів від факторів досліджень

В результаті моделювання (Додаток Г) було отримано візуалізацію технологічного процесу переміщення падаючого насінневого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку (рисунок 2.7).

Відповідно для кожного дослідження для кожної фракції насіння був розрахований критерій χ^2 , згідно якого розподіл насіння по довжині області відповідає нормальному розподілу. Зведені дані по кожному дослідженню із розрахованими середнім \bar{x} , середньоквадратичним відхиленням σ і коефіцієнтом заповнення χ занесені в таблицю В.4.

З використанням програмного пакету Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено рівняння залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від

факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_p = 3$ мм:

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 3 \text{ г}) &= 0,954728 + 0,00721973 Q - 0,0111852 Q^2 + \\ &+ 0,183878 V + 0,00130573 Q V - 0,01015 V^2, R = 0,984; \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 6 \text{ г}) &= 0,0842831 + 0,0285885 Q - 0,00122148 Q^2 + \\ &+ 0,267756 V - 0,00709517 Q V - 0,0108752 V^2, R = 0,999; \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 9 \text{ г}) &= 0,0368576 + 0,0764099 Q - 0,00746646 Q^2 + \\ &+ 0,184816 V - 0,00626475 Q V - 0,00589512 V^2, R = 0,997; \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 12 \text{ г}) &= 0,0213715 + 0,503556 Q - 0,101472 Q^2 + \\ &+ 0,0287905 V - 0,000873458 Q V + 0,00146449 V^2, R = 0,913; \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 15 \text{ г}) &= -0,0609045 + 0,161294 Q - 0,0330982 Q^2 + \\ &+ 0,123915 V - 0,00101193 Q V - 0,00324907 V^2, R = 0,997; \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 3 \text{ г}) &= 0,504521 + 0,0292204 Q + 0,00821691 Q^2 - \\ &- 0,0608036 V - 0,00762808 Q V + 0,00372253 V^2, R = 0,997; \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 6 \text{ г}) &= 0,210038 + 0,04134 Q - 0,000955729 Q^2 - \\ &- 0,0108561 V - 0,00295377 Q V + 0,00133641 V^2, R = 0,978; \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 9 \text{ г}) &= 0,221761 + 0,0241809 Q + 0,00189185 Q^2 - \\ &- 0,0323963 V - 0,000422608 Q V + 0,00247175 V^2, R = 0,977; \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 12 \text{ г}) &= 0,202158 - 0,00869012 Q + 0,000685585 Q^2 - \\ &- 0,0193069 V + 0,00348367 Q V + 0,00130908 V^2, R = 0,972; \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 15 \text{ г}) &= 0,124958 - 0,0138555 Q - 0,00166394 Q^2 + \\ &+ 0,00140891 V + 0,00480929 Q V - 0,0000109927 V^2, R = 0,946; \end{aligned} \quad (2.52)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.43)–(2.52) представлені на рисунку 2.8.

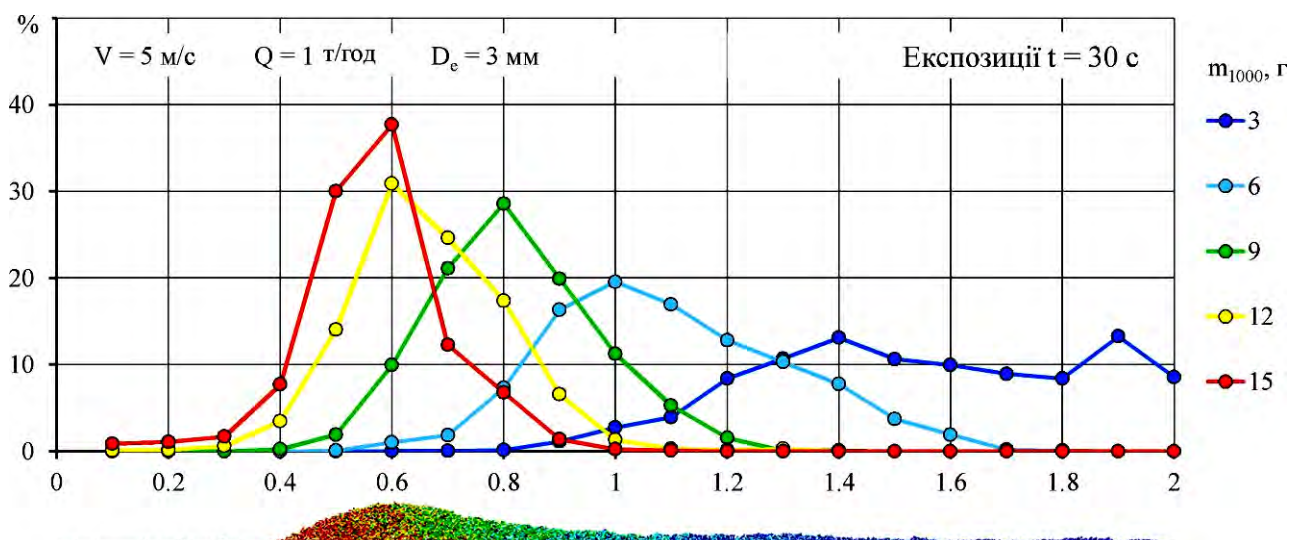


Рисунок 2.7 – Розподіл фракцій насіння ефективного діаметра $D_p = 3 \text{ мм}$ по довжині області, що утворився під впливом повітряного потоку

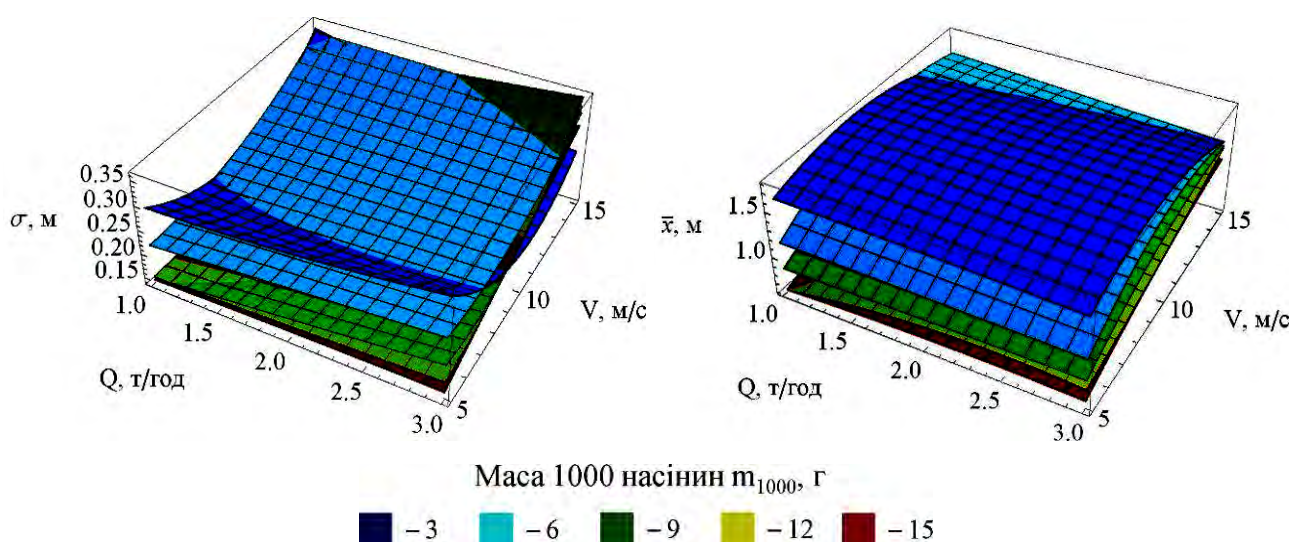


Рисунок 2.8 – Залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_p = 3 \text{ мм}$

Також встановлено рівняння залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_p = 5 \text{ мм}$:

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 13 \text{ г}) = & 0,71027 - 0,0420771 Q - 0,0110084 Q^2 + 0,123742 V + \\ & + 0,00887348 Q V - 0,00434509 V^2, R = 0,998; \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 26 \text{ г}) = & 0,356337 - 0,0354469 Q + 0,0126999 Q^2 + \\ & + 0,0863084 V - 0,00310946 Q V - 0,000136126 V^2, R = 0,999; \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 39 \text{ г}) = & 0,332835 - 0,0339945 Q + 0,0078474 Q^2 + 0,04795V + \\ & + 6,18237 \times 10^{-6} Q V + 0,000973888 V^2, R = 0,999; \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 52 \text{ г}) = & 0,262411 - 0,0261829 Q + 0,00396625 Q^2 + \\ & + 0,0397623 V + 0,000736051 Q V + 0,0010006 V^2, R = 0,999; \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 65 \text{ г}) = & 0,27823 - 0,0271966 Q + 0,00832512 Q^2 + \\ & + 0,0216802 V - 0,00101681 Q V + 0,00187411 V^2, R = 0,999; \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 13 \text{ г}) = & 0,34772 - 0,0403369 Q + 0,0202838 Q^2 + 0,0114671V - \\ & - 0,00365009 Q V - 0,000839324 V^2, R = 0,977; \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 26 \text{ г}) = & 0,0441142 + 0,0401631 Q + 0,00342207 Q^2 + \\ & + 0,0256756 V - 0,00292697 Q V - 0,00065995 V^2, R = 0,981; \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 39 \text{ г}) = & 0,0745334 + 0,0140016 Q + 0,00787991 Q^2 + \\ & + 0,00981954 V - 0,001094 Q V - 0,0000401689 V^2, R = 0,998; \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 52 \text{ г}) = & - 0,0021108 + 0,0354126 Q + 0,00522274 Q^2 + \\ & + 0,0194989 V - 0,00206008 Q V - 0,000454763 V^2, R = 0,986; \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 65 \text{ г}) = & 0,0380396 + 0,0310444 Q + 0,00987498 Q^2 + \\ & + 0,00527422 V - 0,00456048 Q V + 0,000652956 V^2, R = 0,998; \end{aligned} \quad (2.62)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.53)–(2.62) представлені на рисунку 2.9.

Також встановлено рівняння залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_p = 7$ мм:

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 36 \text{ г}) = & 0,568268 + 0,0666593 Q - 0,0268244 Q^2 + \\ & + 0,0764352 V + 0,00369314 Q V - 0,00119618 V^2, R = 0,997; \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 72 \text{ г}) = & 0,414211 + 0,0561639 Q - 0,00389266 Q^2 + \\ & + 0,0175526 V - 0,00328303 Q V + 0,00232361 V^2, R = 0,998; \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 108 \text{ г}) &= 0,32492 + 0,0574536 Q + 0,00683979 Q^2 + \\ &+ 0,00342822 V - 0,00719335 Q V + 0,00282255 V^2, R = 0,998; \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 144 \text{ г}) &= 0,291064 + 0,00765528 Q + 0,0181997 Q^2 + \\ &+ 0,00554308 V - 0,00695037 Q V + 0,00232938 V^2, R = 0,996; \end{aligned} \quad (2.66)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}(m_{1000} = 180 \text{ г}) &= 0,249036 + 0,0181046 Q + 0,0164581 Q^2 + \\ &+ 0,000739673 V - 0,00681858 Q V + 0,00239492 V^2, R = 0,997; \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 36 \text{ г}) &= 0,263461 - 0,0740618 Q + 0,0151111 Q^2 + \\ &+ 0,0316847 V + 0,00453706 Q V - 0,00214569 V^2, R = 0,986; \end{aligned} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 72 \text{ г}) &= 0,0698905 + 0,0440403 Q + 0,00190345 Q^2 + \\ &+ 0,0142413 V - 0,000782069 Q V - 0,000199919 V^2, R = 0,996; \end{aligned} \quad (2.69)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 108 \text{ г}) &= 0,0293718 + 0,0674999 Q + 0,00041201 Q^2 + \\ &+ 0,00925914 V - 0,00188404 Q V + 0,000033418 V^2, R = 0,994; \end{aligned} \quad (2.70)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 144 \text{ г}) &= 0,0599596 + 0,039841 Q + 0,0057792 Q^2 + \\ &+ 0,00561973 V - 0,00163373 Q V + 0,000103282 V^2, R = 0,995; \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\begin{aligned} \sigma(m_{1000} = 180 \text{ г}) &= 0,0330607 + 0,0585565 Q + 0,00326653 Q^2 + \\ &+ 0,00333458 V - 0,00316791 Q V + 0,000444047 V^2, R = 0,989; \end{aligned} \quad (2.72)$$

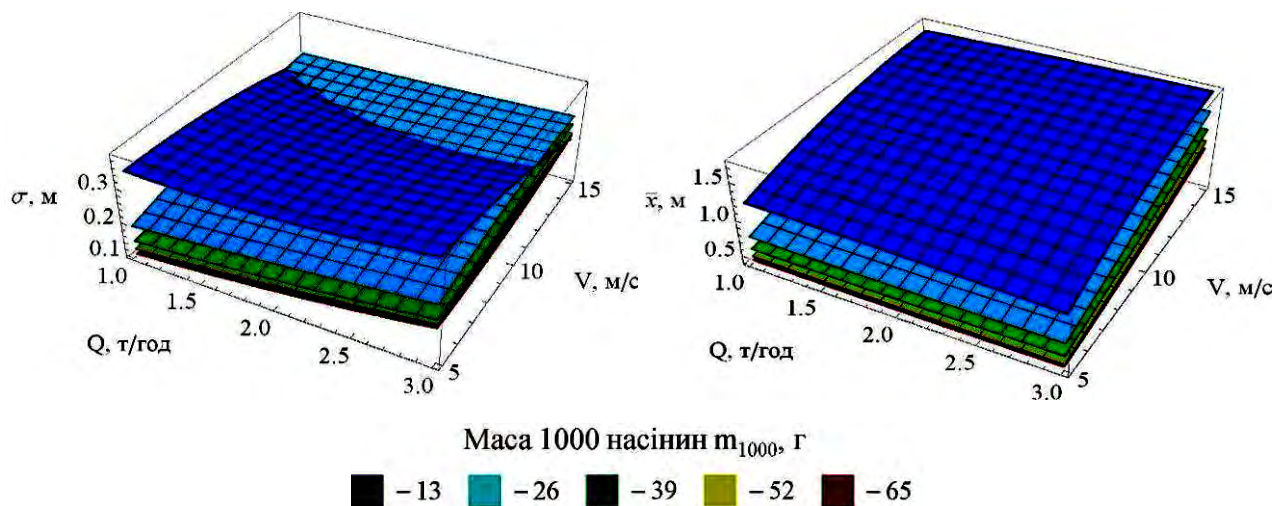


Рисунок 2.9 – Залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_p = 5$ мм

Графічна інтерпретація залежностей (2.63)–(2.72) представлені на рисунку 2.10.

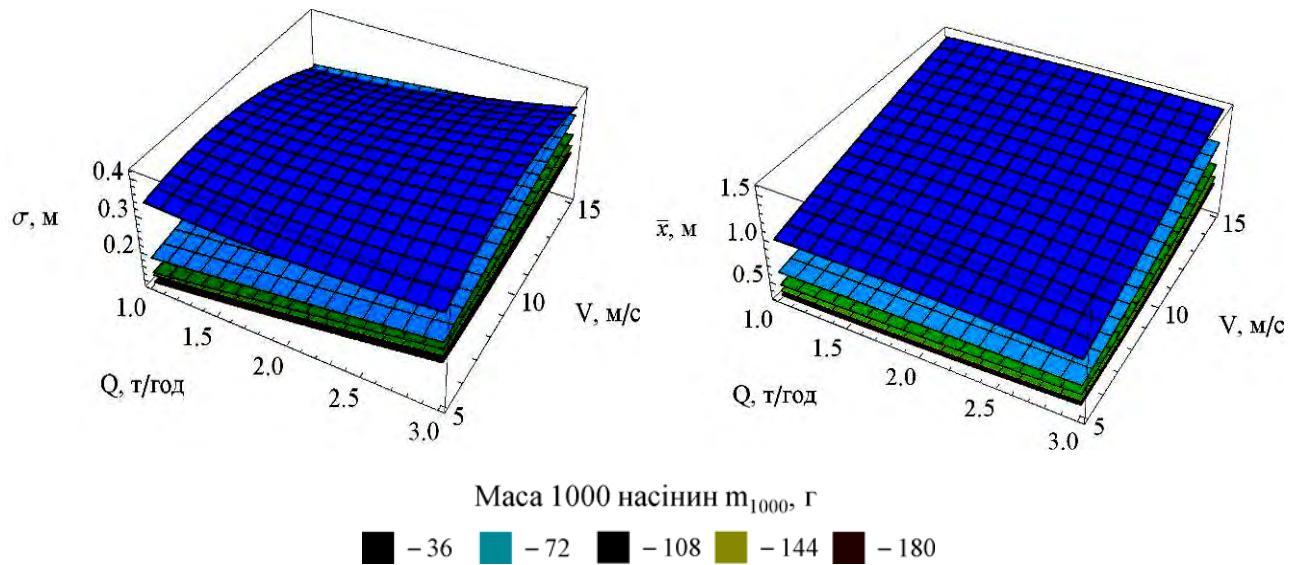


Рисунок 2.10 – Залежності середнього значення \bar{x} і середньоквадратичного відхилення σ від факторів досліджень для кожної фракції насіння ефективного діаметра $D_e = 7$ мм

Аналізуючи рисунки 2.8–2.10 для всіх заданих значень маси і ефективного діаметра насіння можна зробити висновок про те, що із збільшенням швидкості повітря V і подачі насіння Q збільшується середнє значення \bar{x} і середньоквадратичне відхилення σ розподілу фракцій насіння по довжині області, що утворилася під впливом повітряного потоку. Це пояснюється тим фактом, що збільшення швидкості повітряного потоку призводить до збільшення зони приземлення насіння різних фракцій, що в свою чергу збільшує області накладання суміжних фракцій.

Згідно даних таблиці В.4 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав коефіцієнт заповнення χ із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 \chi = & 0,250297 + 0,00555886 x_1 - 0,0284676 x_1^2 - 0,033574 x_2 - \\
 & - 0,00693137 x_1 x_2 - 0,00210356 x_2^2 - 0,0497368 x_3 + 0,0683085 x_1 x_3 + \quad (2.73) \\
 & + 0,0239908 x_2 x_3 - 0,0346961 x_3^2.
 \end{aligned}$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,84$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(27) = 2,05$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: $x_1, x_2, x_3, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1^2, x_3^2$.

У розкодованому вигляді модель (1.62) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned} \chi = & 0,489163 + 0,0125713 D_p - 0,00711689 D_p^2 - 0,0642273 Q - \\ & - 0,00346568 D_p Q - 0,025941 V + 0,00683085 D_p V + 0,00479817 Q V - \\ & - 0,00138784 V^2. \end{aligned} \quad (2.74)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.74) представлена на рисунку 2.11.

Оптимальними параметрами рівняння (2.74) при умові максимуму коефіцієнта заповнення χ є

$$D_p = 3 \text{ мм}, Q = 1 \text{ т/год}, V = 5,2 \text{ м/с}. \quad (2.75)$$

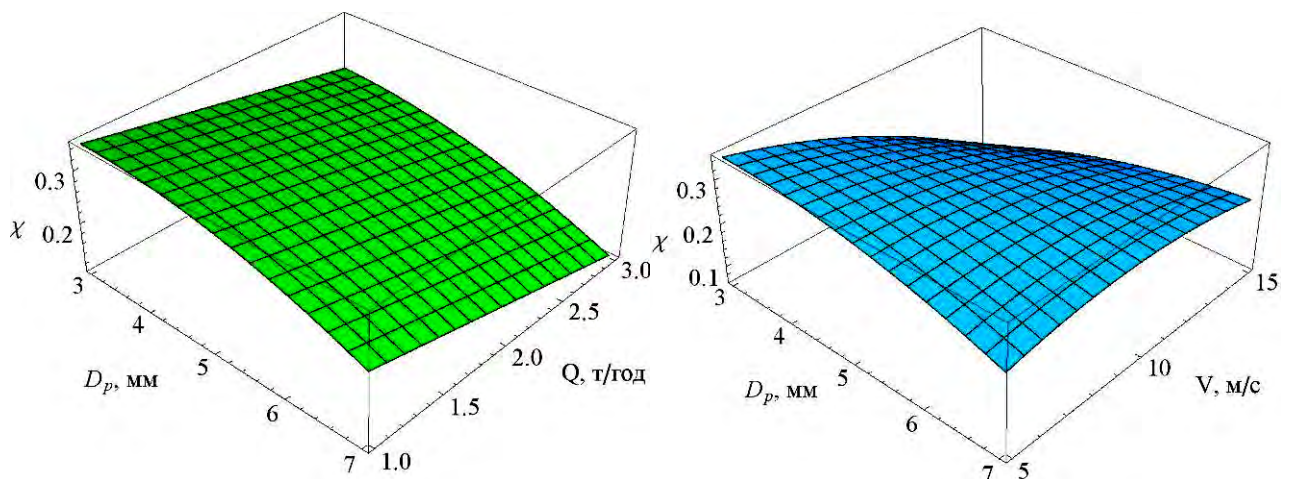


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта заповнення χ від ефективного діаметра насіння D_p , подачі насіння Q і швидкості повітря V при відповідних оптимальних параметрах (2.75)

Як видно з рисунку 2.11: із збільшенням діаметра насіння D_p коефіцієнта заповнення χ зменшується за параболою; із збільшенням подачі насіння Q коефіцієнт заповнення χ зменшується лінійно; а для швидкості повітря $V = 5,2$ м/с існує оптимальне значення коефіцієнта заповнення χ . Наявність оптимальної швидкості потоку повітря пояснюється розподілом насіння по

довжині області. При чому швидкість вітання насінин, що знаходяться в середині цій області, відповідає значенню визначеної оптимальної швидкості потоку повітря.

Згідно даних таблиці В.4 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав коефіцієнт розподілу δ із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\delta = 64,9818 - 1,20376 x_1 - 4,22914 x_1^2 + 0,45119 x_2 - 1,08759 x_1 x_2 - 1,67698 x_2^2 + 0,55842 x_3 + 12,8688 x_1 x_3 + 1,49478 x_2 x_3 - 5,47848 x_3^2. \quad (2.76)$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,87$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(27) = 2,05$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1 , $x_1 x_3$, $x_2 x_3$, x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 .

У розкодованому вигляді модель (2.76) після скорочення має вигляд:

$$\delta = 83,2606 - 2,89786 D_p - 1,05729 D_p^2 + 3,71835 Q - 1,67698 Q^2 - 2,64955 V + 1,28688 D_p V + 0,298956 Q V - 0,219139 V^2. \quad (2.77)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.77) представлена на рисунку 2.12.

Оптимальними параметрами рівняння (2.77) при умові максимуму коефіцієнта розподілу δ є

$$D_p = 3 \text{ мм}, Q = 1,55 \text{ т/год}, V = 5,4 \text{ м/с}. \quad (2.78)$$

Як видно з рисунку 2.12: із збільшенням діаметра насіння D_p і зменшення швидкості повітря V коефіцієнта розподілу δ зменшується за параболічним законом; із збільшенням подачі насіння Q коефіцієнт розподілу δ не значно зменшується лінійно. Незначний вплив подачі насіння Q на коефіцієнт розподілу δ свідчить про те, що коефіцієнт розподілу δ є однозначно якісним показником процесу сепарації. В свою чергу обернена пропорційність діаметра насіння і швидкості потоку повітря до коефіцієнту розподілу δ вказує на те, що він залежить від аеродинамічних показників насіння.

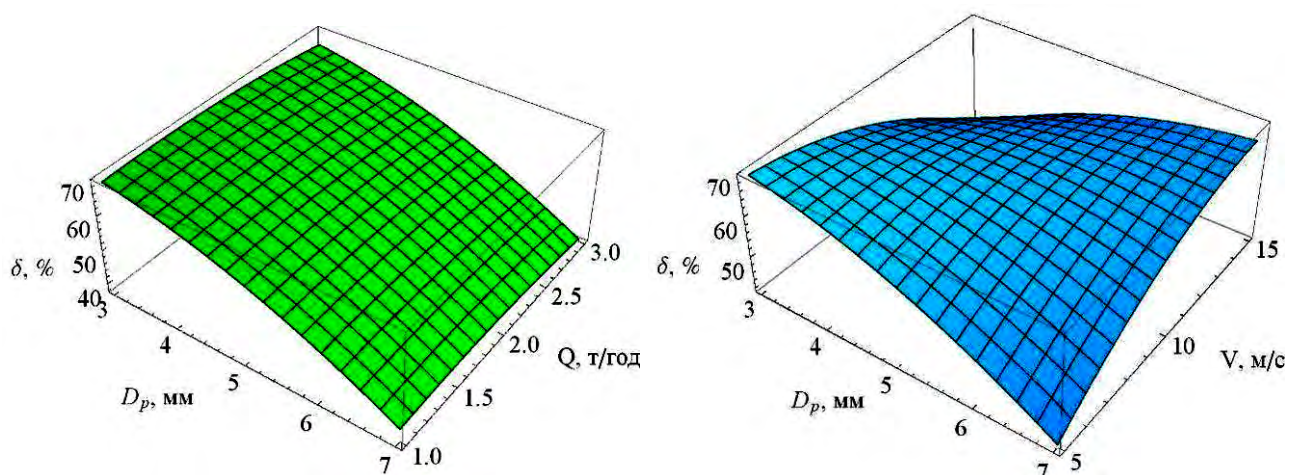


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від ефективного діаметра насіння D_p , подачі насіння Q і швидкістю повітря V при відповідних оптимальних параметрах (2.78)

2.3 Фізико-математична модель процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами

2.3.1 Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин

Форму насіння соняшнику можна апроксимувати до форми, яка представлена на рисунку 2.13. Вона складається з трьох сфер, які перетинаються між собою. Головною характеристикою насіння є її ефективний радіус (далі радіус), який визначається як радіус рівновеликої за об'ємом кулі. Тому надалі будемо розглядати взаємодію насінин у вигляді елементів сфер із радіусом r ,

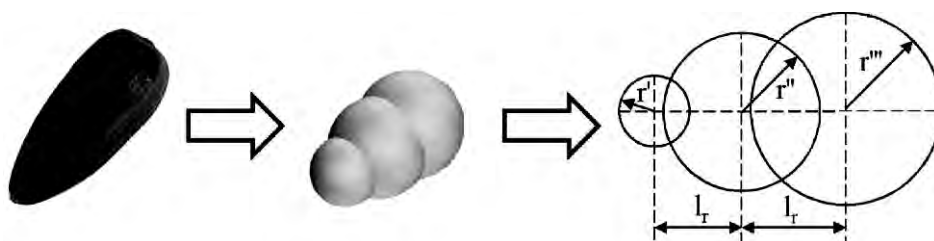


Рисунок 2.13 – Модель насінини

В просторовій багатокomпонентній системі, кожне вільне тіло має шість ступенів свободи при переміщені і обертанні [303, 304]. Для того щоб проаналізувати систему, використовується метод дискретних елементів. У цьому методі рух кожної окремої насінини розглядаються індивідуально. Позиції насінин, їх швидкості і орієнтація обчислюються на кожному часовому кроці моделювання. Рівняння тіла визначається диференціальними рівняннями

$$\begin{cases} m_i \bar{a}_i = \bar{F}_i, \\ I_i \bar{\alpha}_i = \bar{M}_i, \end{cases} \quad (2.79)$$

де $i = 1, \dots, 3$;

m_i – маса насінини, кг;

I_i – тензор інерції насінини, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

\bar{F}_i – вектор сили, що діє на насінину, Н;

\bar{M}_i – момент вектору сили, що діє на насінину, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

\bar{a}_i – лінійне прискорення насінини, $\text{м}/\text{с}^2$;

$\bar{\alpha}_i$ – кутове прискорення насінини, с^{-2} .

З огляду на два тіла i та j в системі N насінин, сила \bar{F}_i і момент сили \bar{M}_i , що діють на насінину може бути обчислені як

$$\bar{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \bar{F}_{ij} + m_i \bar{g}, \quad (2.80)$$

$$\bar{M}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \bar{M}_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \bar{r}_i \times \bar{F}_{ij}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.81)$$

де \bar{r}_i – радіус-вектор від центру до точки на поверхні насінини, м;

\bar{g} – вектор прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

Контактні розрахунки засновані на моделі м'яких частинок, що призводить до детермінованого моделювання, де стан кожної насінини в системі, і взаємодії всіх насінин визначаються за допомогою фізичних законів. Застосовуючи метод штрафу, можна визначити нормальну силу і силу тертя між насінинами, які стискаються (рисунок 2.14, б). Ця модель передбачає, що

контактні сили виникають через нефізичні перекриття між тілами в контакті [305, 306]. В результаті зіткнень, насінини будуть розсіювати енергію за рахунок нормальних сил і втрат на тертя. Повна сила між двома насінинами i та j є

$$\overline{F}_{ij} = \overline{F}_{ij}^n + \overline{F}_{ij}^t, \quad (2.82)$$

де \overline{F}_{ij}^n і \overline{F}_{ij}^t – нормальні і дотичні компоненти \overline{F}_{ij} , Н.

Контакт між парою насінин вважаються чітким однокрапковим контактом. Насінини вважаються жорсткими, однак контакти деформуються. Нормальна сила \overline{F}_{ij}^n між двома насінинами i та j , що стискаються, представляється як сума пружної сили відштовхування пружного елемента моделі і дисипативної в'язкої сили демпфуючого елемента. Ця сила може бути сформульована, як

$$\overline{F}_{ij}^n = (k_p \delta_{ij} + c_p \dot{\delta}_{ij}) \overline{n}, \quad (2.83)$$

де \overline{n} – одиничний вектор нормалі центрів двох насінин;

δ_{ij} – віртуальне перекриття насінин, м;

k_p – жорсткість пружного елемента моделі, кг/с²;

c_p – коефіцієнт загасання демпфуючого елемента моделі, кг/с;

$\dot{\delta}_{ij}$ – відносна швидкість в нормальному напрямку між двома насінинами, м/с.

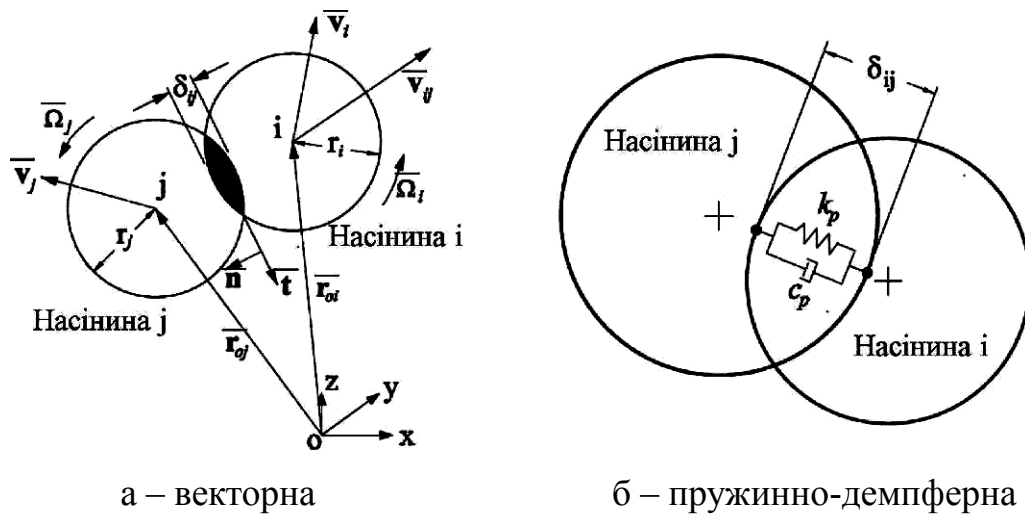


Рисунок 2.14 – Схеми взаємодії насінин

Віртуальне перекриття δ_{ij} насінин і вектор нормалі центрів двох насінин \bar{n} можна визначити за наступними виразами:

$$\delta_{ij} = (\bar{r}_i + \bar{r}_j) - (\bar{r}_{oi} - \bar{r}_{oj})^T \bar{n}, \quad \bar{n} = \frac{\bar{r}_{oi} - \bar{r}_{oj}}{|\bar{r}_{oi} - \bar{r}_{oj}|}. \quad (2.84)$$

Згідно математичної обробки дисипативних енергій, які приведені в [307, 308], вираз для енергії ΔT , що розсіюється, при взаємодії двох сферичних тіл може бути представлений

$$\Delta T = \frac{1}{2} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} (v_n^{(bef)})^2 (1 - \varepsilon_n^2), \quad (2.85)$$

де ΔT – дисипативна енергія взаємодії, Дж;

m – маса насінини, кг;

$v_n^{(bef)}$ – відносна нормальна швидкість перед зіткненням насінин, м/с;

ε_n – коефіцієнт нормальної реституції.

Коефіцієнт загасання можна розрахувати використовуючи вираз

$$c_p = 2 \sqrt{\frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} k_p = 2 \sqrt{m_{ij} k_p}. \quad (2.86)$$

Замість згаданої вище лінійної моделі в'язкої дисипації, альтернативним способом введення дисипації в систему є використання різних сил для завантаження та розвантаження [309]. Цей підхід враховує постійну, пластичну деформацію під час звичайного контакту. При такому підході навантаження пружного елемента моделі k_l , як правило, менше, ніж його розвантаження k_{un} , тобто шлях розвантаження лежить нижче навантаження $k_l < k_{un}$ і, таким чином, втрати енергії пропорційні величині деформації частинок. Для цього випадку з цієї моделі буде виключено швидкісне затухання $c_p \dot{\delta}_{ij}$. Таким чином, контактне зусилля в нормальному напрямку, буде мати вигляд

$$\bar{F}_{ij} = \bar{F}_{ij}^n = \begin{cases} k_l \delta_{ij} \bar{n}, & \text{для випадку навантаження,} \\ k_{un} (\delta_{ij} - \delta_0) \bar{n}, & \text{для випадку розвантаження,} \end{cases} \quad (2.87)$$

де δ_0 – кінцеве перекриття насінин, при якому контактна сила зникає при

розвантаженні (рис 2.15, а), м.

Ця кількість перекриття може бути розрахована шляхом застосування сили безперервності при максимальному перекритті як

$$k_1 \delta_{\max} = k_{\text{un}} (\delta_{\max} - \delta_0). \quad (2.88)$$

Розсіювання енергії може бути визначена як площа поверхні в межах трикутної області (рисунок 2.15, а), що призведе до коефіцієнта ε_m , який може бути визначений як

$$\varepsilon_m = \sqrt{\frac{k_1}{k_{\text{un}}}}, \quad (2.89)$$

де $0 < \varepsilon_m < 1$ – коефіцієнт рекурсії імпульсу.

Отже, рівняння (2.88) можна переставити і знову записати

$$\delta_0 = (1 - \varepsilon_m^2) \delta_{\max}. \quad (2.90)$$

Під час початкового навантаження сила зростає лінійно з нахилом k_1 по відношенню до віртуального перекриття δ до максимального перекриття δ_{\max} . Це максимальне перекриття може бути досягнуто при умові, що відносна швидкість між двома насінинами дорівнює нулю. Після цього моменту обидві насінини починають рухатися окремо один від одного в процесі розвантаження. Розвантаження йде вниз по другій лінії з кутом нахилу k_{un} , доки сила не зникне через час t_c при перетині осі x при кінцевому перекритті δ_0 (2.90). Оскільки існує пластична деформація, перекриття не повернеться до нуля, коли сила дорівнює нулю.

Час t_c може бути обчислений у вигляді суми контактної тривалості половини насінин з жорсткістю k_1 , k_{un} і може бути виражена як [310]

$$t_c = \frac{\pi}{2} \left(\sqrt{\frac{m_{ij}}{k_1}} + \sqrt{\frac{m_{ij}}{k_{\text{un}}}} \right). \quad (2.91)$$

У той час як дві насінини не повністю розділені ($\delta = \delta_0 \neq 0$), то може статися так, що вони виступають проти зовнішнього зіткнення з одним або декількома навколишніми насінинами. Це зіткнення буде застосовувати додаткову зовнішню силу для початкових насінин і будуть зближуватися через

ефект перезавантаження. Перезавантаження при $0 < \delta_r < \delta_0$, де δ_r це перекриття, після якого починається перезавантаження, матиме місце з градієнтом k_{un} уздовж лінії сили $k_{un}(\delta - \delta_r)$ до тих пір, поки вихідна крива завантаження буде досягнута. Подальше перезавантаження буде наступним, ніж початковий шлях завантаження з силою $k_l \delta$ до максимальної деформації.

Відсутність потреби у включенні будь-якого довільного затухання c_p і прямого аналітичного прогнозування параметрів ε_m і t_c вважається великою перевагою цієї моделі. Крім того, цю модель можна легко розширити, включивши ефект адгезії під час контакту, який виникає при застосуванні сил притягнення замість відштовхувальних, тобто коли

$$\overline{F}_i^T \cdot \overline{n}_{ij} < 0, \quad (2.92)$$

де \overline{n}_{ij} – нормальний одиничний вектор з центрів однієї насінини до іншої.

Закон сили, враховуючи адгезію, може бути змінений

$$\overline{F}_{ij} = \overline{F}_{ij}^n = \begin{cases} k_l \delta_{ij} \overline{n}, & \text{для випадку навантаження,} \\ k_{un} (\delta_{ij} - \delta_0) \overline{n}, & \text{для випадку розвантаження,} \\ k_{ad} \delta_{ij} \overline{n}, & \text{для випадку адгезії,} \end{cases} \quad (2.93)$$

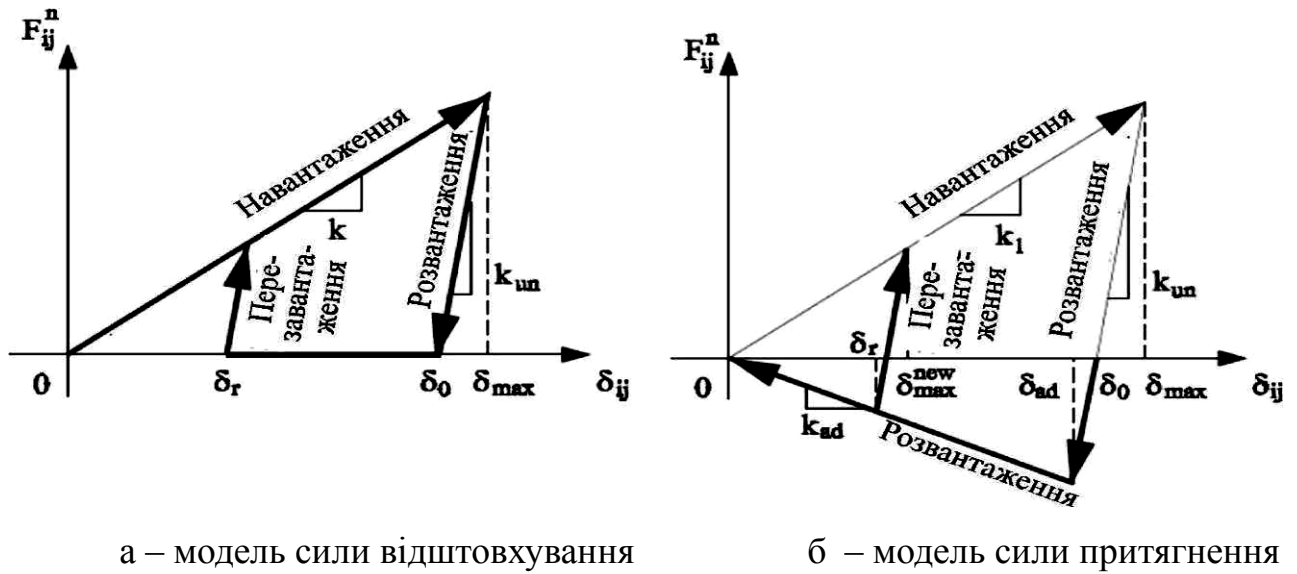
де k_{ad} – коефіцієнт зчеплення, який повинен бути негативним у випадку адгезії (рисунок 2.15, б).

Однак, якщо досягнута сила притягнення недостатньо велика, щоб змінити напрям руху насінин, то вона збільшується [311]. Максимальне значення сили притягнення досягається, коли шлях розвантаження нахилу k_{un} перетинає зменшувальну адгезію градієнта k_{ad} . Застосовуючи подібність трикутників, можна записати

$$\frac{\delta_0 - \delta_{ad}}{k_{ad} \delta_{ad}} = \frac{\delta_{max} - \delta_0}{k_l \delta_{max}}. \quad (2.94)$$

Виражаючи δ_{ad} маємо

$$\delta_{ad} = \frac{(1 - \varepsilon_m^2) k_l}{k_l + k_{ad} \varepsilon_m^2} \delta_{max}. \quad (2.95)$$



а – модель сили відштовхування

б – модель сили притягнення

Рисунок 2.15 – Принципова схема петлі гістерезису контакту навантаження та розвантаження

Далі сили розвантаження $k_{ad}\delta_{ij}$ обчислюються уздовж негативного градієнта лінії, яка обмежує максимально можливі сили притягнення між насінинами. Ефект перевантаження може знову виникнути в будь-якій точці між ними уздовж цієї лінії, тобто $0 < \delta_r < \delta_{ad}$ і сила зростає з позитивним градієнтом k_{un} до досягнення нового значення δ_{max}^{new} на вихідній кривій навантаження. В іншому випадку, навантаження не може статися і сила зменшується уздовж лінії адгезії до $\delta_{ij} = 0$, в разі, коли дві насінини більше не перекривають одна другу.

Тангенціальні сили активні в контактах, де відносна тангенціальна швидкість насінин не дорівнює нулю. Нормальні та тангенціальні компоненти відносної швидкості \overline{v}_{ij}^t двох насінин у нормальному та тангенціальному напрямках \overline{n} та \overline{t} є

$$\overline{v}_{ij}^n = \dot{\delta}_{ij} \overline{n} = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)^T \overline{n} \quad (2.96)$$

$$\overline{v}_{ij}^t = (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)^T \overline{t} + \overline{\Omega}_i r_i + \overline{\Omega}_j r_j \quad (2.97)$$

$$\overline{t} = \frac{\overline{v}_{ij}^t}{\overline{v}_{ij}^n} \quad (2.98)$$

де \overline{v}_{ij}^t – вектор відносної швидкості двох насінин, м/с;

v_i, v_j – швидкості частинок і та j, відповідно (рисунок 2.14, а);

$\overline{\Omega}_i, \overline{\Omega}_j$ – кутові швидкості частинок і та j, відповідно (рисунок 2.14, а).

Якщо тангенціальна швидкість у площині контакту дорівнює нулю на початку контакту, то контакт є нормальним, інакше він буде зсувним або тангенціальним. Тут тангенціальна сила \overline{F}_{ij}^t пов'язана з нормальною силою кулонівськими законами тертя, а саме

$$\overline{F}_{ij}^t = \begin{cases} \overline{F}_{\text{static}}^t \leq \mu_s \overline{F}_{ij}^n, v_{ij}^t = 0, \\ \overline{F}_{\text{dynamic}}^t = \mu_d \overline{F}_{ij}^n, v_{ij}^t \neq 0, \end{cases} \quad (2.99)$$

де μ_s, μ_d – статичні та динамічні коефіцієнти тертя, відповідно.

Знак « \leq », який з'являється в рівнянні (2.21), означає, що у випадку статичного тертя \overline{F}_{ij}^t просто компенсується невідомою зовнішньою силою зсуву $\overline{F}_{ij}^{\text{ext}}$, що діє на контакт, так що $v_{ij}^t = 0$. Якщо $\overline{F}_{ij}^{\text{ext}} > \mu_s \overline{F}_{ij}^n$, то з'являється режим динамічного тертя, де застосовується $\overline{F}_{ij}^t = \mu_d \overline{F}_{ij}^n$ [312]. Розрив при нульовій швидкості розглядається як недолік кулонівського закону.

Взагалі, статичне тертя завжди більше, ніж динамічне тертя ковзання, тобто $\mu_s > \mu_d$. Для простоти коефіцієнт статичного та ковзного тертя можна вважати рівним. Тому тангенціальна сила зсуву може бути виражена за законом Кулона як

$$\overline{F}_{ij}^t = -\mu_d \left| \overline{F}_{ij}^n \right| \overline{t}. \quad (2.100)$$

Шляхом прямої підстановки рівнянь (2.83) і (2.100) в рівняння (2.82), контактну силу, що описує цю модель, можна записати у вигляді

$$\overline{F}_{ij} = \left(k_p \delta_{ij} + c_p \dot{\delta}_{ij} \right) \overline{n} - \mu_d \left| \overline{F}_{ij}^n \right| \overline{t}. \quad (2.101)$$

Заміна \overline{F}_{ij} в рівняннях (2.80) і (2.81) буде давати результуюче контактне зусилля і момент сили, що діють на насінину через взаємодію насінина-насінина.

Оскільки кулонівське тертя розривна модель сили, в деяких

дослідницьких роботах виконані корективи в модель, щоб уникнути цього в моделюванні [313, 314]. В цих дослідженнях введено зрушення демпфірування, з використанням якого визначається в'язке тертя. Ця сила, яка пропорційна тангенціальній швидкості між двома насінинами, що стискаються приймає форму

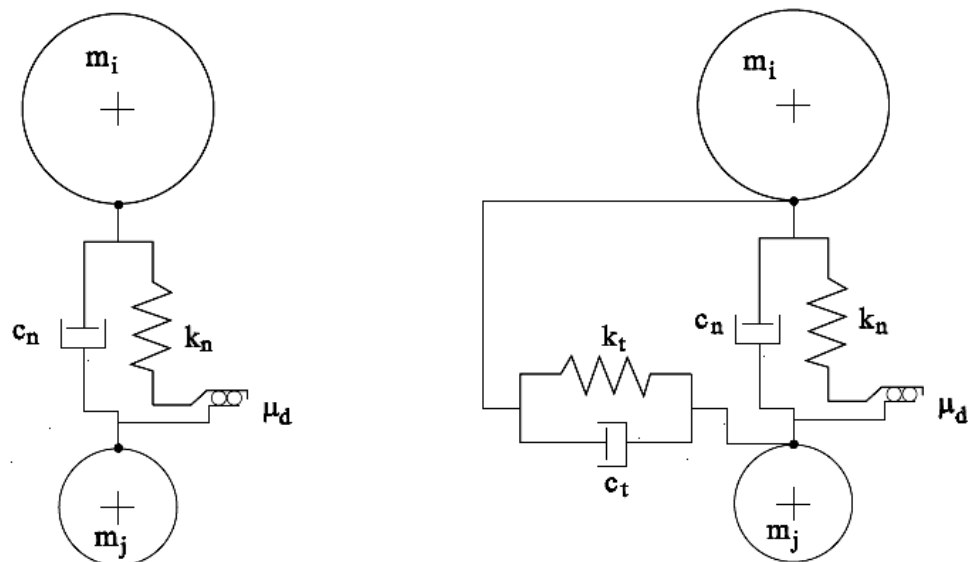
$$\overline{F}_{ij} = -c_t \overline{v}_{ij}^t, \quad (2.102)$$

де c_t – константа демпфування зсуву контакту.

Деякі інші моделі використовують як кулонівські, так і в'язкі ефекти при визначенні тангенціальної сили [315]. У цій моделі штрафний метод пружно-демпферної моделі застосовується двічі у нормальному та поперечному напрямках контакту (рис 2.16). Модель контакту описується набором співвідношень примусового переміщення

$$F_n = k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n, \quad (2.103)$$

$$F_t = \mu_d f_n + k_t \delta_t + c_t \dot{\delta}_t. \quad (2.104)$$



а – модель в нормальному напрямку

б – модель в обох напрямках

Рисунок 2.16 – Пружно-демпферна модель в нормальному та/або тангенціальному напрямку

Для нормальних і тангенціальних контактних сил F_n і F_t відповідно, де δ_n і δ_t – контактні відстані (перекриття) в нормальних і тангенціальних напрямках, $\dot{\delta}_n$ та $\dot{\delta}_t$ – відносні швидкості в цих напрямках, які були задані в рівняннях (2.96) і (2.97). Починаючи з часу t_0 , при якому спочатку було встановлено контакт, відстань δ_t , над якою розтягується тангенціальна пружина, визначається

$$\delta_t = \int_0^{t_0} v_{ij}^t(\tau) d\tau. \quad (2.105)$$

Принцип пружно-демпферної моделі також застосовується для пошуку сил між насінинами та стінками (рис 2.17, а). Аналогічно контактної взаємодії двох насінин між собою, для контакту із стінкою необхідно знати розмір перекриття під час контакту, який може бути розрахований як

$$\delta_{iw} = \left(r_i + \frac{d_w}{2} \right) - \left(\overline{r_{oi}} - \overline{r_{ow}} \right) \overline{n}, \quad \overline{n} = \frac{\overline{r_{oi}} - \overline{r_{ow}}}{\left| \overline{r_{oi}} - \overline{r_{ow}} \right|}, \quad (2.106)$$

де δ_{iw} – перекриття насінини із стінкою, м;

d_w – товщина стінки, м;

$\overline{r_{oi}}$ і $\overline{r_{ow}}$ – вектори положення центральної точки насінини та стіни відповідно, м;

\overline{n} – одиничний нормальний вектор до поверхні стінки у напрямку відбиття, тобто одиничний нормальний вектор від стіни до центру насінини (рис 2.17, б).

Крім того, як насінина набуває контакту з поверхнею стінки, виробляється протилежна контактна сила. Ця нормальна сила являє собою суперпозицію сили пружності та сили в'язкого демпфірування, якщо взяти лінійну модель Герца, маємо

$$\overline{F_{iw}^n} = \left(k_w \delta_{iw} + c_w \dot{\delta}_{iw} \right) \overline{n}, \quad (2.107)$$

де k_w – пружна жорсткість зі стіною, кг/с²

c_w – коефіцієнт демпфування зі стінкою, кг/с;

$\dot{\delta}_{iw}$ – відносна швидкість між насіниною і стінкою, м/с.

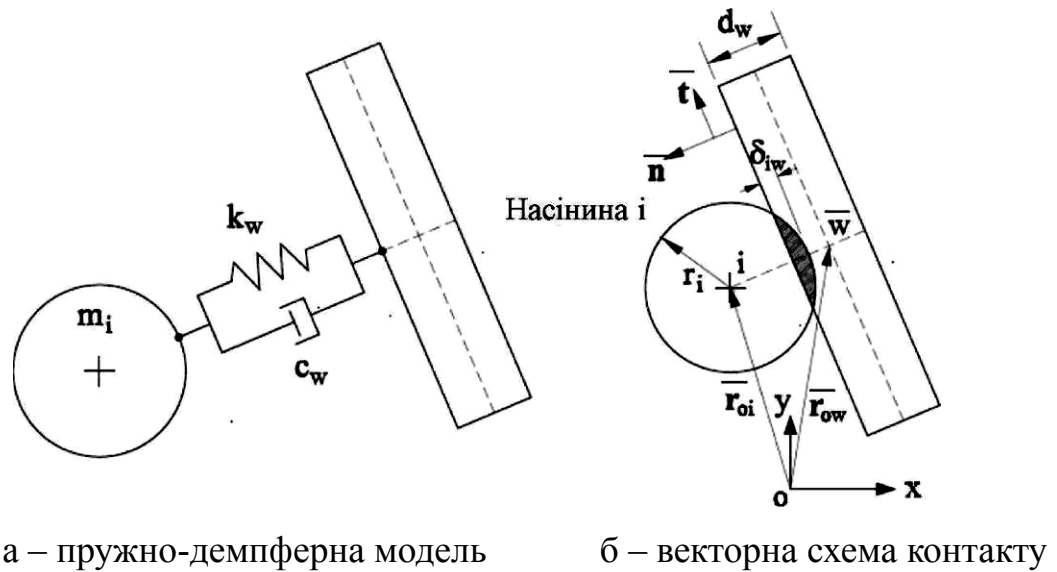


Рисунок 2.17 – Взаємодія між насіниною та стінкою

У разі переміщення або вібрації стінки, відносна нормальна швидкість $\dot{\delta}_{iw} \bar{n}$ прийме форму

$$\dot{\delta}_{iw} \bar{n} = \bar{v}_i^n - \bar{v}_w^n, \quad (2.108)$$

де $\dot{\delta}_{iw} \bar{n}$ та \bar{v}_w^n – нормальна швидкість насінини та стінки, відповідно, м/с.

Кількість в'язкого загасання під час контакту контролюється коефіцієнтом c_w . Розсіювання енергії збільшуватиметься, коли c_w стане більшим, а кінетична енергія буде зменшена після контакту через зменшення швидкості, який призведе до швидшої герметизації системи. Знижуючи силу можна враховувати і в тангенціальній площині контакту. Використовуючи найпростішу форму закону Кулона, сила тертя \bar{F}_{iw}^t зі стінкою може мати форму

$$\bar{F}_{iw}^t = -\mu_d \left| \bar{F}_{iw}^n \right| \bar{t}, \quad (2.109)$$

яка направлена в протилежному напрямку швидкості зсуву в тангенціальній площині контакту. Підвищення коефіцієнта тертя допоможе в демпфіруванні насінин в тангенціальному напрямку.

Прохід насінини через решето безпосередньо залежить від положення зазначеної насінини по відношенню до кордонів отворів [316]. Насправді, решето побудовано з комбінації пересічних стін, по яким насінини матимуть

контакт. Буває, що контакти насінин з решетом знаходять своє відображення в різних напрямках навколо отвору. Це буде залежати від точної точки на решеті, куди потрапляє частинка. Беручи до уваги всі ці точні контакти зі сіткою решета з'являється багато розрахунків і неприпустимих обчислювальних зусиль. Для того, щоб зменшити ці обчислення в той же час досягнення фізичних результатів, ще менше обчислювальних витрат, пропонується наступний підхід. Цей підхід залежить від визначення приведенного отвору решета, яке використовується тільки при моделюванні, а розгляд всіх можливих контактів і регулювання кількості пройдених та відбитих насінин визначається евристичним способом. Цей метод передбачає, що невелике насіння (розмір якого менше розміру отвору) проходить через решето, якщо воно досить мале, і його центр знаходиться в приведенному отворі, в іншому випадку воно відбивається. Товщина решета приймається рівною нулю.

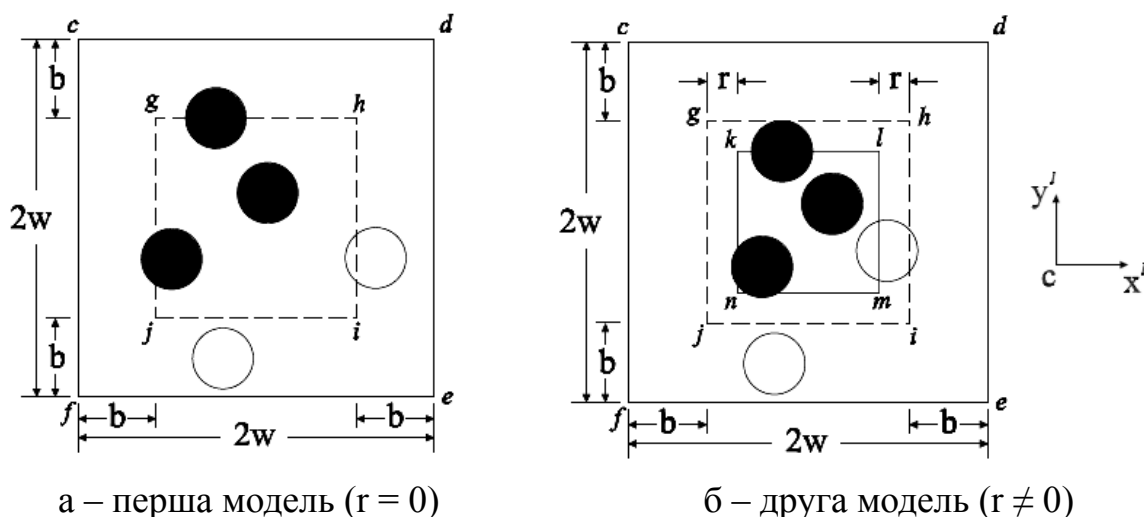
Зменшення діаметра отвору решета можна регулювати, щоб дотриматись фактичного просіювання на реальній машині.

Існує дві різні моделі для визначення приведенного отвору решета:

Модель 1. У цій моделі береться до уваги радіус невеликих насінин r . Невеликі насінини не будуть проходити крізь, якщо їх центри розміщені по периметру приведенного отвору $ghij$. У випадку коли насінини відстають від периметру приведенного отвору по крайній мірі на відстані r всередині периферії, тобто центри насінин повинні перебувати всередині квадратної області $klmn$, вони будуть проходити крізь решето (рисунок 2.18, а). Регульований параметр отвору b є параметром, визначеним для використання в якості параметра моделювання, щоб відрегулювати розмір отворів решета і може бути записаний у вигляді

$$b = \zeta(w - r), \quad 0 \leq \zeta \leq 1, \quad (2.110)$$

де ζ – являє собою фактор безрозмірного масштабування, який зберігає значення параметра b в певних межах, тобто $0 \leq b \leq (w - r)$.



чорні насінини проходять, а білі відбиваються від сітчастої поверхні

Рисунок 2.18 – Моделі визначення приведенного отвору решета

Модель 2. Ця модель являє собою окремий випадок попередньої моделі, де $r = 0$. Вона бере до уваги положення невеликих насінин по відношенню до кордонів приведенного отвору (рисунок 2.18, б). Невелика насінина буде проходити тільки якщо її центр знаходиться на або всередині периметра приведенного квадратного отвору $ghij$, в іншому випадку вона відбивається. Значення b можна записати у вигляді

$$b = \zeta w, \quad 0 \leq \zeta \leq 1. \quad (2.111)$$

Значення b знаходиться в межах $0 \leq b \leq w$. Для $\zeta = 0$ отвір максимально відкритий, як в отвір $cdef$, отже, всі насінини над ним будуть проходити. У випадку $\zeta = 1$ отвір буде повністю закритий, і, отже, не буде відбуватися просіювання.

Незважаючи на те, що використання першої моделі більш точне, ніж другої, не можна вважати, що друга модель буде далека від правильності. Було встановлено, що величина $b = 0,6w$, наприклад, у другій моделі може бути в основному еквівалентна або майже близько до значення $b = 0,8(w - r)$ в першій моделі. Тому деякі результати базуються на першій моделі, тоді як інші розглядають другу модель для імітації операції скринінгу.

Напрямок вектора швидкості насінин, безсумнівно, має великий вплив на

відбиті насінини, а потім на кількість насінин, які пройдуть через решітні отвори. Напрямок вектора швидкості визначатиме точну точку, де насінина торкнеться площини решета.

Для практичних цілей решета можуть бути спроектовані у багатьох формах відповідно до бажаних отворів, наприклад, кругові, квадратні або багатокутні форми. Розглянемо решета із квадратними отворами. Кількість отворів решета k в квадратній сітці залежить безпосередньо від розмірів сітки R_k , ширини отворів $2w$ та відстані між ними g (рисунок 2.19)

$$m_k = \frac{R_k}{2w_k + g_k} + 1, \quad (2.112)$$

де m_k – кількість отворів по ширині решета.

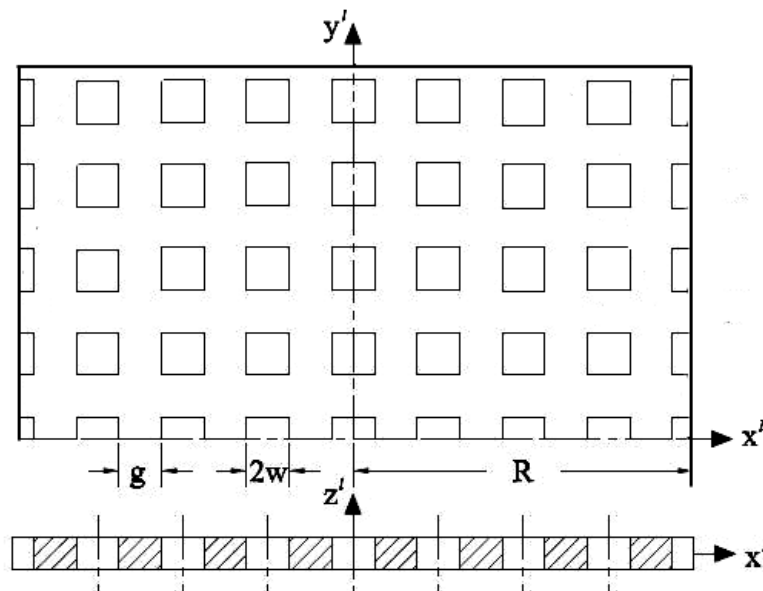


Рисунок 2.19 – Геометричний опис квадратної сітки

Оскільки число отворів завжди ціле, m_k слід округлити до найближчого цілого n_k .

Решето складається з $(2n_k - 1)$ проходів квадратних отворів у напрямку x і такої ж кількості прохідних отворів в напрямку y . Він також складається з $(2n_k - 2)$ зазорів і однакової кількості проходів в обох напрямках x^1 та y^1 , відповідно.

Зв'язок насінина-решето повинен бути виявлений в обох напрямках x^1 та y^1 . Насінини буде вважатись відбитою, якщо вона знаходиться в контакті з

решетом, а її центр знаходиться поза межами приведенного отвору, інакше вона пройде через решето, якщо вона буде досить мала. На будь-якому рівні k розглянемо точки a та p на границях двох послідовних отворів на поверхні решета (рисунок 2.20)

$$x_a^1 = w + j(2w + g), \quad x_p^1 = x_a^1 + g, \quad j = -(n_k - 1), \dots, j = (n_k - 2), \dots, \quad (2.113)$$

де j – ціле число лічильників над номером проміжку, що проходить по решету вздовж напрямку x^1 .

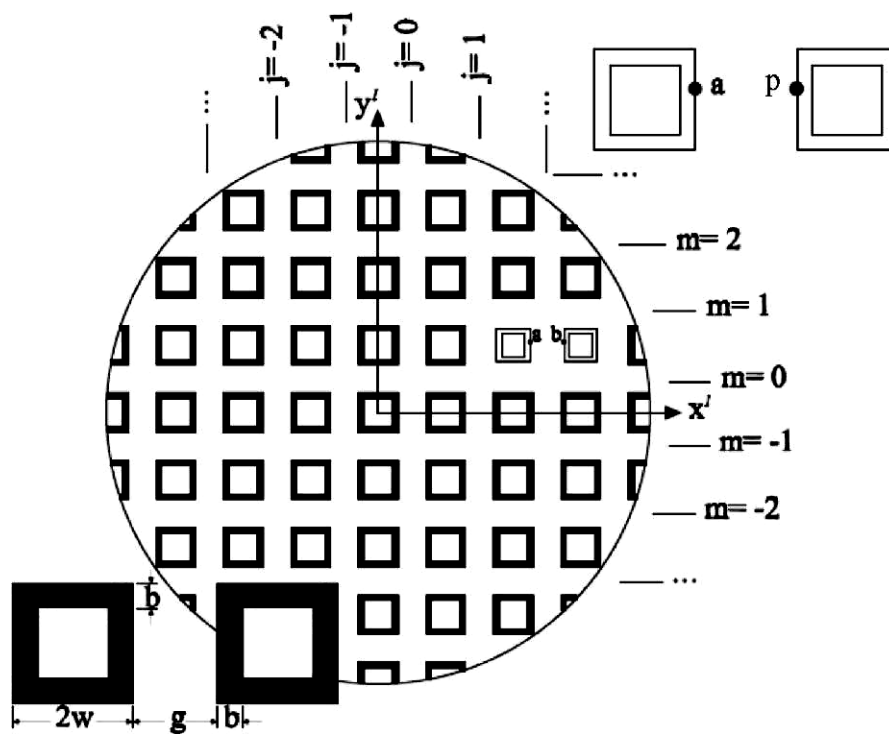


Рисунок 2.20 – Виявлення контакту насінини з решетом

Щоб перевірити положення насінини по відношенню до решета у напрямку x^1 , коефіцієнт c_x визначається як

$$c_x = \begin{cases} 0, & (x_a^1 - b) \leq r_x^1 \leq (x_p^1 + b), \\ 1, & \text{інше,} \end{cases} \quad (2.114)$$

де r_x^1 – x -координата положення насінини в напрямку x^1 .

Приведені отвори з регульованим зазором b допоможуть контролювати насінини, що проходять через решето під час процесу моделювання. Параметр b ,

що регулюється, вибирається для коригування результатів моделювання для більш точного узгодженості з експериментальними спостереженнями, які дозволяють прогнозувати подальші обчислення.

Аналогічним чином досліджується u^1 -напрямок, що дає c_y . Для того, щоб визначити контактні сили з поверхнею решета, перевіряється, чи насінина знаходиться в безпосередньому контакті зі стінкою решета або вона знаходиться над отвором

$$c_x c_y = \begin{cases} 0, & \text{насінина проходить,} \\ 1, & \text{насінина відбивається.} \end{cases} \quad (2.115)$$

Всі великі насінини (більші за $2w$), безсумнівно, відбиваються від сітчастої поверхні. Деякі з невеликих насінин (від $2w$ до $2w-2b$) також будуть відбиватися, коли вони потраплять на стінку решета, а не в отвір, інакше вони проходять крізь нього.

Сила тертя впливає на насінину і намагається зменшити їх швидкість. Тут сила тертя між насіниною та поверхнею решета звичайно направлена в напрямку їх відносної швидкості. Тангенціальний компонент відносної швидкості насінини j у площині решета можна записати як

$$v_{t_j} = \sqrt{v_{x_j}^2 + v_{y_j}^2}. \quad (2.116)$$

Одиниця вектора тангенціальної швидкості може бути виражена для $v_{t_j}^1 \neq 0$ як

$$\bar{t}_j = \begin{bmatrix} t_{x^1} \\ t_{y^1} \\ 0 \end{bmatrix}_j = \frac{1}{v_{t_j}^1} \begin{bmatrix} v_{x^1}^1 \\ v_{y^1}^1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.117)$$

Сила між насіниною j та поверхнею решета в нормальному напрямку до сітчастої площини може бути записана як

$$\bar{N}_j^1 = N_j \bar{n}_j = \left| f_{z_j^1} \right| \bar{n}_j, \quad (2.118)$$

де \bar{N}_j^1 та \bar{n}_j – нормальна контактна сила та нормальний одиничний вектор до

площини решета в системі координат K_1 , відповідно.

Використовуючи закон Кулона, тангенціальна сила тертя \overline{T}_j^1 є

$$\overline{T}_j^1 = -\mu_d N_j \overline{t}_j = -\frac{\mu_d |f_{z_j^1}|}{v_{t_j^1}} \begin{bmatrix} v_{x_1}^1 \\ v_y^1 \\ 0 \end{bmatrix}_j = -\frac{\mu_d}{v_{t_j^1}} \left| k_w \delta_{m_j} - c_w v_{z_j^1}^1 \right| \begin{bmatrix} v_{x_1}^1 \\ v_y^1 \\ 0 \end{bmatrix}_j, \quad (2.119)$$

де μ_d – динамічний коефіцієнт тертя між насінною та поверхнею решета;

δ_m – перекриття насіння-решето, м.

Використовуючи рівняння (2.118) та (2.119), загальна контактна сила \overline{F}_j^1 між насінною j та решетом, виміряна в системі координат K_1 , є

$$\overline{F}_j^1 = \overline{N}_j^1 + \overline{T}_j^1 = \left| k_w \delta_{m_j} - c_w v_{z_j^1}^1 \right| \begin{bmatrix} -\frac{\mu_d}{v_{t_j^1}} v_{x_1}^1 \\ -\frac{\mu_d}{v_{t_j^1}} v_y^1 \\ \text{sgn}(k_w \delta_{m_j} - c_w v_{z_j^1}^1) \end{bmatrix}_j, \quad (2.120)$$

де функція $\text{SIGN}(q)$ дорівнює 1 при $q > 0$, а в іншому випадку дорівнює -1 .

Ця сила також може бути виражена в глобальній системі координат K_g як

$$\overline{F}_j^g = A_{gl} \overline{F}_j^1 = A_{lg}^T \overline{F}_j^1, \quad (2.121)$$

де $A_{gl} = A_{lg}^{-1} = A_{lg}^T$ відбувається за рахунок ортогональності матриці.

2.3.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією вібруючого решета

Для першого етапу в якості фізичних моделей для чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією вібруючого решета в програмному пакеті STAR-CCM+ були обрані наступні: k - ϵ модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії. Для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те

що насінини соняшнику представляються у вигляді однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Згідно попередніх досліджень фізико-механічних властивостей насіння соняшнику гібриду Пріоритет [302] для чисельного моделювання були прийняті наступні усереднені значення: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 400 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Властивості середовища були наступні: середовище – повітря; динамічна в'язкість – 1,85508·10⁻⁵ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па. Розмір комірки сітки моделювання складав 0,001 м.

Для реалізації чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення насіння соняшнику під дією вібруючого решета, яка покладена в основу роботи різноманітних насіннеочисних і калібруючих машин (рисунок 2.21).

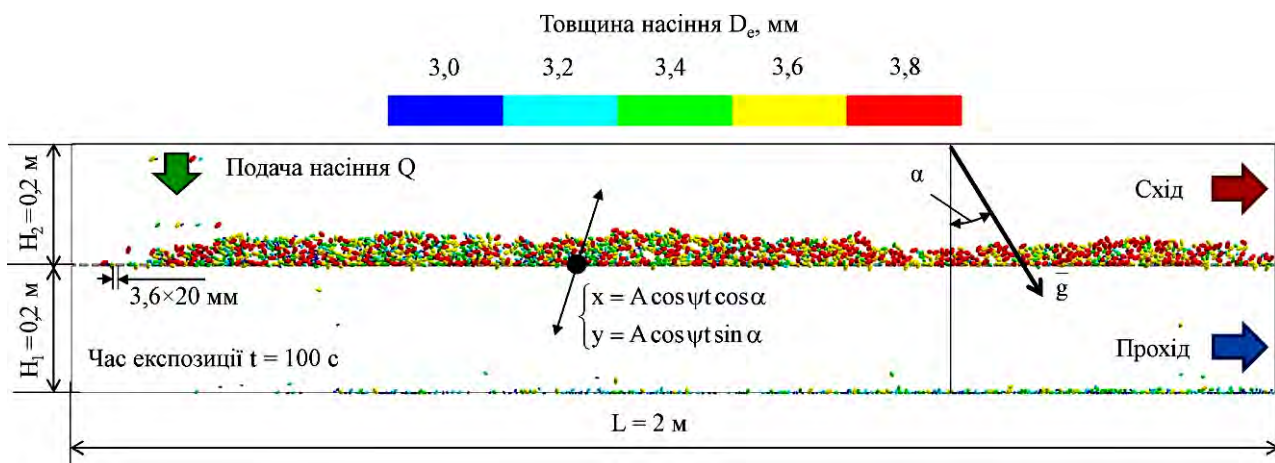


Рисунок 2.21 – Розрахункова схема процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета

Згідно з вимогами, які ставлять переробники, найбільш ліквідною фракцією для насіння соняшнику є «фракція 3,6+» (прохід решета $3,6 \times 20$ мм). Тому, подальші дослідження проведені на базі вищезазначеного решета. Згідно з попередніх досліджень обрана найбільш раціональна довжина решета $L = 2$ м.

Відносна корисна площа решета складала 0,56. Решето виконує періодичний рух за законом:

$$\begin{cases} x = A \cos \psi t \cos \alpha, \\ y = A \cos \psi t \sin \alpha, \end{cases} \quad (2.122)$$

де A – амплітуда коливань, м; ψ – частота коливань, с^{-1} .

Потік маси насіння був представлений 5 фракціями насіння однаковою кількістю з різною товщиною D_p в діапазоні 3,0-3,8 мм з кроком 0,2 мм. При цьому, маса 1000 насінин для визначеного ефективного діаметра представлена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Маса 1000 насінин для визначеного ефективного діаметра

Ефективний діаметр насіння D_p , мм	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
Маса 1000 насінин m_{1000} , г	37,78	64,25	90,72	117,20	143,68

За фактори чисельного моделювання були прийняті найбільш вагомі режимно-технологічні параметри: подача насіння – Q , кут нахилу решета – α , частота коливань решета – ψ , амплітуда коливань решета – A (межі варіювання представлені в таблиця 2.4). Кут нахилу решета α задається шляхом зміни кута нахилу прискорення вільного падіння \bar{g} , що є абсолютно тотожним. Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^4 = 81$. Експозиція складала від 100 с.

В результаті моделювання досліджувалася концентрація кожної фракції насіння, що відбилося від поверхні решета (схід) θ^c та пройшло крізь нього (прохід) θ^p . В зв'язку з тим, що розмір отвору решета було прийнято $3,6 \times 20$ мм, необхідною умовою якісного розділення насінневої суміші є мінімізація значень концентрацій фракцій 3,0 мм, 3,2 мм, 3,4 мм, 3,6 мм – за сходом ($\theta_{D_p=3,0}^c$, $\theta_{D_p=3,2}^c$, $\theta_{D_p=3,4}^c$, $\theta_{D_p=3,6}^c$ відповідно). Тому в якості критерію досліджень було взято сумарну концентрацію насіння проходу і сходу, яка розраховується за формулою:

$$\theta = \theta_{D_p=3,6}^c + \theta_{D_p=3,4}^c + \theta_{D_p=3,2}^c + \theta_{D_p=3,0}^c \quad (2.123)$$

Таблиця 2.4 – Рівні та інтервали варіацій факторів чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета

Рівні варіацій факторів	Фактори			
	Подача насіння Q, кг/год (x_1)	Кут нахилу решета α , ° (x_2)	Частота коливань решета ψ , с ⁻¹ (x_3)	Амплітуда коливань решета A, м (x_4)
Нижній рівень (-)	1100	1	4	0,008
Основний рівень (0)	1600	4	5	0,010
Верхній рівень (+)	2100	7	6	0,012
Інтервал варіацій	500	3	1	0,002

За кількісний критерій оцінки ефективності процесу розділення насіння соняшнику під дією вібруючого решета було прийнято сумарну продуктивність за сходом і проходом:

$$q = q^n + q^c \quad (2.124)$$

Також під час моделювання необхідно було дослідити векторне поле швидкостей псевдорозрідженого шару насіннєвого матеріалу на вібруючому решеті.

2.3.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією вібруючого решета

В результаті моделювання (Додаток Е) було отримано візуалізацію технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета (рисунок 2.22). Гістограма рисунка 3 ілюструє розподіл концентрації насіння відповідної фракції на виході сходу θ^c і проходу θ^n , а також відповідне значення сумарної продуктивності q .

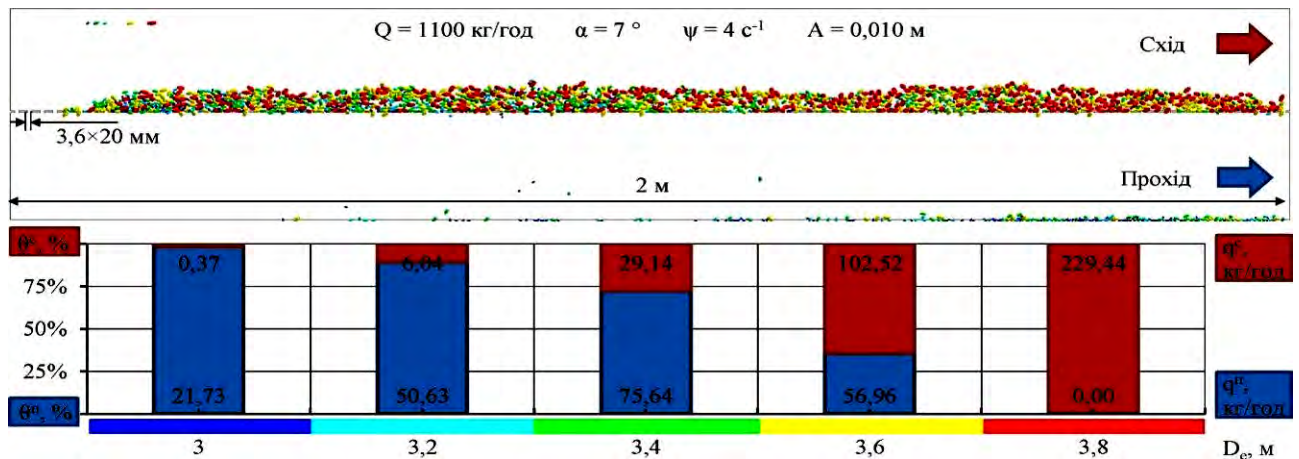


Рисунок 2.22 – Розподіл фракцій насіння на виході сходу і проходу, що утворився під дією вібруючого решета

Відповідно для кожної фракції насіння при сході та проході було визначено концентрацію і розраховано сумарну концентрацію для відповідного дослідження θ . Зведені дані по кожному дослідженню із розрахованою сумарною концентрацією θ і сумарною продуктивністю q за сходом і проходом занесені в таблицю Д.

Згідно даних таблиці Д.1 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав продуктивність q із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 q = & 1323,34 + 357,024 x_1 + 23,8254 x_1^2 + 14,1966 x_2 - \\
 & - 12,0625 x_1 x_2 - 17,3144 x_2^2 + 253,741 x_3 + 70,0625 x_1 x_3 - \\
 & - 97,3319 x_2 x_3 - 227,453 x_3^2 + 67,1553 x_4 + 4,94406 x_1 x_4 + \\
 & + 1,93291 x_2 x_4 - 29,7525 x_3 x_4 - 37,5136 x_4^2.
 \end{aligned} \tag{2.125}$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,92$) та критерію Стюдента $t_{0,05}(81) = 1,99$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1 , x_3 , x_4 , $x_1 x_3$, $x_2 x_3$, x_3^2 .

У розкодованому вигляді модель (2.125) після скорочення має вигляд:

$$q = - 6637,82 + 162,22 \alpha + 33577,7 A + 0,013423 Q + 2433,85 \psi - \tag{2.126}$$

$$- 32,444 \alpha \psi + 0,140125 Q \psi - 227,453 \psi^2.$$

Графічна інтерпретація залежності (2.126) представлена на рисунку 2.23.

Оптимальними параметрами рівняння (2.126) при умові максимуму продуктивності $q = 1942$ кг/год є

$$Q = 2100 \text{ кг/год}, \alpha = 1^\circ, \psi = 5,92 \text{ с}^{-1}, A = 0,012 \text{ м}. \quad (2.127)$$

Як видно з рисунку 2.23: із збільшенням подачі насіння Q і амплітуди коливань решета A продуктивність q збільшується лінійно; із зменшенням кута нахилу решета α продуктивність q не значно збільшується лінійно; а при збільшенні частоти коливань решета ψ продуктивність q збільшується за параболою. Взаємозв'язок між продуктивністю і подачею насіння є очевидним. Параболічний вплив частоти коливань решета на продуктивність можна пояснити тим, що при збільшенні частоти коливань швидкість збільшення продуктивності (похідна від неї) поступово зменшується і має прямувати до нуля. Збільшення продуктивності із збільшенням амплітуди і частоти коливань пояснюється тим, що насінню надається більша кінетична енергія і, відповідно до цього, більша швидкість переміщення.

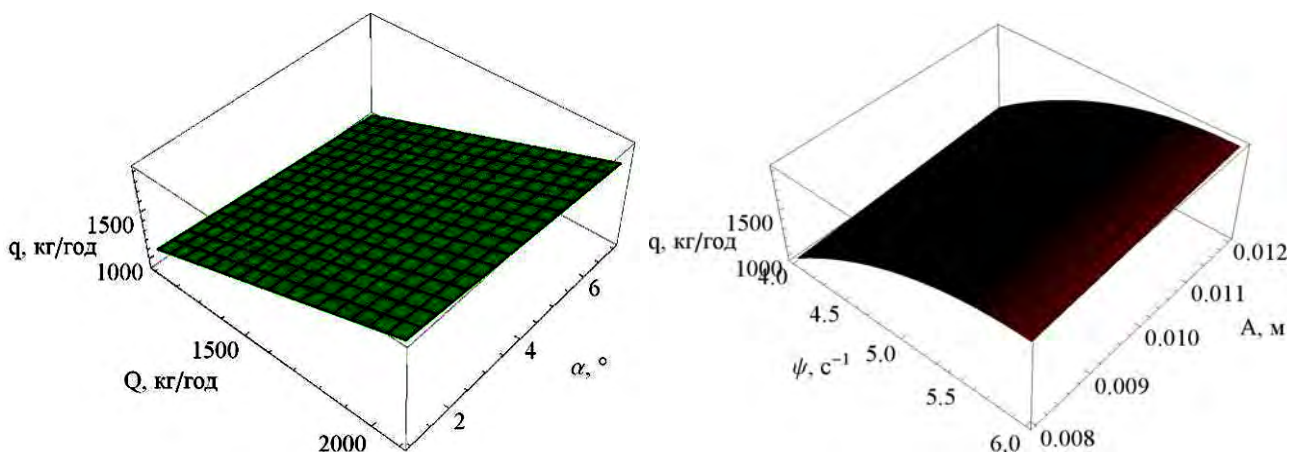


Рисунок 2.23 – Залежність продуктивності q від подачі насіння Q , кута нахилу решета α , частоти коливань решета ψ і амплітуди коливань решета A при оптимальних параметрах (2.127)

Згідно даних таблиці Д.1 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав сумарну концентрацію насіння θ із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \theta = & 12,6779 + 0,0461817 x_1 - 0,0894412 x_1^2 - 0,642948 x_2 - \\ & - 0,036784 x_1 x_2 - 0,411965 x_2^2 - 4,81466 x_3 - 0,852581 x_1 x_3 + \\ & + 0,911212 x_2 x_3 + 2,27037 x_3^2 - 3,06237 x_4 - 0,170307 x_1 x_4 + \\ & + 0,177773 x_2 x_4 + 2,7296 x_3 x_4 + 1,14 x_4^2. \end{aligned} \quad (2.128)$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,97$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(81) = 1,99$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_2 , x_3 , x_4 , $x_1 x_3$, $x_2 x_3$, $x_3 x_4$, x_3^2 , x_4^2 .

У розкодованому вигляді модель (2.128) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta = & 198,853 - 1,733 \alpha - 14055,2 A + 284999 A^2 + 0,00852581 Q - \\ & - 39,653 \psi + 0,303737 \alpha \psi + 1364,8 A \psi - 0,00170516 Q \psi + \\ & + 2,27037 \psi^2. \end{aligned} \quad (2.129)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.129) представлена на рисунку 2.24.

Оптимальними параметрами рівняння (2.129) при умові мінімуму сумарної концентрації насіння $\theta = 8,98$ % є

$$Q = 2100 \text{ кг/год}, \alpha = 1^\circ, \psi = 6 \text{ с}^{-1}, A = 0,010 \text{ м}. \quad (2.130)$$

Як видно з рисунку 2.24: із зменшенням кута нахилу решета α сумарна концентрація насіння θ зменшується лінійно; а при зменшенні амплітуди коливань решета A сумарна концентрація насіння θ збільшується за параболічним законом. Це пов'язано з тим, що надання насіннєвій суміші більш високої кінетичної енергії (збільшення амплітуди коливань) супроводжується більш інтенсивним перемішуванням і, відповідно до цього, перерозподілом фракцій насіння по шарам, що призводить до підвищенню якості процесу розділення. Попарна взаємодія двох факторів частоти коливань решета ψ і подача насіння Q впливає на сумарну концентрацію насіння θ наступним чином. При великій частоті коливань $\psi > 5$ Гц із

збільшенням подачі Q сумарна концентрація насіння θ зменшується. І навпаки, при низькій частоті коливань $\psi < 5$ Гц із збільшенням подачі Q сумарна концентрація насіння θ збільшується. Це можна пояснити так: при великій кількості насіння на решеті (велика подача) для якісного очищення необхідна висока частота коливань, і навпаки, при не великій кількості насіння на решеті (низька подача) для якісного очищення достатня низька частота коливань.

Аналіз представлених залежностей доводить про необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією віброуючого решета необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому, сумарна концентрація насіння θ повинна бути мінімальною:

$$\begin{cases} q(Q, \alpha, \psi, A) = Q, \\ \theta(Q, \alpha, \psi, A) \rightarrow \min, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.131)$$

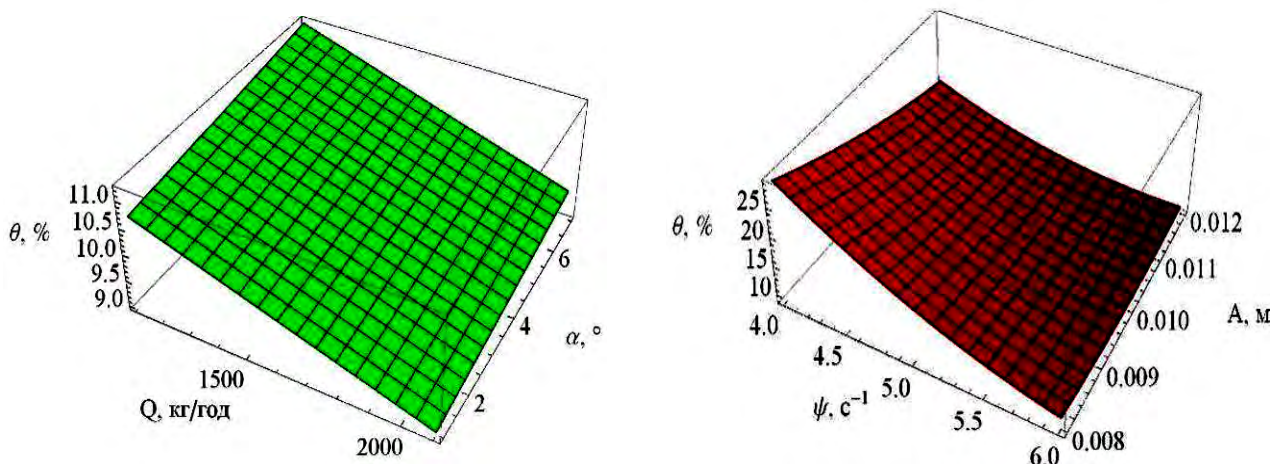


Рисунок 2.24 – Залежність сумарної концентрації насіння θ від подачі насіння Q , кута нахилу решета α , частоти коливань решета ψ і амплітуди коливань решета A при оптимальних параметрах (2.130)

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (2.131) є

$$\theta = 10,83 \%, Q = q = 1202 \text{ кг/год}, \alpha = 1^\circ, \psi = 5,62 \text{ с}^{-1}, A = 0,012 \text{ м}. \quad (2.132)$$

Окрім визначення раціональних режимних параметрів процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета було досліджено зміну градієнта швидкості псевдорозрідженого шару. Графічна візуалізація представлена на рисунку 2.25.

Як видно з рисунку 2.25 насінини псевдорозрідженого шару виконують поступально-обертальний рух по спіралі, змінюючи при цьому напрямок вектора швидкості v . При такому русі відбувається перерозподіл частинок різного розміру: менші переміщуються вниз, а більш великі вгору. Завдяки цьому і відбувається розділення насіння за розміром під дією вібруючого решета.

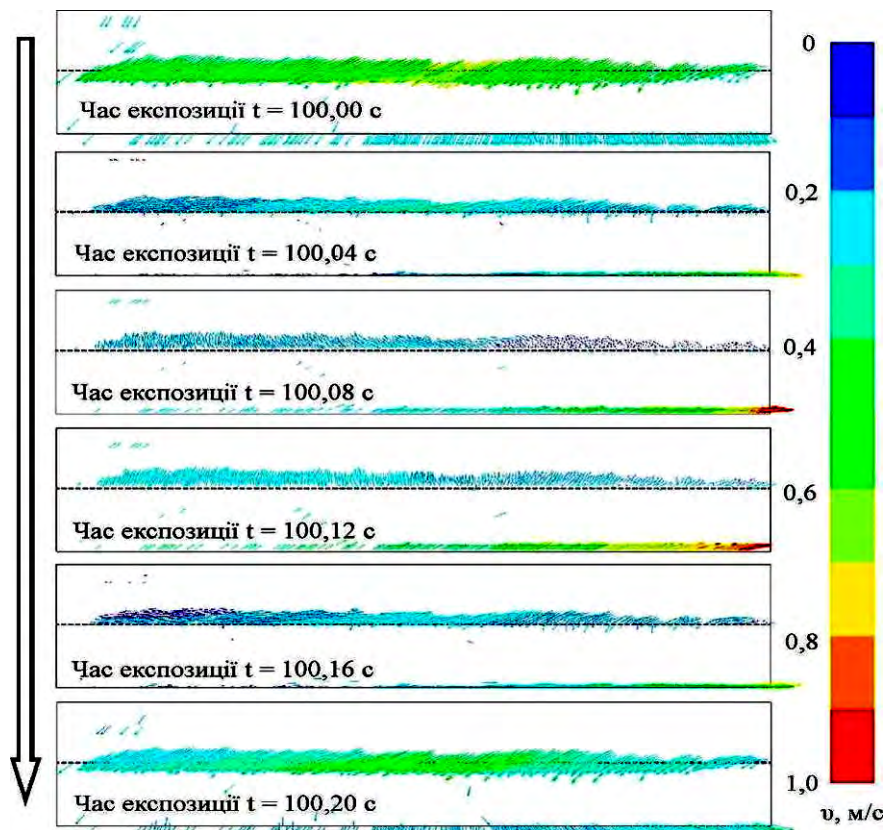


Рисунок 2.25 – Зміна градієнта швидкості псевдорозрідженого шару при $Q = 1600 \text{ кг/год}, \alpha = 1^\circ, \psi = 5 \text{ с}^{-1}, A = 0,008 \text{ м}$

2.4 Фізико-математична модель процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою

2.4.1 Фізико-математичний апарат «гранульованого газу» шару насіннєвого матеріалу

Гранульований матеріал – це конгломерат дискретного твердого тіла, макроскопічних частинок, що характеризуються втратою енергії під час взаємодії [317]. Компоненти, що складають гранульований матеріал, повинні бути достатньо великими, щоб вони не піддавалися тепловому коливальному руху. Коли середня енергія окремих частинок гранульованого матеріалу низька, а частинки нерухомі щодо один одного, гранульований матеріал діє як тверде тіло. Якщо контакти між частинками гранульованого матеріалу стають дуже рідкісними, матеріал переходить у газоподібний стан. Відповідно можна визначити гранульовану температуру, яка дорівнює кореневому квадрату флуктуацій швидкості частинок, що аналогічно термодинамічній температурі [318].

Оскільки потік шару насіннєвого матеріалу характеризується локальною дисипацією, досі немає задовільної теорії. Більшість гранульованих теорій отримують з локальної рівноваги та моделювання, використовуючи припущення про континуум [319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331]. Однак ці ідеї не є дійсними для гранульованого шару насіннєвого матеріалу [332]. Тому для гранульованого шару насіннєвого матеріалу запропоновано використовувати кінетичну теорію в нерівноважній системі та рівняння гідродинаміки.

Дотепер теоретичний аналіз результатів [333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341], що отримані з рівняння Больцмана для гладких непругих твердих сфер, є дефіцитним. Наприклад, Уілкінсон та Едвардс [342] вивчали функцію розподілу швидкості (v_t) в стаціонарному стані газу Лоренца для незалежної зернистої частинки, що рухається під тяжінням у випадковому масиві

фіксованих непругих твердих шарів, які використовуються як розсіювачі, які керовані гравітацією. Ці автори зменшують рівняння Больцмана до рівняння Фоккера-Планка, припускаючи, що швидкість зміни залишається малою після зіткнення. Функція розподілу швидкостей отримується у формі $\exp(-Av^4)$, де $A \sim \epsilon/g^2$, $\epsilon = (1+\alpha)(3-\beta_1)/6$, β – емпіричні коефіцієнти, α – коефіцієнт реституції. Гольдштейн та Шапіро [335] вирішили рівняння Больцмана-Енскога для вільного еволюційного газу, як непругої твердої сфери в припущенні однорідного стану «охолодження» шляхом модифікації методу Чапмена-Енскога, використовуючи розкладання на многочлени Соніна. Есипов та Почель [336] отримали вираз $\dot{A} \exp(-Av/v_0(t))$ для функції розподілу швидкостей. Села та Голдхирш [343] отримали рішення збурень нелінійного рівняння Больцмана, виконуючи (подвійне) розкладання в кількості Кнудсена та в ступені не пружності, яке використовується для пояснення порядку Бернетта. Ное та Ернст [337] вивчали функцію розподілу швидкостей у вільному холодному та рівномірно нагрітому стані непругої твердої сфери багаточленами Соніна на основі рівняння Енскога-Больцмана. Ернст та Бріто [344] отримали розв'язки для однорідного нелінійного рівняння Больцмана, застосованого до нееластичних моделей Максвелла, під трьома різними типами "термостатів", які використовуються для збудження гранульованого газу: гауссовський, білий шум і гравітаційне поле для нерівноважних стійких станів, так що теоретичні результати виглядають різноманітно.

Було обрано для поставленої задачі Больцмана-Енскога однорідне припущення про стан «охолодження» з постійним коефіцієнтом реституції ϵ .

Побудова нормального рішення для рівняння Больцмана засноване на розкладанні, що розроблено Чепменом і Енскогом [345]. Її нормальне рішення є функцією термодинамічних змінних, які використовують зв'язки потоків в просторових похідних термодинамічних змінних. Нехай f_L позначає місцеву рівноважну функцію розподілу, тобто локально максвеллівську:

$$f_L = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{m}{2kT} (\bar{v} - \bar{u})^2 \right], \quad (2.133)$$

де \bar{v} – швидкість насінини, м/с;

\bar{u} – середня швидкість потоку насінин, м/с;

n – кількісна щільність;

m – маса насінини, кг;

k – коефіцієнт «теплопровідності» гранульованого газу, $\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{К} \cdot \text{с}^2)$.

T – «температура» гранульованого газу, К.

Всі параметри, так як і у термодинамічних змінних, є похідними від розподілу швидкостей f_L . Можна замінити розподіл швидкостей на f_L , якщо ці параметри ще можуть бути отримані з f за допомогою однієї і тієї ж форми рівняння. Наприклад, кількісна щільність

$$n = \int d^3v f_L = \int d^3v f. \quad (2.134)$$

Для того, щоб отримати більш точну оцінку f , можна спробувати виразити f в залежності від f_L , і записати, як

$$f = f_L (1 + \Phi), \quad (2.135)$$

де $\Phi = 0$ – рівноважна функція розподілу (в 0-му порядку);

$\Phi = \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)} + \Phi^{(3)} + \dots$ – нерівноважна функція розподілу.

Тоді, в першому наближенні можуть бути отримані коефіцієнт «охолодження» ζ і коефіцієнти переносу η , κ , μ [345]. Ці параметри, в свою чергу функції «температури», щільності і мікроскопічних параметрів, таких як розмір і маса насінини і коефіцієнта реституції.

Поліноми Соніна також називають асоційованими многочленами Лагерра. У літературі це метод, який використовується для вирішення рівняння Больцмана-Енсога через набір наближень. Це стосується особливого випадку однорідного стану «охолодження»; припускається, що поле швидкості зникає через довгий час, щільність n є просторово однорідною, а «температура» $T(t)$ в часі зменшується [346].

Для початку розглянемо нелінійне рівняння Больцмана для непружних

твердих сфер. Існує багато способів, щоб отримати рівняння Больцмана [347, 348]. Таким чином, розподіл швидкостей для непружного гранульованого газу шару насіння можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f(\bar{v}_1, t) = \sigma^2 \int d\bar{v}_2 \int \bar{e} \Theta(-\bar{v}_{12} \cdot \bar{e}) |\bar{v}_{12} \cdot \bar{e}| \times \\ \times \left[\chi f(\bar{v}_1'', t) f(\bar{v}_2'', t) - f(\bar{v}_1, t) f(\bar{v}_2, t) \right] \equiv I(f, f), \end{aligned} \quad (2.136)$$

де $f(\bar{v}_1, t)$ – розподіл швидкостей насінин, c^3/m^3 ;

\bar{v}_1 – швидкість насіння, м/с;

\bar{e} – одиничний вектор між парою насінин, що стикаються;

$\bar{v}_{12} \equiv \bar{v}_1 - \bar{v}_2$ – відносна швидкість насінин, м/с;

σ – це відстань між парою насінин, що стикаються, м;

$\chi = 1/\epsilon^2$ для випадку коли коефіцієнт реституції $\epsilon = \text{const}$;

$I(f, f)$ – інтеграл зіткнень, ϵ функція розподілу за швидкостями;

Θ – це крок-функція Хевісайда,

$$\Theta(x) \equiv \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (2.137)$$

Тут використовуються дві апроксимації або гіпотези:

1. Передбачається бінарне зіткнення. Колізій з трьома тілами або ефекти більшої кількості тіл ігноруються.

2. Функція розподілу двох насінин $f(\bar{v}_1, \bar{v}_2, r_{12}, t)$ є продуктом двох одночастинкових розподілів $f(\bar{v}_1, t)$ і $f(\bar{v}_2, t)$, тобто немає кореляційного ефекту між насінинами.

Це називається гіпотезою молекулярного хаосу. Енског [333] запропонував наближення, яке пояснює глобальний однорідний ефект кінцевого об'єму. Це призводить до зміни рівняння Больцмана (2.136) на рівняння Больцмана-Енскога:

$$\frac{\partial}{\partial t} f(\bar{v}_1, t) = g_2(\sigma) I(f, f), \quad (2.138)$$

де $g_2(\sigma)$ – контактне значення функції кореляції парної рівноваги. У слабконепружному $\epsilon < 1$ розподіл швидкості можна масштабувати за формою [336]:

$$f(\bar{v}_1, t) = \frac{n}{v_T^3(t)} f\left(\frac{\bar{v}}{v_T(t)}\right) = \frac{n}{v_T^3(t)} \tilde{f}(\bar{c}), \quad (2.139)$$

де $\bar{c} \equiv \frac{\bar{v}}{v_T(t)}$ – масштабована швидкість;

$$v_T(t) = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \text{ – «теплова» швидкість.}$$

З рівнянням (2.139), $\frac{\partial}{\partial t} f(\bar{v}_1, t)$ можна виразити як:

$$\frac{\partial}{\partial t} f(\bar{v}_1, t) = \left(-\frac{3n}{v_T^4} \tilde{f}(\bar{c}_1) + \frac{n}{v_T^3} \frac{\partial \tilde{f}}{\partial c_1} \frac{\partial \bar{c}_1}{\partial v_T} \right) \frac{\partial v_T}{\partial t}. \quad (2.140)$$

Інтеграл зіткнень може бути записаний як

$$I(f, f) \equiv \sigma^2 n^2 v_T I(\tilde{f}, \tilde{f}). \quad (2.141)$$

Використовуючи швидкість розпаду часу, \tilde{f} задовольняє наступне рівняння:

$$\frac{\mu_2}{3} \left(3 + c_1 \frac{\partial}{\partial c_1} \right) \tilde{f}(\bar{c}_1) = \tilde{I}(\tilde{f}, \tilde{f}). \quad (2.142)$$

У цій ситуації очікується замкнений гаусовський розподіл для $\tilde{f}(\bar{c}_1)$. Прагнемо до розв'язання рівняння (2.142), використовуючи багаточлени Соніна. Систематичне наближення ізотропної функції $\tilde{f}(\bar{c}_1)$ можна знайти шляхом розширення в множині поліноми Соніна, тобто

$$\tilde{f}(\bar{c}_1) = \phi(c) \left[1 + \sum_{p=1}^{\infty} a_p S_p(c^2) \right], \quad (2.143)$$

де

$$\phi(c) \equiv \pi^{3/2} \exp(-c^2) \quad (2.144)$$

– є гауссовським розподілом для масштабної швидкості \bar{c} .

Набір S_p задовольняє ортогональні відносини

$$\int dc \phi(c) S_p(c^2) S_{p'}(c^2) = \delta_{pp'} N_p \quad (2.145)$$

$\delta_{pp'}$ – дельта Кронекера;

N – константа нормалізації.

Перші кілька членів багаточлена Соніна

$$S_0 = 1, \quad (2.146)$$

$$S_1 = -x + \frac{1}{2}d, \quad (2.147)$$

$$S_2 = -\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}(d+2)x + \frac{1}{8}d(d+2), \quad (2.148)$$

де d – розмірність простору.

Коефіцієнти a_p – поліноміальні моменти функції масштабування:

$$a_p = \frac{1}{N_p} \int dc S_p(c^2) \tilde{f}(c). \quad (2.149)$$

Тепер, коли розподіл швидкостей отриманий з малою нееластичністю, можна скористатися рівнянням (2.143), коли розподіл по суті є розподілом Максвелла $\exp(-v^2/v_0^2)$, і якщо серія многочленів Соніна швидко сходиться. Це означає також, що весь набір наближень, зроблених для написання рівняння (2.143), правильний.

Розподіл швидкості в гранульованому газі шару насіння відрізняється від розподілу Максвелла в низькій і високій частині. У Goldshtein A., Shapiro M. [336] передбачена функція розподілу експоненціальної швидкості. Для великої негативної та великої позитивної частини швидкості це називається швидкістю хвоста, яка є перенаселеною, оскільки $\exp(-v/v_0)$ зменшується повільніше, ніж $\exp(-v^2/v_0^2)$ при досить великому v . Отже, для цього потрібно порівняти асимптотичні форми функції розподілу швидкості з відповідною формою гаусовського розподілу, використовуючи, наприклад, логічно-лінійний метод.

Для низькошвидкісної частини слід вивчити поведінку ексцесів або деяких вищих сукупностей. Отже, у рівняння (2.141) інтеграл зіткнень є

$$\tilde{I}(\tilde{f}, \tilde{f}) = \int dc^2 \int d\bar{e} (-\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}) |\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}| \times \left[\frac{1}{e^2} f(\bar{v}_1'', t) f(\bar{v}_2'', t) - f(\bar{v}_1, t) f(\bar{v}_2, t) \right] = \quad (2.150)$$

$$\begin{aligned} &= \int dc^2 \int d\bar{e} (-\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}) |\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}| \times \frac{1}{e^2} f(\bar{v}_1'', t) f(\bar{v}_2'', t) - \\ &- \int dc^2 \int d\bar{e} (-\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}) |\bar{c}_{12} \cdot \bar{e}| \times f(\bar{v}_1, t) f(\bar{v}_2, t) \end{aligned} \quad (2.151)$$

Отже, необхідно оцінити, коли $c_1 \gg 1$, а $\bar{c}_{12} \approx \bar{c}_1$. Більше того, внесок у високу швидкість з першого члену рівняння (2.151) невеликий. Отже, першим членом рівняння (2.151) можна знехтувати. Використання нормалізації

$$\int \tilde{f}(\bar{c}_2) d\bar{c}_2 = 1 \quad (2.152)$$

і інтеграл

$$\int d\bar{e} \Theta(-\bar{c}_1 \cdot \bar{e}) |\bar{c}_1 \cdot \bar{e}| = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^{\pi} \sin \Theta \cos \Theta d\Theta = \pi, \quad (2.153)$$

інтеграл зіткнень може бути записаний:

$$\tilde{I}(\tilde{f}, \tilde{f}) \approx -\pi c_1 \tilde{f}(\bar{c}_1). \quad (2.154)$$

Тоді, з рівнянням (2.154), рівняння (2.142) зводиться до:

$$\mu_2 \tilde{f}(\bar{c}_1) + \frac{1}{3} \mu_2 \bar{c}_1 \frac{d}{dc_1} \tilde{f}(\bar{c}_1) = -\pi c_1 \tilde{f}(\bar{c}_1). \quad (2.155)$$

Для $c_1 \gg 1$, отримуємо

$$\frac{d\tilde{f}}{dc_1} = -\frac{3\pi}{\mu_2} \tilde{f}. \quad (2.156)$$

Розподіл швидкостей стає остаточним:

$$\tilde{f}(c) = A \exp\left(-\frac{3\pi}{\mu_2} c\right). \quad (2.157)$$

Порівняно з розподілом Максвелла $\exp(-c^2)$, перенаселення високої швидкості відбувається, коли коефіцієнт експоненти $\left(-\frac{3\pi}{\mu_2} c\right)$ в рівнянні (2.157) більше, ніж $-c^2$. Оскільки μ_2 вводить коефіцієнт $1 - \epsilon^2$, перенаселення

відбувається при $c \geq 1/(1 - \epsilon^2)$. Брей [349] вважає, що ця теорія добре узгоджується з результатами моделювання. Він використовує його для однорідної теорії стану «охолодження».

Більше того, Лозерт [350] представляє експериментальні розподіли швидкості, описані за допомогою $\exp(-|v/v_0|^{1.5})$ для великого діапазону параметрів [351].

Гідродинаміка рівняння для гранульованого газу твердих сфер з диссипативними динаміками може бути отримано з рівняння Больцмана [352].

Гранульований газ шару насіння розглядається як континуум матерії [353]. Хоча існує велика різниця між гранульованими системами та простими рідинами, можна вважати таке наближення дійсним, принаймні на першому етапі, і знайти всю статистику за умов малих просторових градієнтів «температури» та щільності. Тоді гранульований газ шару насіння задовольняє чотири умови:

1. $\bar{\nabla}T \sim \frac{T}{L}$, $L \gg 1$, де L – характеристичні довжини, l – середній вільний шлях. Цей момент забезпечує просторовий градієнт «температури».

2. Так само, як в 1 для щільності числа $\bar{\nabla}N \sim \frac{N}{L}$, $L \gg 1$.

3. Швидкість макроскопічного потоку $\bar{u} \ll \sqrt{\langle v^2 \rangle} \sim \sqrt{T}$.

4. Характерний час $\tau_c \ll \frac{L}{u}$.

Оскільки система зберігає збереження маси та імпульсу для гранульованого газу шару насіння, рівноваги для маси та імпульсу все ще тримаються. Це відповідає зміні енергії («температури»). Тоді можна отримати гідродинамічне рівняння гранульованого газу шару насіння:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (n\bar{u}) = 0, \quad (2.158)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\nabla} \bar{\mathbf{u}} + (nm)^{-1} \bar{\nabla} \cdot \hat{\mathbf{P}} = 0, \quad (2.159)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\nabla} T + \frac{2}{3n} (\hat{\mathbf{P}} : \bar{\nabla} \bar{\mathbf{u}} + \bar{\nabla} \cdot \bar{\mathbf{q}}) + \zeta T = 0. \quad (2.160)$$

де $n(\bar{\mathbf{r}}, t)$ – поле щільності локального числа;
 $\bar{\mathbf{u}}(\bar{\mathbf{r}}, t)$ – локальне середнє поле швидкості, або локальна швидкість потоку;
 $T(\bar{\mathbf{r}}, t)$ – «температурне» поле;
 $\hat{\mathbf{P}}(\bar{\mathbf{r}}, t)$ – тензор тиску;
 m – маса;
 $\zeta(\bar{\mathbf{r}}, t)$ – коефіцієнт «охолодження».

Для стаціонарного стану, оскільки $\bar{\mathbf{u}}(\bar{\mathbf{r}}, t) = 0$ і всі параметри не змінюються з часом (стаціонарний стан), ці рівняння можуть бути записані у вигляді

$$\bar{\nabla} \cdot \hat{\mathbf{P}} = 0, \\ \frac{2}{3n} \bar{\nabla} \cdot \bar{\mathbf{q}} + \zeta T = 0.$$

Це гідродинамічна модель гранульованого газу шару насіння. Проте питання, чи це моделювання гідродинаміки дійсно застосовується до гранульованих середовищ, чи ні, до цих пір є центром поточних дебатів [354].

Кінетичне визначення тензора тиску [334]:

$$\hat{\mathbf{P}}(\bar{\mathbf{r}}, t) = \int m(\bar{\mathbf{v}} - \bar{\mathbf{u}})(\bar{\mathbf{v}} - \bar{\mathbf{u}}) f(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{v}}, t) d\bar{\mathbf{v}}, \quad (2.161)$$

де $\bar{\mathbf{u}}$ – середній потік;
 $\bar{\mathbf{v}}$ – швидкість насінин.

P – скаляр, тому що тиск передбачається ізотропним. Однак P може бути діагональним тензором напруги в адекватному стані, коли газ анізотропний, з різними значеннями діагональних умов. Це ізотропне лише тоді, коли діагональні елементи рівні [334].

У всякому разі, тиск – це транспорт імпульсу, оскільки він є потоком

відносного моменту $m(\mathbf{v} - \mathbf{u})$.

Якщо розглядати наближення Нав'є-Стокса, то можна записати тензор тиску

$$P_{ij} = p\delta_{ij} - \eta \left(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i - \frac{2}{d} \delta_{ij} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} \right), \quad (2.162)$$

де $p = nk_B T$ – «гідростатичний» тиск, Па;

η – зсувна «в'язкість», Па·с.

Для стаціонарного стану вищевказане рівняння зводиться до класичного рівняння $p = \text{const}$.

В транспорті імпульсу беруть участь два механізми:

1. Рух вільних насінин призводять до передачі імпульсу. Тут «вільний» означає відсутність зіткнення між насінинами протягом розглянутого часу t .

2. Процес колізій участі в транспорті імпульсу. Для розбавленого гранульованого газу шару насіння частоту зіткнення можна знехтувати, припускаючи, що час t незначний.

Проте, це не стосується нерозбавленого та непругого гранульованого газу шару насіння, наприклад, коли сильне розсіювання відбувається в розведеному гранульованому газі або коли розглядається злегка непружна гранульована речовина з проміжною щільністю; в таких випадках ефект зіткнення не може бути знехтуваний.

Для отримання однорідного потоку, «температура» визначається як:

$$\int \frac{1}{2} m v^2 f(\bar{\mathbf{v}}, t) d\bar{\mathbf{v}} = \frac{3}{2} n T, \quad (2.163)$$

коли середнє значення v становить 0. Однак, поняття «температури» в гранульованій речовині залишається суперечливим [355, 356, 357]. «Температура» – це поняття рівноважної системи. Однак, гранульована система вже відхиляється від стану рівноваги термодинаміки через дисипацію нееластичного зіткнення та енергії, а також завдяки ефекту пам'яті [358].

Болдасари [356] обговорює термодинамічні концепції, особливо поняття «температури», засноване на теоремі флуктуаційно-дисипації, в різних

випадках: щільна, рідкоподібна та газоподібна поведінка гранульованих середовищ. Проте сама можливість послідовного побудови термодинаміки сумнівна через втрату енергії.

Деякі інші дослідники також сумніваються в гранульованій «температурі» [359]. Деякі намагаються уникати використання цієї концепції у своїй теорії [360].

У будь-якому випадку, тепер вводимо «температуру» гранульованого газу шару насіння. У стаціонарному стані загальна кінетична енергія коливається з простором і часом навколо незалежного від часу середнього значення. Припускаючи розподіл швидкостей $f(\bar{r}, \bar{v})$, визначають дві компоненти гранульованої «температури» (2D):

$$T_{i=x,y}(\bar{r}) = \frac{m}{\rho} \int_R dv_x \int_R dv_y f(\bar{r}, \bar{v}) (v_i - U_i(\bar{r}))^2, \quad (2.164)$$

де R – об'єм малих клітин, розташований на \bar{r} ;

ρ – щільність насінин;

$U_i(\bar{r})$ – середнє поле швидкості:

$$U(\bar{r}) = \frac{1}{\rho(\bar{r})} \int_R dv_x \int_R dv_y f(\bar{r}, \bar{v}) \bar{v}. \quad (2.165)$$

Загальна «температура» $T(\bar{r}) = [T_x(\bar{r}) + T_y(\bar{r})] / 2$. $U_i(\bar{r}) = 0$ у стаціонарному стані, отже, «температура» отримана лаконічно, як $T_x = \langle \sum v_x^2 \rangle$.

Отже, для визначення розподілу насіння на віброуючій поверхні необхідно довести належність його до розподілу Максвелла-Больцмана.

2.4.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією віброуючої поверхні

Для підтвердження розробленої фізико-математичної моделі гранульованого газу шару насіннєвого матеріалу, що переміщується під дією віброуючої поверхні необхідно було провести чисельне моделювання. Задачею даного моделювання було визначення функції розподілу насіння за фракціями.

За фізичні моделі були обрані наступні: k-ε модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії. Для побудови фізико-математичної моделі необхідно прийняти припущення про те, що насінини представляються у вигляді однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Для реалізації моделювання прийняті фізико-механічні властивості насіння: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 200-400 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Властивості середовища були наступні: середовище – повітря; динамічна в'язкість – 1,85508·10⁻⁵ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – 9,8 м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па. Розмір комірки сітки моделювання складав 0,001 м.

Для реалізації чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючої поверхні (рисунок 2.26).

Вібруюча поверхня мала форму квадрата із стороною 2 м. Поверхня виконує періодичний рух по трьох координатах за законом:

$$\begin{cases} x = A \cos \psi t \cos \alpha \cos \beta, \\ y = A \cos \psi t \sin \alpha \cos \beta, \\ z = A \cos \psi t \sin \beta. \end{cases} \quad (2.166)$$

де A – амплітуда коливань, м;

ψ – частота коливань, с⁻¹.

Кути нахилу решета α і β задається шляхом зміни кутів нахилу прискорення вільного падіння \bar{g} , що є абсолютно тотожним.

Потік маси насіння був представлений 5 фракціями насіння однаковою кількістю з різним масами 1000 насінин m_{1000} в діапазоні 18-58 г з кроком 10 г.

За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні технологічні параметри: подача насіння Q , кути нахилу решета α і β , частота коливань решета ψ , амплітуда коливань решета A і швидкість потоку повітря V (межі варіювання представлені в таблиці 2.5).

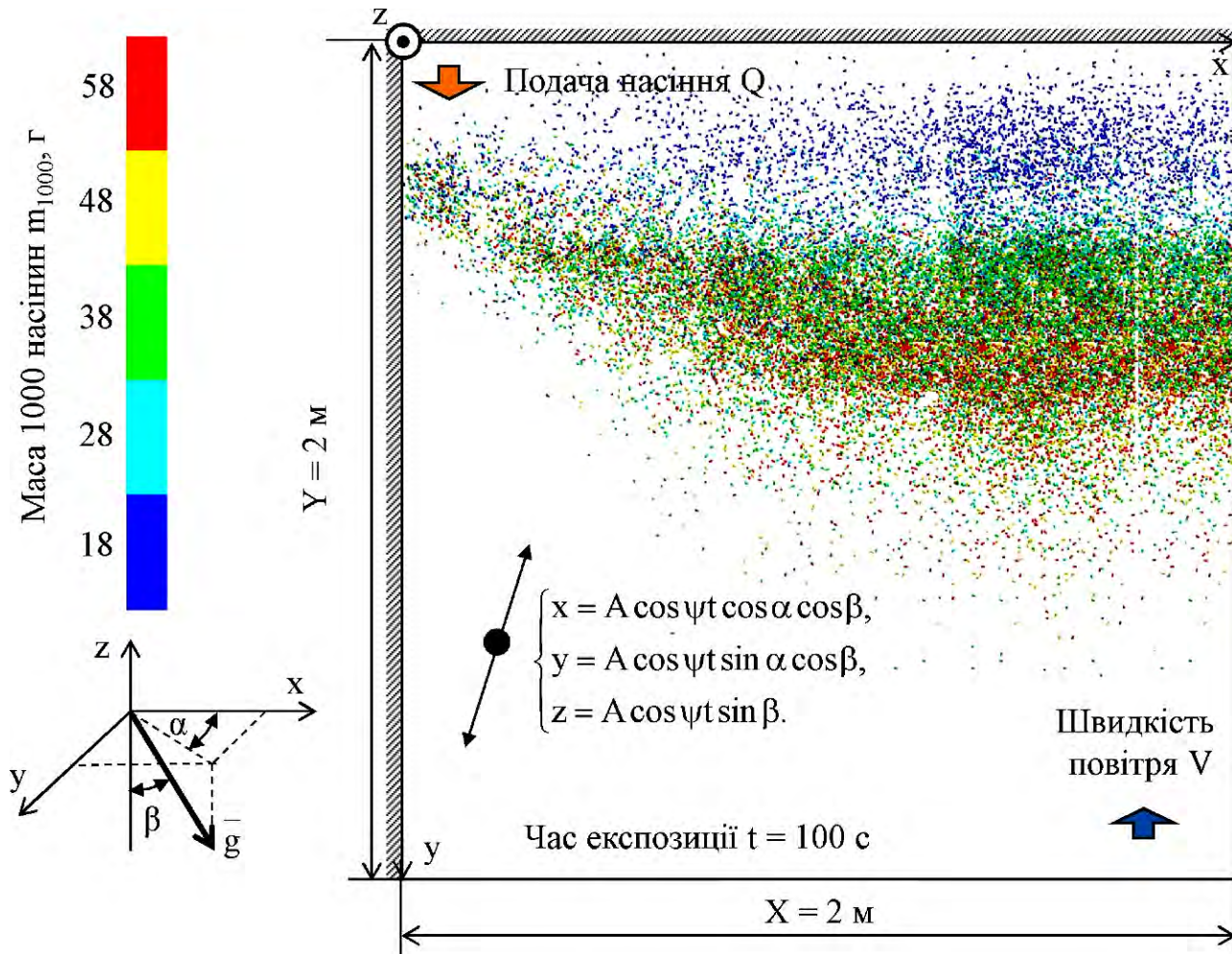


Рисунок 2.26 – Розрахункова схема процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією віброуючої поверхні

Повний факторний чисельний експеримент для 6 факторів і 3 рівнів варіації містить $3^6 = 729$ дослідів, що ускладнюється потужністю персонального комп'ютера і часу на обробку даних. Тому прийнято рішення провести чисельне моделювання з використанням некомпозиційного плану Бокса-Бенкіна для 6 факторів, матриця якого представлена в таблиці Ж.1. Тривалість експозиції складала 100 с.

Таблиця 2.5 – Рівні та інтервали варіацій факторів чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючої поверхні

Рівні варіацій факторів	Фактори					
	Подача насіння Q, кг/год (x ₁)	Кут нахилу α, ° (x ₂)	Кут нахилу β, ° (x ₃)	Частота коливань ψ, с ⁻¹ (x ₄)	Амплітуда коливань A, м (x ₅)	Швидкість повітря V, м/с (x ₆)
Нижній рівень (-)	1000	1	1	5	0,005	3
Основний рівень (0)	1400	3	3	7,5	0,01	3,5
Верхній рівень (+)	1800	5	5	10	0,015	4
Інтервал варіацій факторів	400	2	2	2,5	0,005	0,5

В результаті розділення насіння під дією вібруючої поверхні розподіл кожної фракції по його поверхні на виході (при $x = 2$ м) може бути представлений нормальним розподілом із визначеним середнім \bar{y} і середньоквадратичним відхиленням σ (рисунок 2.27). Для нормального розподілу в області $y \in [\bar{y} - 2\sigma; \bar{y} + 2\sigma]$ спостерігається ймовірність 95,45 %.

Відповідно до рисунку 2.27 найкраще розділення (95,45 %) досягається при умові:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{y}_5 - \bar{y}_1, \quad (2.167)$$

або

$$\chi = \frac{\bar{y}_5 - \bar{y}_1}{2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5} \rightarrow \max, \quad (2.168)$$

де χ – коефіцієнт заповнення.

Слід зазначити, що вся область була поділена на 200 однакових горизонтальних зон, для кожної з яких визначалось кількість насіння кожної фракції. Тривалість експозиції складала 100 с. За кількісний критерій оцінки

ефективності процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику під дією віброючої поверхні було прийнято продуктивність його на виході q .

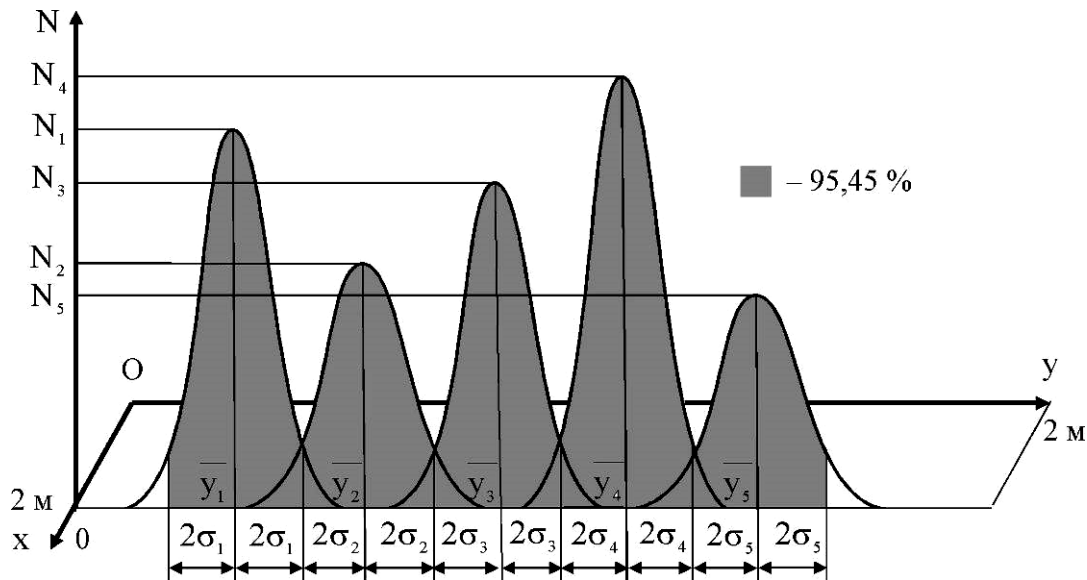


Рисунок 2.27 – Функції нормального розподілу кожної фракції по області

Під час моделювання необхідно було дослідити розподіл швидкостей насіння соняшнику і відповідне векторне поле швидкостей псевдорозрідженого шару насінневого матеріалу на віброючій поверхні.

Вищезазначені коефіцієнт заповнення χ , середні значення розподілу фракцій по довжині \bar{x} і їх середньоквадратичні відхилення σ характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників). Однак зазвичай у існуючих пневмовібросепараторах застосовуються забірники однакових розмірів, що ускладнює оцінку якості процесу сепарації. Тому введено ще один критерій якості розподілу фракцій в забірниках – коефіцієнт розподілу δ , який визначається за формулами (2.35)–(2.37).

2.4.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу під дією віброючої поверхні

В результаті моделювання (Додаток II) було отримано візуалізацію технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією віброючої поверхні (рисунок 2.28).

Відповідно для кожної фракції насіння на виході при $x = 2$ м було визначено коефіцієнт заповнення χ , коефіцієнт розподілу δ і продуктивність q , які зведені в таблицю Ж.2.

Згідно даних таблиці Ж.2 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав продуктивність q із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 q = & 1212,39 + 257,064 x_1 + 10,3793 x_1^2 + 253,53 x_2 + 75,7784 x_1 x_2 - \\
 & - 204,207 x_2^2 + 38,53 x_3 - 0,155904 x_1 x_3 + 8,34313 x_2 x_3 - 17,7946 x_3^2 + \\
 & + 74,2013 x_4 + 27,6348 x_1 x_4 - 9,18151 x_2 x_4 - 13,3003 x_3 x_4 - \\
 & - 57,2085 x_4^2 + 54,5292 x_5 + 31,7568 x_1 x_5 - 83,7372 x_2 x_5 + \\
 & + 37,4637 x_3 x_5 - 108,713 x_4 x_5 - 88,692 x_5^2 + 29,7337 x_6 - \\
 & - 0,836214 x_1 x_6 - 28,0576 x_2 x_6 - 7,63758 x_3 x_6 - 60,9012 x_4 x_6 - \\
 & - 4,16379 x_5 x_6 - 8,8966 x_6^2.
 \end{aligned} \tag{2.169}$$

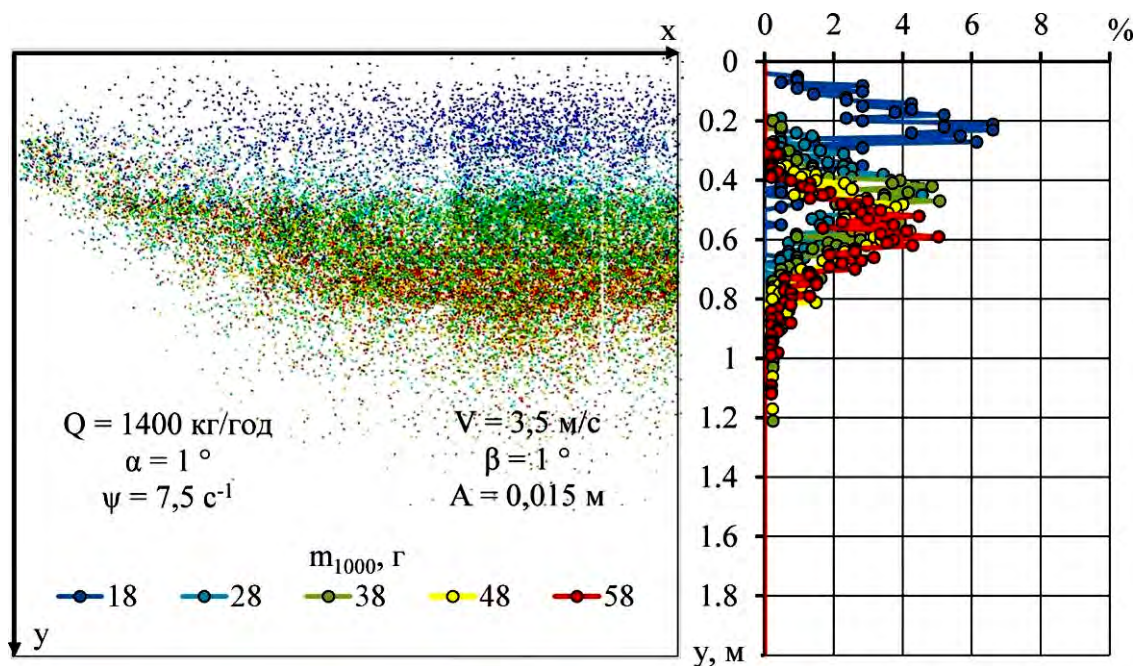


Рисунок 2.28 – Розподіл фракцій насіння на виході при $x = 2$ м під дією віброуючої поверхні

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,97$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(54) = 2,01$ значущими на рівні довірчої ймовірності

більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1x_2 , x_2^2 , x_3 , x_4 , x_1x_4 , x_4^2 , x_5 , x_1x_5 , x_2x_5 , x_3x_5 , x_4x_5 , x_5^2 , x_6 , x_2x_6 , x_4x_6 .

У розкодованому вигляді модель (2.169) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned}
 q = & -3448,66 + 482,402 \alpha - 51,0518 \alpha^2 + 138739 A - 8373,72 \alpha A - \\
 & - 3,54768 \cdot 10^6 A^2 - 18,1987 \beta + 3746,37 A \beta - 0,00755229 Q + \\
 & + 0,094723 \alpha Q + 15,8784 A Q + 509,047 V - 28,0576 \alpha V + \quad (2.170) \\
 & + 385,786 \psi - 8697,01 A \psi + 0,0276348 Q \psi - 48,721 V \psi - \\
 & - 9,15336 \psi^2.
 \end{aligned}$$

Оптимальними параметрами рівняння (2.170) при умові максимуму продуктивності:

$$\begin{aligned}
 q = 1750 \text{ кг/год}, Q = 1800 \text{ кг/год}, \alpha = 4,9^\circ, \beta = 5,0^\circ, \\
 \psi = 10,0 \text{ с}^{-1}, A = 0,0082 \text{ м}, V = 3,0 \text{ м/с}. \quad (2.171)
 \end{aligned}$$

Графічна інтерпретація залежності (2.170) представлена на рисунку 2.29.

Як видно з рисунку 2.29: із збільшенням подачі насіння Q продуктивність q збільшується лінійно; із збільшенням кута нахилу α і частоти коливань ψ продуктивність q збільшується за параболою; швидкість повітряного потоку V і кута нахилу β практично не впливають на продуктивність q ; а для амплітуди коливань A спостерігається оптимум при якому продуктивність q приймає максимальне значення. Зазначені спостереження стосовно подачі насіння, кута нахилу, частоти коливань і швидкості повітряного потоку є очевидними. Однак із збільшенням амплітуди коливань до певного значення продуктивність збільшується, що пояснюється наданням насінням кінетичної енергії, яка витрачається на їх переміщення. Із подальшим збільшенням амплітуди продуктивність зменшується. Це відбувається через те що коливання насіння у вертикальному напрямку резонує з коливаннями віброуючої поверхні і насінням вже не передається достатньої кількості кінетичної енергії.

Згідно даних таблиці Ж.2 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав коефіцієнт заповнення χ із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
\chi = & 37,6049 + 1,67394 x_1 + 3,27051 x_1^2 - 6,01546 x_2 - 0,617614 x_1 x_2 + \\
& + 0,898936 x_2^2 + 2,14964 x_3 + 1,55133 x_1 x_3 - 1,51208 x_2 x_3 - \\
& - 4,5483 x_3^2 - 16,8433 x_4 - 1,37336 x_1 x_4 + 5,95279 x_2 x_4 - \\
& - 1,59854 x_3 x_4 + 10,2985 x_4^2 - 6,36769 x_5 + 1,47877 x_1 x_5 + \\
& + 0,0303224 x_2 x_5 - 1,03661 x_3 x_5 + 8,00968 x_4 x_5 - 0,285952 x_5^2 + \\
& + 4,9604 x_6 - 0,496273 x_1 x_6 + 0,6043 x_2 x_6 - 7,24514 x_3 x_6 + \\
& + 1,78884 x_4 x_6 - 0,322409 x_5 x_6 - 5,78069 x_6^2.
\end{aligned} \tag{2.172}$$

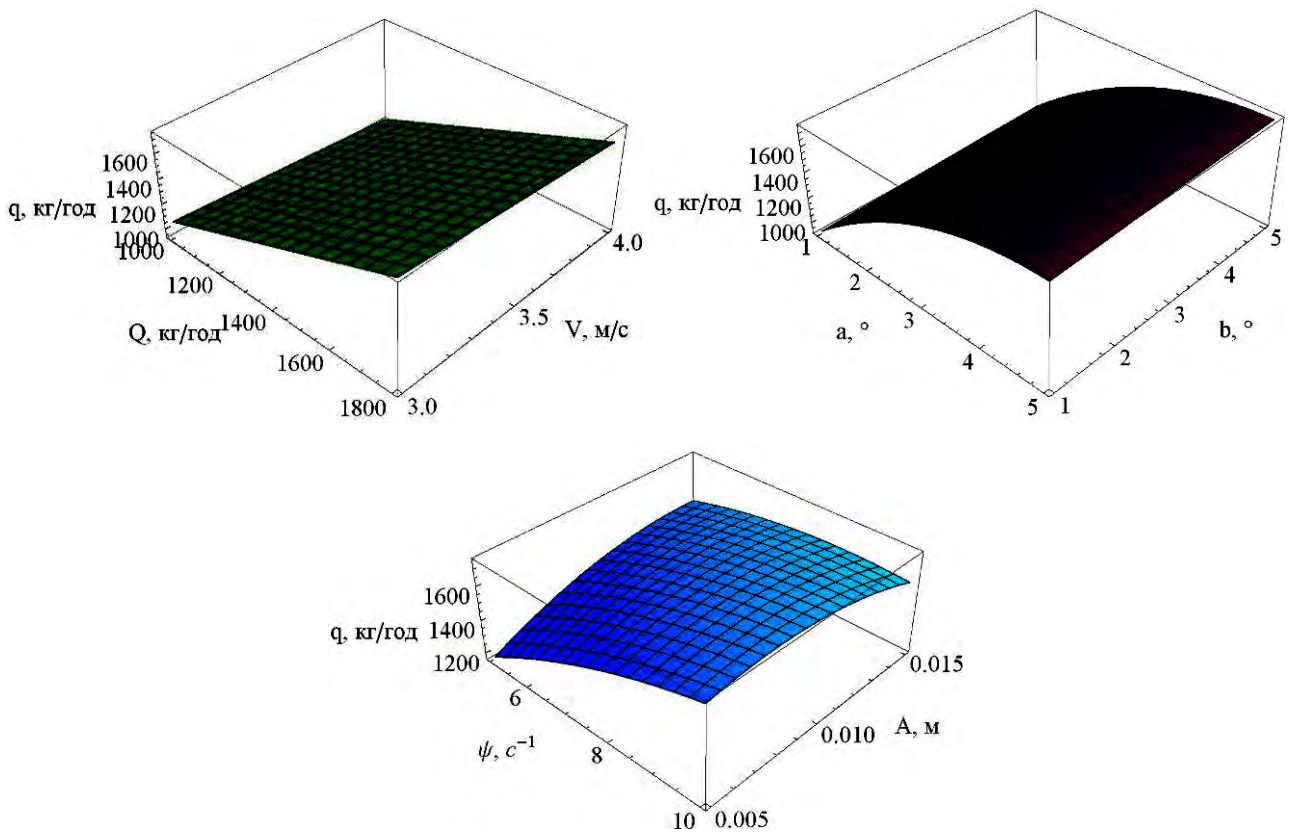


Рисунок 2.29 – Залежність продуктивності q від подачі насіння Q , кутів нахилу віброуючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A і швидкості повітряного потоку V при оптимальних параметрах (2.171)

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,97$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(81) = 2,01$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1 , x_1^2 , x_2 , x_3 , x_1x_3 , x_2x_3 , x_3^2 , x_4 , x_1x_4 , x_2x_4 , x_3x_4 , x_4^2 , x_5 , x_1x_5 , x_4x_5 , x_6 , x_3x_6 , x_4x_6 , x_6^2 .

У розкодованому вигляді модель (2.172) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned} \chi = & -69,5749 - 11,9369 \alpha - 7114,48 A + 35,6531 \beta - 1,13708 \beta^2 - \\ & - 0,0501428 Q + 0,739384 A Q + 0,0000204407 Q^2 + 182,782 V - \\ & - 7,24514 b V - 23,1227 V^2 - 43,56 \psi + 1,19056 \alpha \psi + 640,774 A \psi - \\ & - 0,319708 \beta \psi - 0,00137336 Q \psi + 1,43108 V \psi + 1,64776 \psi^2. \end{aligned} \quad (2.173)$$

Оптимальними параметрами рівняння (2.173) при умові максимуму коефіцієнта заповнення

$$\begin{aligned} \chi = 93,56 \%, Q = 1000 \text{ кг/год}, \alpha = 1,0^\circ, \beta = 3,7^\circ, \\ \psi = 5,0 \text{ с}^{-1}, A = 0,005 \text{ м}, V = 3,51 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (2.174)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.173) представлена на рисунку 2.30.

Як видно з рисунку 2.30: із збільшенням подачі насіння Q і кута нахилу β коефіцієнт заповнення χ збільшується за параболою; із збільшенням кута нахилу решета α і амплітуди коливань A коефіцієнт заповнення χ зменшується лінійно; а для швидкості повітряного потоку V спостерігається оптимум при якому коефіцієнта заповнення χ приймає максимальне значення. Як вже було визначено кут нахилу α і амплітуди коливань головним чином впливають на продуктивність, тобто насіння при збільшенні кута нахилу α і амплітуди коливань переміщуються до краю вібруючої поверхні із більш високою швидкістю. Це призводить до того що фракції насінневої суміші не встигають розподілитися по площі вібруючої поверхні. З іншого боку кут нахилу β є характеристикою розподілу фракції насінневої суміші по площі вібруючої поверхні. Оптимум швидкості повітряного потоку при максимальному значенні коефіцієнту розподілу можна пояснити розглянувши час перебування насінини у повітрі. Так, якщо час перебування насінини менший за період коливань вібруючої поверхні, то насінина отримує достатню кінетичну енергію для її переміщення по поверхні вздовж кута нахилу β . І навпаки: якщо час перебування насінини більший за період коливань вібруючої поверхні, то насінина не отримує достатню кінетичну енергію і тому фракції насінневої суміші не в змозі рівномірно розподілитися по поверхні.

Згідно даних таблиці Ж.2 з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав коефіцієнт розподілу δ із факторами досліджень у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta = & 68,588 + 1,84293 x_1 + 2,76191 x_1^2 - 2,73251 x_2 + 1,75946 x_1 x_2 - \\ & - 1,74354 x_2^2 + 2,02803 x_3 + 2,18698 x_1 x_3 + 1,07603 x_2 x_3 - \\ & - 5,89637 x_3^2 - 9,2933 x_4 - 1,87299 x_1 x_4 + 1,16204 x_2 x_4 - \\ & - 1,91479 x_3 x_4 + 5,30418 x_4^2 - 1,04358 x_5 - 1,97906 x_1 x_5 + \quad (2.175) \\ & + 0,739266 x_2 x_5 - 2,73603 x_3 x_5 - 0,312529 x_4 x_5 - 2,7501 x_5^2 + \\ & + 5,4587 x_6 - 0,402829 x_1 x_6 + 1,65037 x_2 x_6 - 7,90544 x_3 x_6 + \\ & + 0,175071 x_4 x_6 - 1,13581 x_5 x_6 - 6,18221 x_6^2. \end{aligned}$$

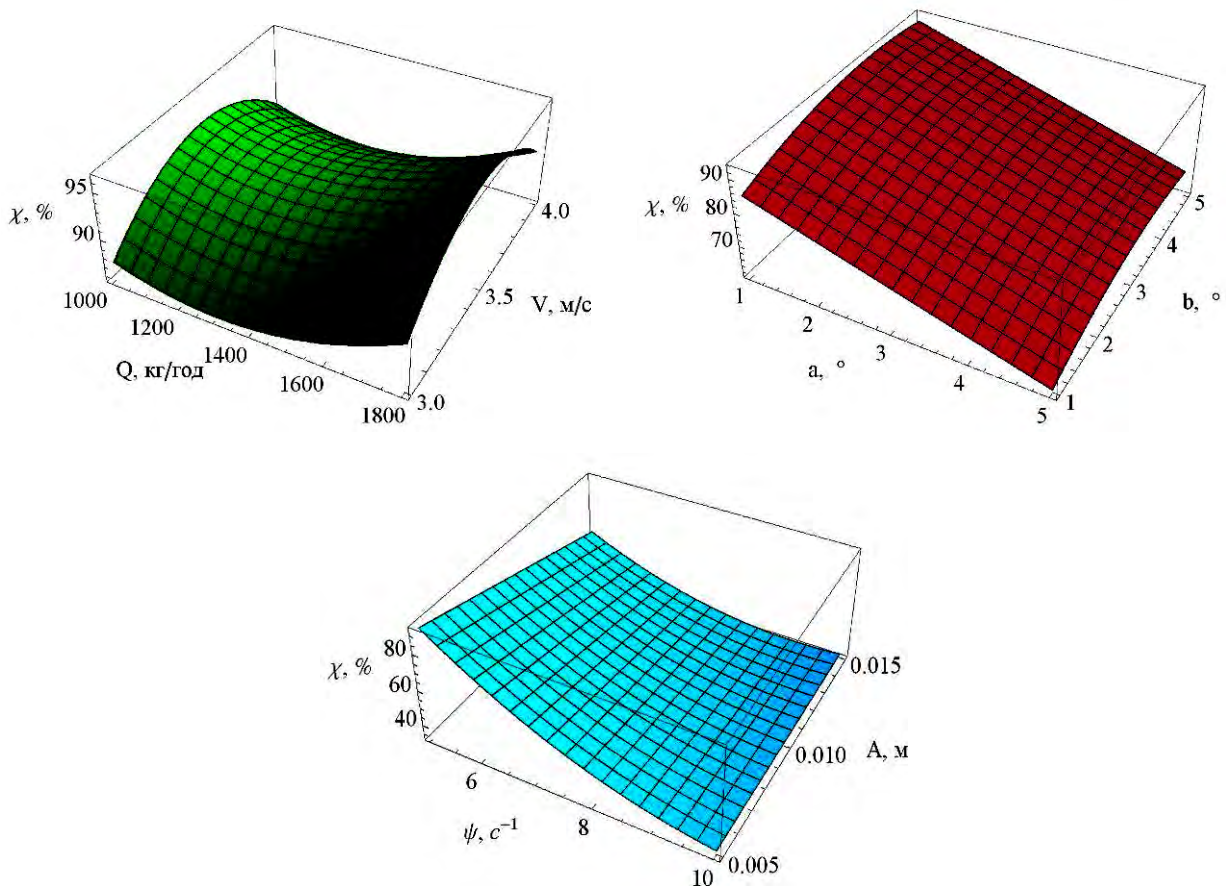


Рисунок 2.30 – Залежність коефіцієнта заповнення χ від подачі насіння Q , кутів нахилу віброуючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A і швидкості повітряного потоку V при оптимальних параметрах (2.174)

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,94$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(81) = 2,01$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: $x_1, x_1^2, x_2, x_1x_2, x_2^2, x_3, x_1x_3, x_2x_3, x_3^2, x_4, x_1x_4, x_2x_4, x_3x_4, x_4^2, x_5, x_1x_5, x_2x_5, x_3x_5, x_5^2, x_6, x_2x_6, x_3x_6, x_5x_6, x_6^2$.

У розкодованому вигляді модель (2.175) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned} \delta = & -295,934 - 10,8956 \alpha - 0,435885 \alpha^2 + 5565,86 A + 73,9266 \alpha A - \\ & - 110004, A^2 + 38,5016 \beta + 0,269007 \alpha \beta - 273,603 A \beta - 1,47409 \beta^2 - \\ & - 0,0345825 Q + 0,00219932 \alpha Q - 0,989529 A Q + 0,00273373 \beta Q + \\ & + 0,0000172619 Q^2 + 207,328 V + 1,65037 \alpha V - 454,323 A V - \\ & - 7,90544 \beta V - 24,7288 V^2 - 13,3735 \psi + 0,232407 \alpha \psi - \\ & - 0,382959 \beta \psi - 0,00187299 Q \psi + 0,848669 \psi^2. \end{aligned} \quad (2.176)$$

Оптимальними параметрами рівняння (2.176) при умові максимуму коефіцієнта розподілу

$$\begin{aligned} \delta = 93,9 \%, Q = 1800 \text{ кг/год}, \alpha = 1,8^\circ, \beta = 4,4^\circ, \\ \psi = 5,0 \text{ с}^{-1}, A = 0,005 \text{ м}, V = 3,5 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (2.177)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.176) представлена на рисунку 2.31.

Як видно з рисунку 2.31: із збільшенням подачі насіння Q коефіцієнт розподілу δ збільшується за параболою; із збільшенням кута нахилу решета α і частоти коливань ψ коефіцієнт розподілу δ зменшується; амплітуди коливань A практично не впливає на коефіцієнт розподілу δ ; для швидкості повітряного потоку V і кута нахилу β спостерігається оптимум при якому коефіцієнт заповнення χ приймає максимальне значення. Пояснення фізичного змісту наведених залежностей такий самий, як і для коефіцієнту заповнення.

Аналіз представлених залежностей доводить про необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією віброуючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому коефіцієнт розподілу δ повинен бути максимальним:

$$\begin{cases} q(Q, \alpha, \beta, \psi, A, V) = Q, \\ \delta(Q, \alpha, \beta, \psi, A, V) \rightarrow \max, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.178)$$

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (2.178) є

$$\begin{aligned} \delta &= 74,21 \%, Q = q = 1092 \text{ кг/год}, \alpha = 3,5^\circ, \beta = 3,9^\circ, \\ \psi &= 5,0 \text{ с}^{-1}, A = 0,013 \text{ м}, V = 4 \text{ м/с}. \end{aligned} \quad (2.179)$$

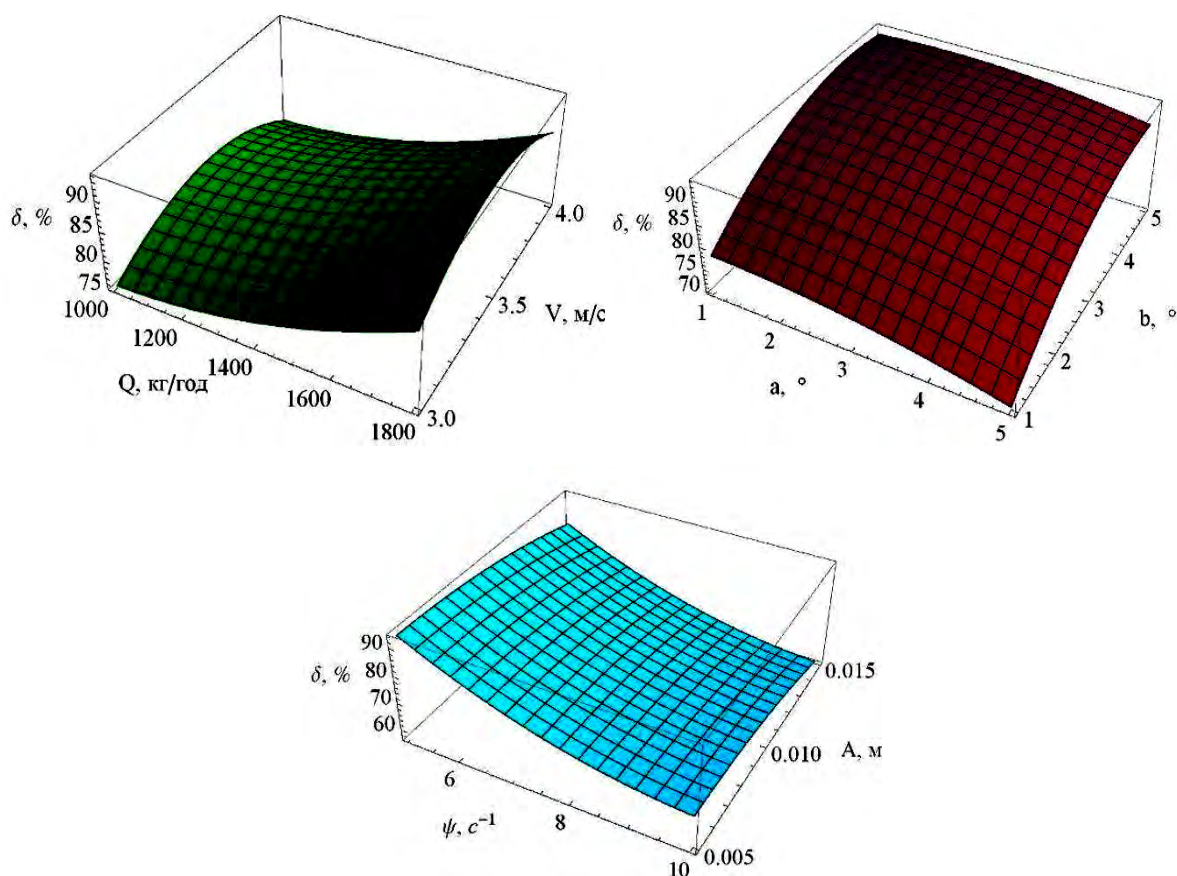


Рисунок 2.31 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від подачі насіння Q , кутів нахилу віброуючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A і швидкості повітряного потоку V при оптимальних параметрах (2.177)

Окрім визначення раціональних режимних параметрів процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику під дією віброуючої поверхні було

досліджено зміну градієнта швидкості псевдорозрідженого шару. Графічна візуалізація представлена на рисунку 2.32.

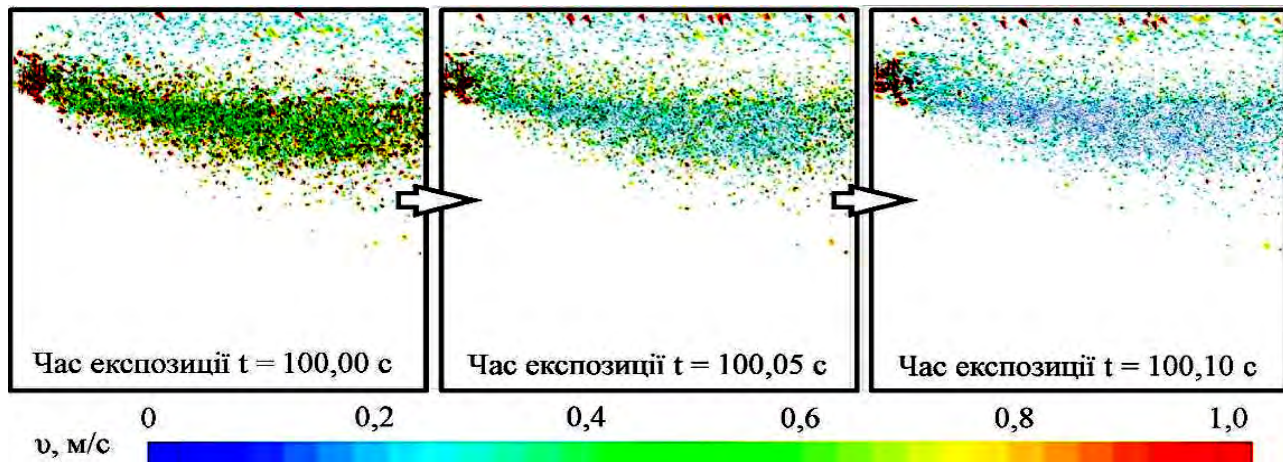


Рисунок 2.32 – Зміна градієнта швидкості псевдорозрідженого шару при оптимальних параметрах (2.179)

2.5 Теоретичні дослідження процесу сепарації насіння соняшнику фотоелектронним сепаратором

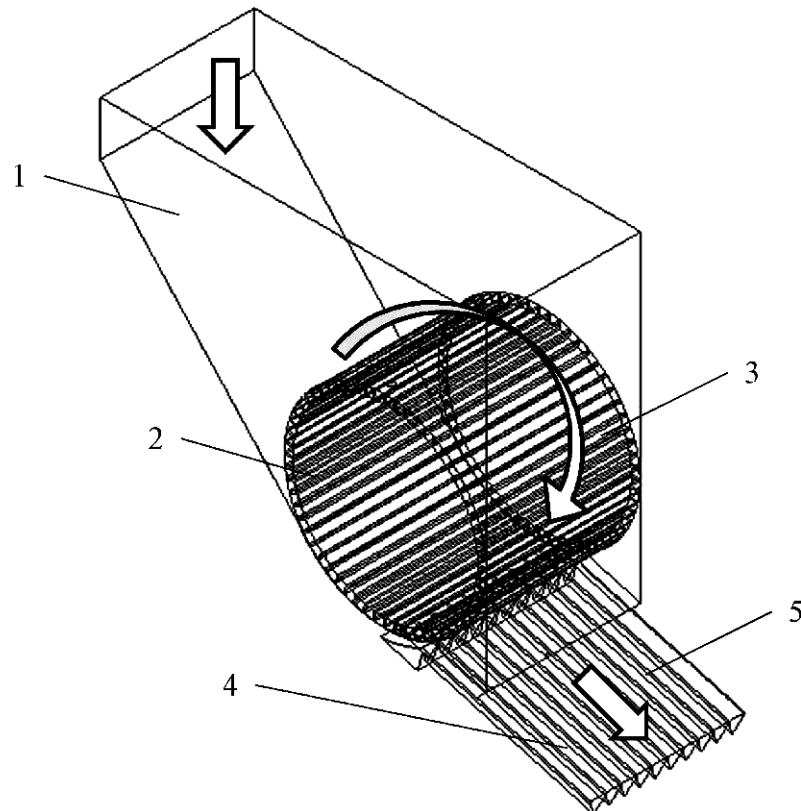
2.5.1 Фізико-математичний апарат руху насіння по лопаті барабана

Фотоелектронний сепаратор складається з трьох блоків: блок подачі насіння, блок розпізнавання насіння і блок виходу насіння. Тому, необхідно дослідити всі блоки окремо, визначити діапазони їх конструктивно-режимних параметрів, узгодити їх між собою, і визначити раціональні конструктивно-режимні параметри фотоелектронного сепаратора в зборі.

Спочатку розглянемо блок подачі насіння фотоелектронного сепаратора (рисунок 2.33), який складається з бункеру 1, барабана 2 із радіально розташованими лопатями 3 і вібрлотка 4 із повздовжніми каналами 5.

Блок подачі насіння фотоелектронного сепаратора працює наступним чином. Насіння під дією сили тяжіння потрапляє в бункер 1. Далі барабан 2 із радіально розташованими лопатями 3, виконуючи обертальний рух, захоплює насіння з бункеру 2 і переносить до вібрлотка 4. Вібрлоток 4 розташований

під кутом до горизонту виконує періодичне поперечне переміщення з одного боку до іншого змушуючи насіння рухатися вздовж повздовжніх каналів 5. Після чого насіння покидає вібрлоток 4 і потрапляє до наступного блока фотоелектронного сепаратора.



1 – бункер; 2 – барабан; 3 – лопаті; 4 – вібрлоток; 5 – повздовжні канали

Рисунок 2.33 – Конструктивно-технологічна схема блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Конструктивно-технологічними параметрами, які необхідно дослідити є: зовнішній радіус барабана r_0 , довжина лопаті l , кількість лопатей N , частота обертання барабана n , подача насіння Q , частота коливань вібрлотка ψ , амплітуда коливань вібрлотка A .

Розмір лопаті барабана залежить від геометричних розмірів насінини, яку вона захоплює. Тому, спираючись на різноманіття насіння соняшнику приймаємо середнє значення довжини насінини $0,008 \pm 0,002$ м. Тоді $l = 0,01$ м. Кількість лопатей можна розрахувати за формулою:

$$N = \left[\frac{2\pi(r_0 - 1)}{1} + 1 \right], \quad (2.180)$$

де r_0 – зовнішній радіус барабана, м;

l – довжина лопаті, м;

N – кількість лопатей.

Приймаючи зовнішній радіус барабана $r_0 = 0,07$ м отримуємо $N = 38$.

Надання насінині кінетичної енергії забезпечує переміщення її по лопаті під дією інерційних сил, що завершується її сходом. При розрахунках параметрів переміщення насінини лопаттю вихідними даними є частота обертання барабана і його радіус та початкове положення насінини [361, 362, 363, 364].

На насінину, яка потрапила на лопать, діють наступні сили: сила тяжіння F_g , нормальна реакція F_N , сила інерції F_{in} , сила Кориоліса F_K , сила тертя F_f і відцентрова сила F_ω (рисунок 2.34).

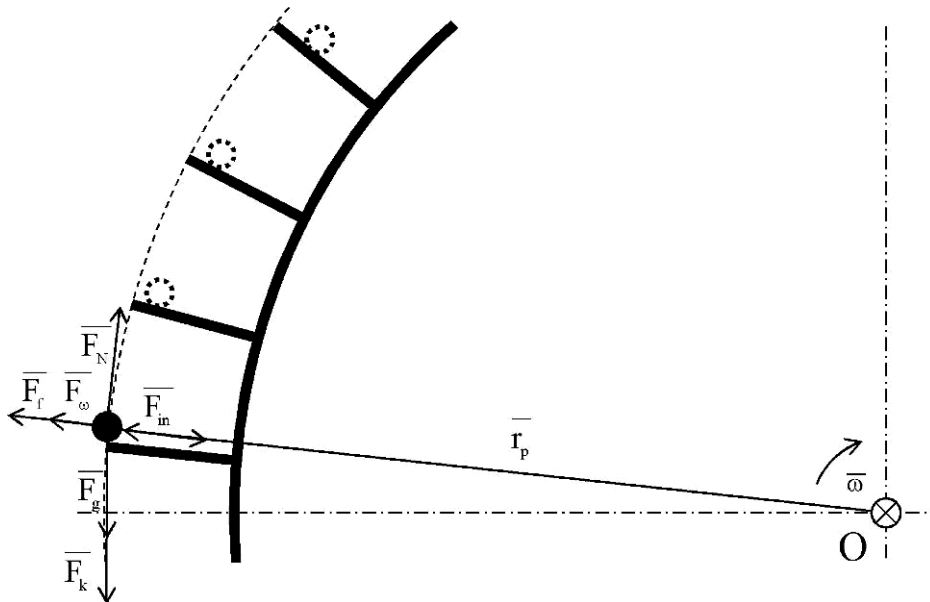


Рисунок 2.34 – Розрахункова схема сил, що діють на насінину, яка потрапила на лопать

Розглядаючи умову рівноваги насінини, що розташована на лопаті (рисунок 2.34), запишемо її рівняння у векторному вигляді

$$\overline{F}_{in} = \overline{F}_g + \overline{F}_\omega + \overline{F}_k + \overline{F}_f + \overline{F}_N, \quad (2.181)$$

де \overline{F}_{in} – сила інерції, що діє на насінину, Н:

$$\overline{F}_{in} = \Omega_p \cdot \rho_p \frac{d\overline{V}_p}{dt}; \quad (2.182)$$

Ω_p – об'єм насінини, м³;

ρ_p – щільність насінини, кг/м³;

\overline{V}_p – вектор швидкості руху насінини $\overline{V}_p = \frac{d\overline{r}_p}{dt}$, м/с;

t – час, с;

\overline{F}_g – сила тяжіння, що діє на насінину, Н:

$$\overline{F}_g = \Omega_p \cdot \rho_p \cdot \overline{g}; \quad (2.183)$$

\overline{g} – прискорення вільного падіння, м/с²;

\overline{F}_ω – відцентрова сила, спрямована уздовж миттєвого радіуса переносного обертання точки, Н:

$$\overline{F}_\omega = \Omega_p \cdot \rho_p \cdot \omega^2 \cdot \overline{r}_p; \quad (2.184)$$

\overline{r}_p – поточний радіус-вектор положення частки, м;

ω – циклічна частота обертання лопаті, с⁻¹;

$$\omega = 2\pi n; \quad (2.185)$$

n – частота обертання лопаті, об/с;

\overline{F}_k – сила Коріоліса, спрямована по нормалі до вектору кутової швидкості і вектору нормальної швидкості обертання барабана, Н:

$$\overline{F}_k = 2\Omega_p \cdot \rho_p \cdot \left[\frac{d\overline{r}_p}{dt} \times \overline{\omega} \right]; \quad (2.186)$$

\overline{F}_f – сила тертя, її напрямок протилежно силі інерції, Н:

$$\overline{F}_f = f \cdot F_N \cdot \frac{\overline{F}_{in}}{F_{in}}; \quad (2.187)$$

f – коефіцієнт тертя руху частки по лопаті;

\bar{F}_N – нормальна реакція лопаті на насінину, що перпендикулярна поверхні лопаті, Н.

Підставляючи (2.182)-(2.187) в рівняння (2.181) маємо:

$$\Omega_p \rho_p \frac{d\bar{V}_p}{dt} = \Omega_p \rho_p \bar{g} + 4\Omega_p \rho_p \pi^2 n^2 \bar{r}_p + 4\Omega_p \rho_p \pi n \left[\frac{d\bar{r}_p}{dt} \times \bar{e}_\omega \right] + f \bar{F}_N \frac{\bar{F}_{in}}{\bar{F}_{in}} + \bar{F}_N. \quad (2.188)$$

Проекції на вісь r і перпендикулярну їй вісь рівняння (2.188) приймає вигляд:

$$\begin{cases} \Omega_p \rho_p \frac{d^2 r_p}{dt^2} = \Omega_p \rho_p g \cdot \sin \varphi + 4\Omega_p \rho_p \pi^2 n^2 r_p - f \bar{F}_N, \\ \bar{F}_N = \Omega_p \rho_p g \cos \varphi + 4\Omega_p \rho_p \pi n \cdot \frac{dr_p}{dt}, \end{cases} \quad (2.189)$$

або

$$\frac{d^2 r_p}{dt^2} + 4\pi n f \frac{dr_p}{dt} - 4\pi^2 n^2 r_p = g(\sin \varphi - f \cos \varphi), \quad (2.190)$$

де φ – кут повороту лопаті, рад:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t. \quad (2.191)$$

де φ_0 – початковий кут повороту лопаті, рад:

Остаточно маємо:

$$\frac{d^2 r_p}{dt^2} + 4\pi n f \frac{dr_p}{dt} - 4\pi^2 n^2 r_p = g[\sin(\varphi_0 + 2\pi n t) - f \cos(\varphi_0 + 2\pi n t)], \quad (2.192)$$

або

$$\frac{d^2 r_p}{dt^2} + 4\pi n f \frac{dr_p}{dt} - 4\pi^2 n^2 r_p = g\sqrt{1+f^2} \sin\left(\varphi_0 + 2\pi n t - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right). \quad (2.193)$$

Рішенням диференційного рівняння (2.193) є:

$$\begin{aligned} r_p(t) = & C_1 \exp\left[2\pi n t(-f - \sqrt{1+f^2})\right] + C_2 \exp\left[2\pi n t(-f + \sqrt{1+f^2})\right] - \frac{g}{8\pi^2 n^2 \sqrt{1+f^2}} \times \\ & \times \left[f \cos\left(2\pi n t + \varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \sin\left(2\pi n t + \varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right], \end{aligned} \quad (2.194)$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування.

Граничними умовами для рівняння (2.194) є

$$\begin{aligned} r_p'(0) &= 0, \\ r_p(0) &= r_0, \end{aligned} \quad (2.195)$$

Підставляючи (2.194) в (2.195) маємо

$$\begin{cases} r_0 = C_1 + C_2 + \frac{g}{8\pi^2 n^2 \sqrt{1+f^2}} \left[f \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right], \\ 0 = 2\pi n(-f - \sqrt{1+f^2})C_1 + 2\pi n(-f + \sqrt{1+f^2})C_2 - \\ - \frac{g}{4\pi n \sqrt{1+f^2}} \left[-f \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right], \end{cases} \quad (2.196)$$

З виразу (2.195) знайдемо константи інтегрування:

$$\begin{cases} C_1 = \left[r_0 \frac{\sqrt{1+f^2} - f}{2\sqrt{1+f^2}} - \frac{g(\sqrt{1+f^2} - f)}{16\pi^2 n^2 (1+f^2)} \left[f \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{g}{16\pi^2 n^2 (1+f^2)} \left[-f \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right] \right] \\ C_2 = \left[\frac{g}{16\pi^2 n^2 (1+f^2)} \left[-f \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right] - \right. \\ \left. - \frac{g(f + \sqrt{1+f^2})}{16\pi^2 n^2 (1+f^2)} \left[f \cos\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) + \sin\left(\varphi_0 - \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}\right) \right] + r_0 \frac{f + \sqrt{1+f^2}}{2\sqrt{1+f^2}} \right] \end{cases} \quad (2.197)$$

Приймаючи деякі конструктивно-технологічні параметри робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора ($f = 0,6$; $\varphi_0 = 0$; $r_0 = 0,07$ м) отримуємо графічні залежності зміни модуля радіус-вектора насінини (рисунок 2.35) і її швидкості (рисунок 2.36) від часу для різних значень частоти обертання барабана.

Окрім графічного представлення на рисунках 2.35 і 2.36 може служити залежність швидкості переміщення насінини від модуля її радіус-вектора (рисунок 2.37) для попереднього уявлення характеру і розрахунку параметрів сходу маси з лопаті в залежності від частоти обертання барабана.

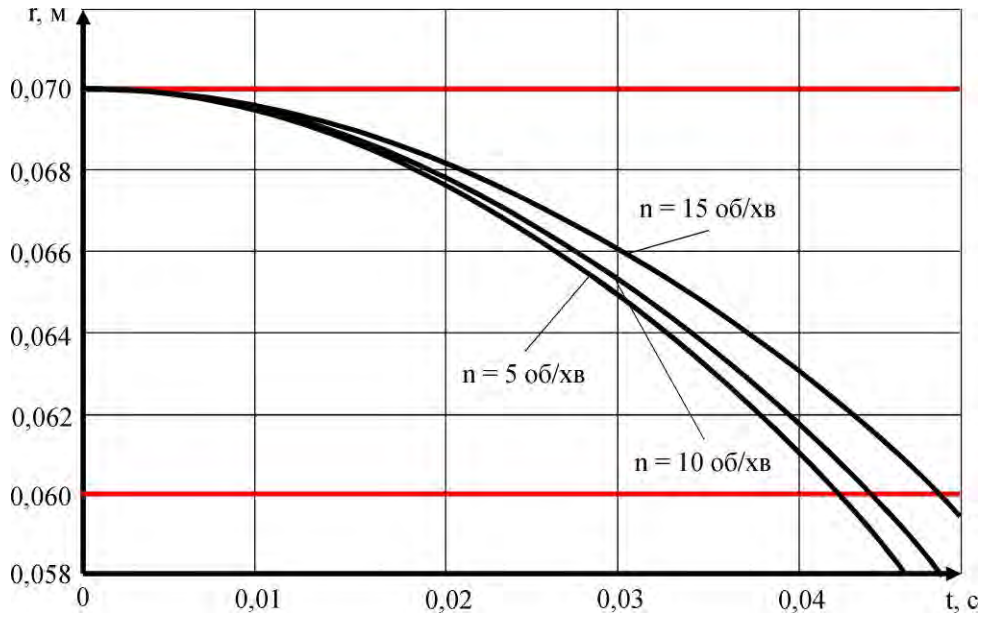


Рисунок 2.35 – Зміна модуля радіус-вектора r насінини від часу t для різних значень частоти обертання барабана n

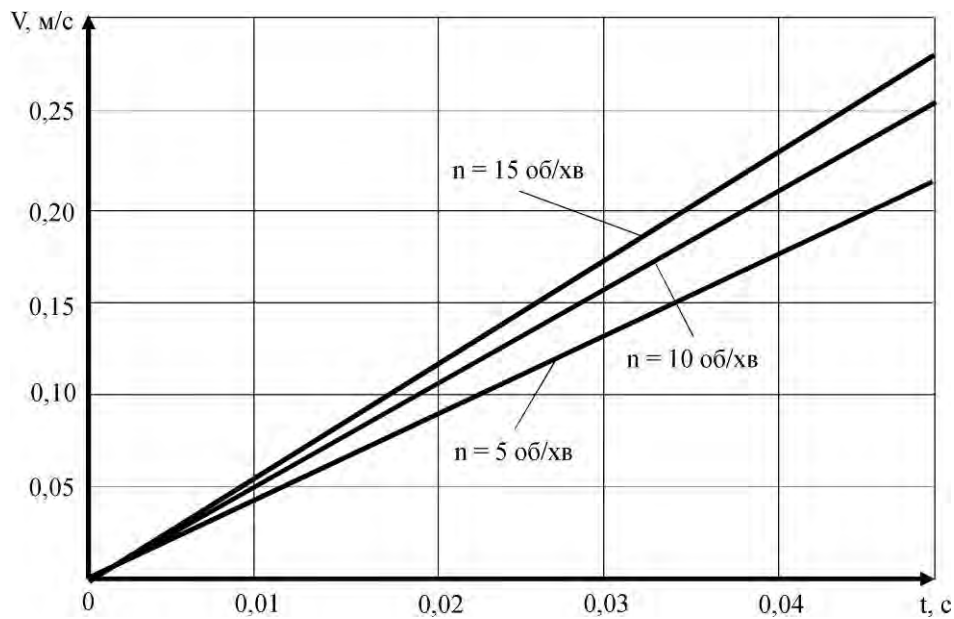


Рисунок 2.36 – Зміна модуля швидкості V насінини від часу t для різних значень частоти обертання барабана n

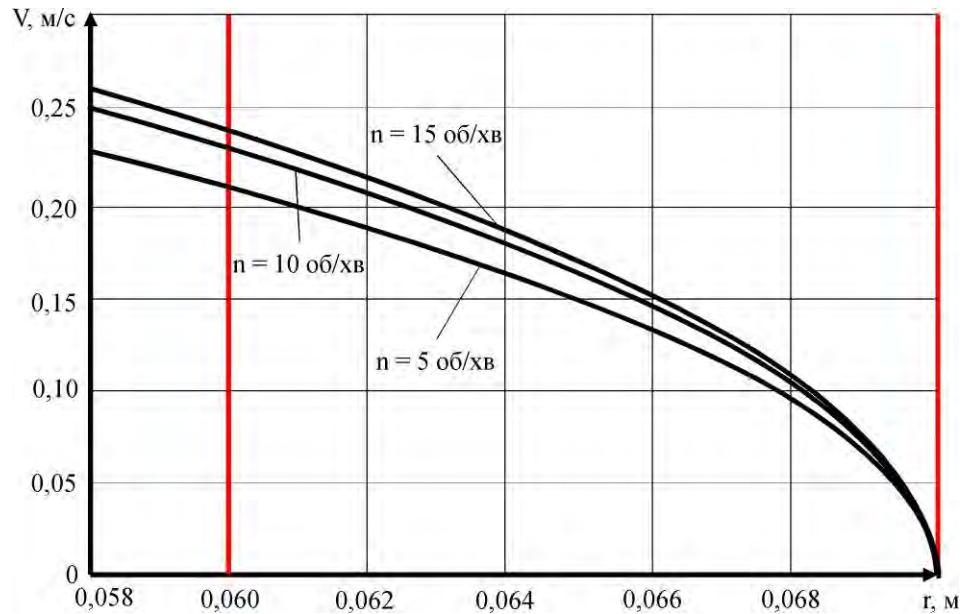


Рисунок 2.37 – Залежність швидкості переміщення насіння V від модуля її радіус-вектора r для різних значень частоти обертання барабана n

В результаті аналітичних досліджень розроблена фізико-математична модель руху насіння по лопаті барабана, згідно якої встановлена залежність швидкості переміщення насіння V від модуля її радіус-вектора r для різних значень частоти обертання барабана n .

2.5.2 Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі

Для визначення раціональних режимних параметрів роботи робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора реалізуємо відповідні фізичні моделі в програмному пакеті STAR-CCM+. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: k - ϵ модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії. Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжових моделей багатофазного середовища. Однак для побудови фізико-математичної моделі необхідно

прийняти припущення про те що насінини представляються у вигляді однакових еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Були прийняті фізико-механічні властивості насіння: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 400 кг/м³; ефективний діаметр – 0,008 м; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. 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. Розмір комірки сітки моделювання складав 0,001 м.

Для спрощення математичних і часових операцій були прийняті наступні конструктивно-технологічні параметри блока подачі насіння: амплітуда коливань вібротка $A = 0,008$ м (відповідає розміру каналу вібротка); зовнішній радіус барабана $r_0 = 0,07$ м; кількість лопатей $N = 38$; довжина лопаті $l = 0,01$ м.

Для реалізації чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора (рисунок 2.38).

За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні технологічні параметри: подача насіння Q , частота коливань вібротка ψ , частота обертання барабана n (межі варіювання представлені в таблиці 2.6).

Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^3 = 27$, матриця якого представлена в таблиці К.1.

В якості критеріїв оцінки технологічного процесу було обрано продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q і середній інтервал часу між падаючим насінням t . Слід зазначити, що віброток складається з 10 однакових повздовжніх каналів, по яких переміщуються насіння. Тривалість експозиції складала 100 с.

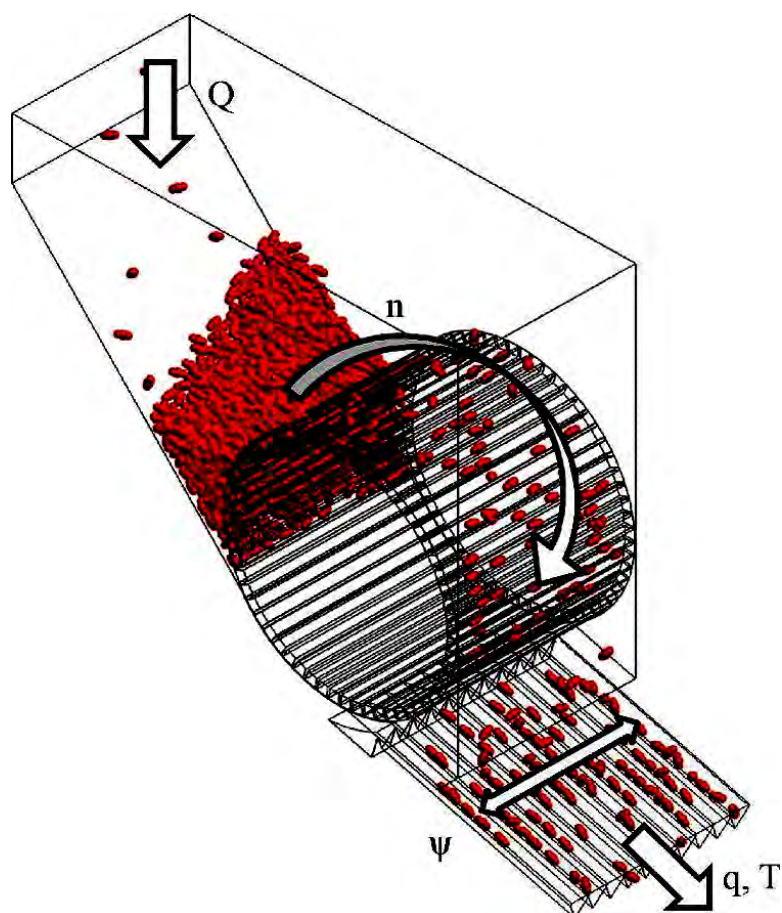


Рисунок 2.38 – Розрахункова схема процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Таблиця 2.6 – Рівні та інтервали варіацій факторами чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Подача насіння Q , кг/год (x_1)	Частота коливань віброточки ψ , s^{-1} (x_2)	Частота обертання барабана n , об/хв. (x_3)
Верхній рівень (+)	150	10	15
Основний рівень (0)	90	7,5	10
Нижній рівень (-)	30	5	5
Інтервал варіацій факторів	60	2,5	5

2.5.3 Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі

В результаті моделювання (Додаток Л) було отримано візуалізацію технологічного процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора (рисунки 2.39–2.41).

Результати чисельного моделювання зведені в таблицю К.2.

З використанням програмного пакету Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено рівняння залежності продуктивності блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q від вище зазначених факторів у закодованому вигляді:

$$q = 44,6961 + 15,0378 x_1 - 13,7183 x_1^2 + 19,4412 x_2 + 10,6579 x_1 x_2 + 6,34078 x_2^2 + 1,50011 x_3 - 1,60614 x_1 x_3 + 1,71217 x_2 x_3 - 1,47393 x_3^2. \quad (2.198)$$

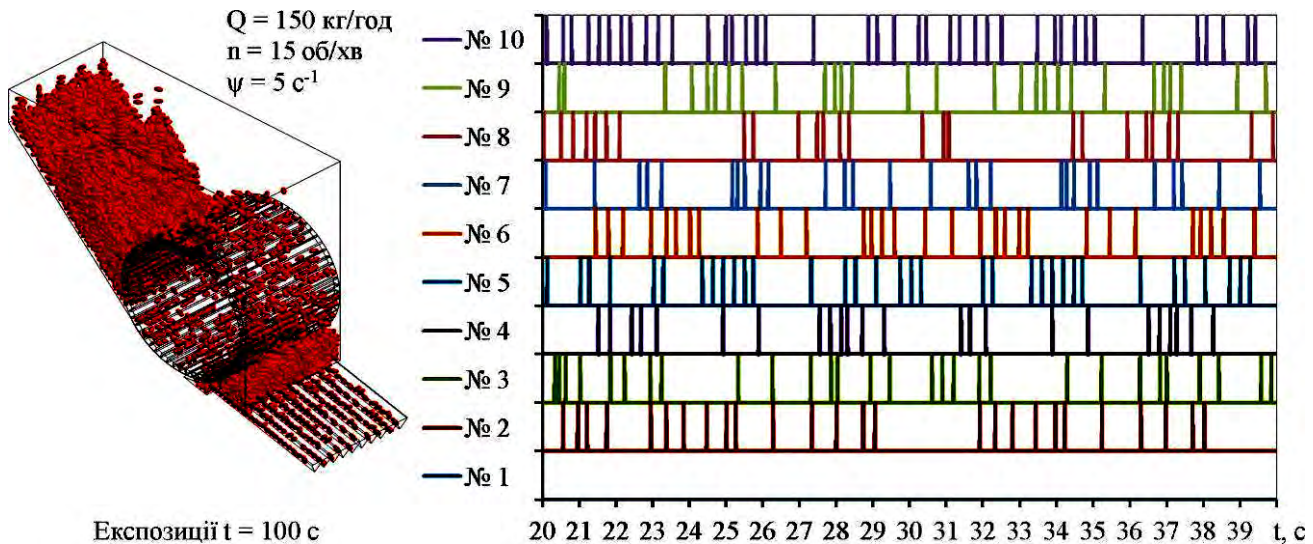


Рисунок 2.39 – Розподіл інтервалів часу сходу насіння з вібротка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора при $Q = 150$ кг/год

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,96$) та критерію Стьюдента $t_{0,05}(27) = 2,05$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1 , x_2 , $x_1 x_2$, x_1^2 , x_2^2 .

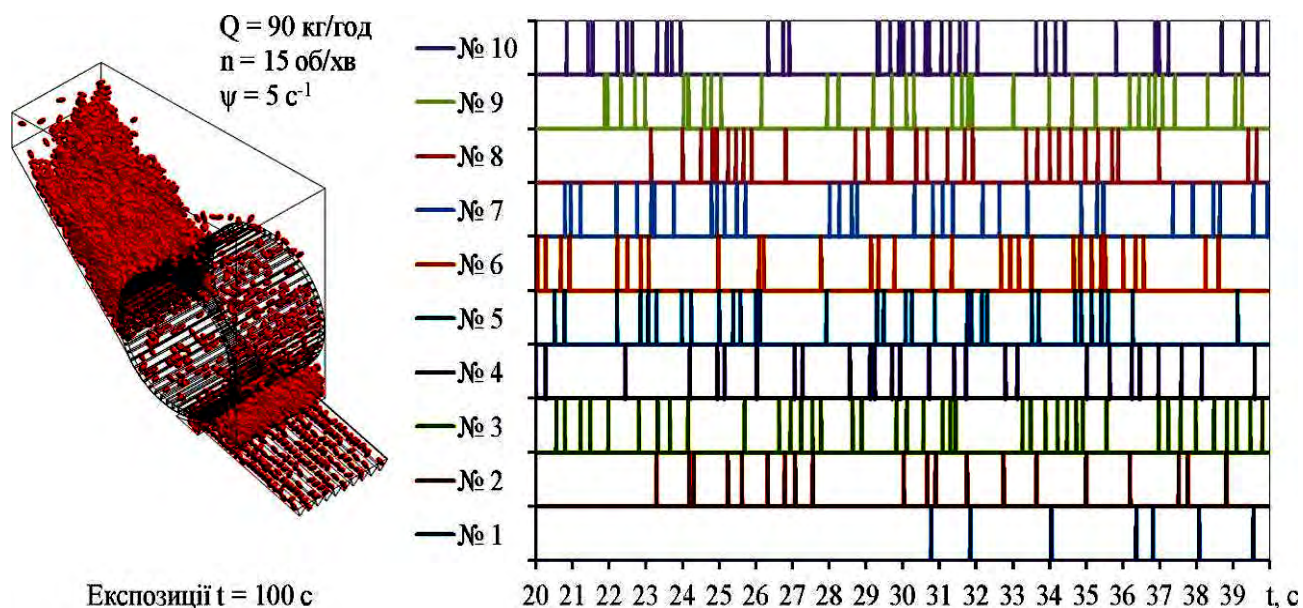


Рисунок 2.40 – Розподіл інтервалів часу сходу насіння з вібрототка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора при $Q = 90 \text{ кг/год}$

У розкодованому вигляді модель (2.198) після скорочення має вигляд:

$$\begin{aligned}
 q = & 37,9771 + 0,403651 Q - 0,00381064 Q^2 - 13,8361 \psi + \\
 & + 0,0710524 Q \psi + 1,01452 \psi^2.
 \end{aligned}
 \tag{2.199}$$

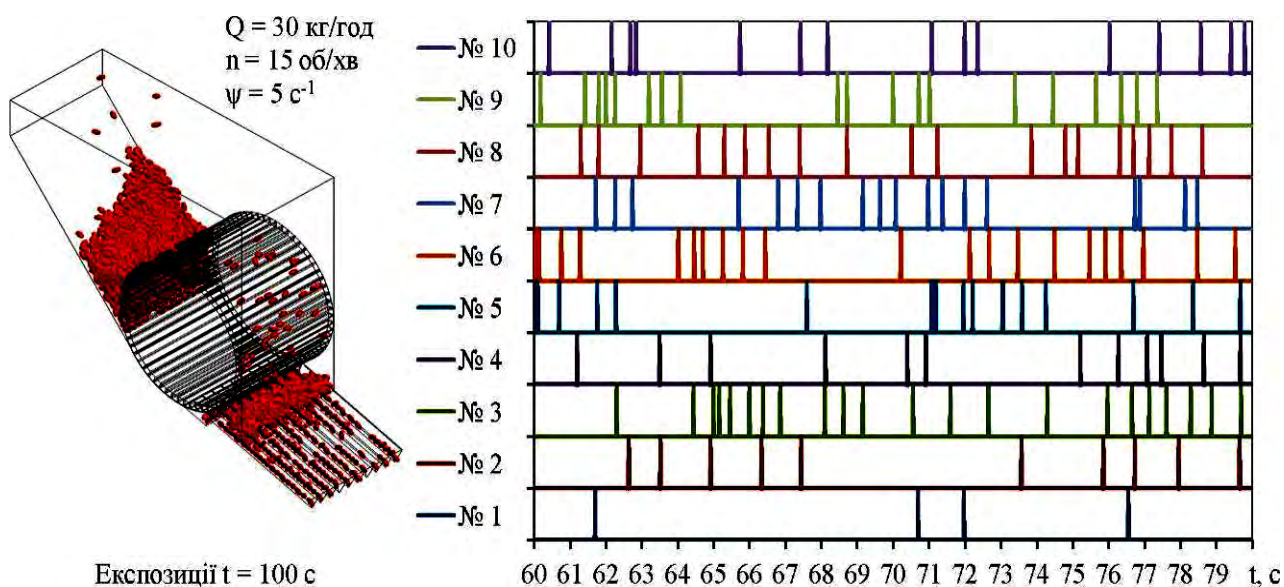


Рисунок 2.41 – Розподіл інтервалів часу сходу насіння з вібрототка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора при $Q = 30 \text{ кг/год}$

Графічна інтерпретація залежності (2.199) представлені на рисунку 2.42.

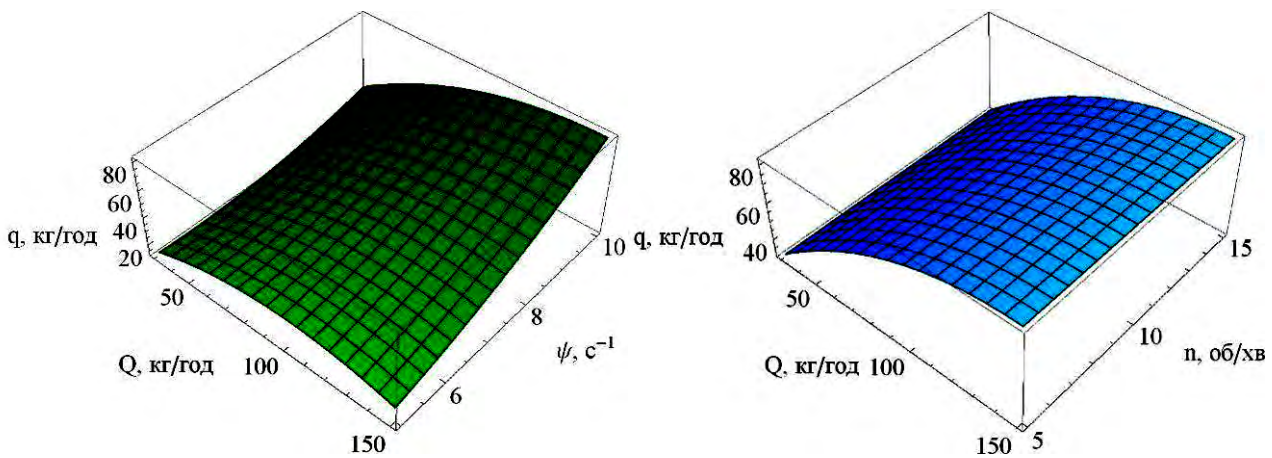


Рисунок 2.42 – Залежність продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q від подачі насіння Q , частоти коливань вібралотка ψ і частоти обертання барабана n при $\psi = 10 \text{ с}^{-1}$

Аналізуючи рисунок 2.42 можна зробити висновок про те, що із збільшенням значення частоти коливань вібралотка ψ продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q збільшується. В свою чергу частота обертання барабана n в досліджуваному діапазоні практично не впливає на зазначений критерій. А для подачі насіння Q існує оптимальне значення, яке складає $Q = 14,4 \text{ кг/год}$, при якому спостерігається максимальне значення продуктивності блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора.

Також встановлено рівняння залежності середнього інтервалу часу між падаючим насінням t від факторів досліджень:

$$t = 0,058287 - 0,0167361 x_1 + 0,0253472 x_1^2 - 0,0436111 x_2 + 0,00802083 x_1 x_2 + 0,0138889 x_2^2 + 0,00375 x_3 + 0,00239583 x_1 x_3 - 0,00364583 x_2 x_3 - 0,00194444 x_3^2. \quad (2.200)$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції ($R = 0,95$) та критерію Стюдента $t_{0,05}(27) = 2,05$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних членах рівняння: x_1 , x_2 , x_3 , $x_1 x_2$, x_1^2 , x_2^2 .

У розкодваному вигляді модель (2.200) після скорочення має вигляд:

$$t = 0,42485 + 0,00075 n - 0,00194734 Q + 7,0409 \cdot 10^{-6} Q^2 - 0,0555903 \psi + 0,0000534722 Q \psi + 0,00222222 \psi^2. \quad (2.201)$$

Графічна інтерпретація залежності (2.201) представлений на рисунку 2.43.

З рисунку 2.43 видно, що при низькому значенні частоти коливань вібралотка ψ , частоти обертання барабана n і оптимальну значенні подачі насіння $Q = 103,1$ кг/год спостерігається мінімум середнього інтервалу часу між падаючим насінням t .

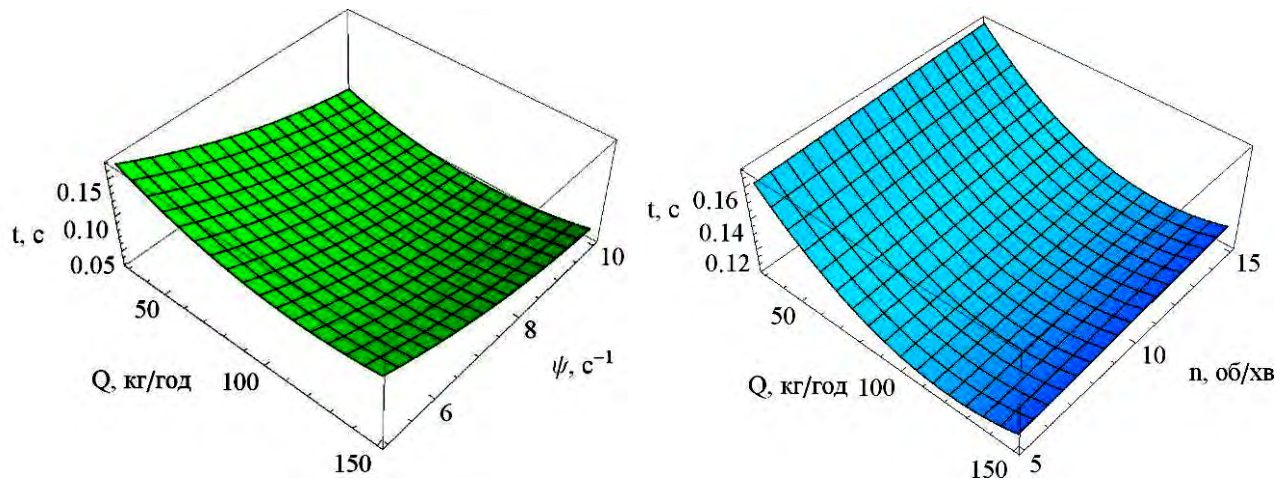


Рисунок 2.43 – Залежність середнього інтервалу часу між падаючим насінням t від подачі насіння Q , частоти коливань вібралотка ψ і частоти обертання барабана n

Аналіз представлених залежностей свідчить про необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективної роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому середній інтервал часу між падаючим насінням t повинен бути максимальним:

$$\begin{cases} q(Q, \psi, n) = Q, \\ t(Q, \psi, n) \rightarrow \max, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.202)$$

або

$$\begin{cases} q(Q, \psi, n) = Q, \\ Q \times t(Q, \psi, n) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.203)$$

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (2.203) є

$$\begin{cases} Q = q = 47,1 \text{ кг/год}, \\ \psi = 10 \text{ с}^{-1}, \\ n = 12 \text{ об/хв}, \\ t = 0,047 \text{ с}. \end{cases} \quad (2.204)$$

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q і середній інтервал часу між падаючим насінням t від подачі насіння Q , частоти коливань вібротка ψ і частоти обертання барабана n . В результаті вирішення компромісної задачі, а саме, для забезпечення ефективної роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому середній інтервал часу між падаючим насінням t повинен бути максимальним, встановлені раціональні параметри блока подачі насіння: $Q = q = 47,1 \text{ кг/год}$, $\psi = 10 \text{ с}^{-1}$, $n = 12 \text{ об/хв}$, $t = 0,047 \text{ с}$.

2.6 Модель автоматичного фенотипування насіння

Відповідно до розділу 2.1 розроблено модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння, яка зображена на рисунку 2.44.

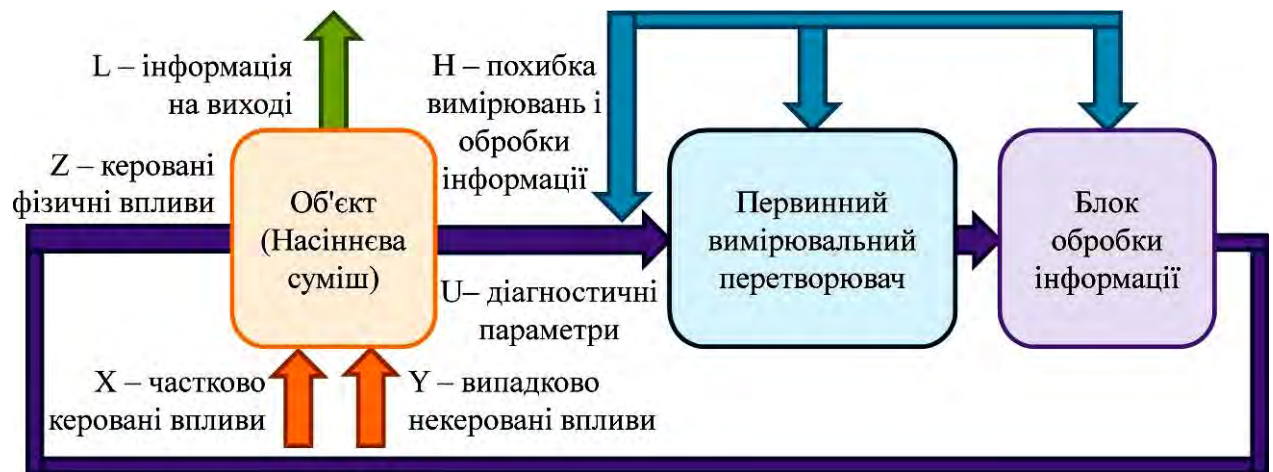


Рисунок 2.44 – Модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння

В рамках розробленої моделі, збільшення числа діагностованих параметрів, швидка оцінка яких дозволила б вивести з рухомого насінневого потоку некондиційне насіння, призведе до перетворення однокритеріального сортування в багатокритеріальне.

Пристрій для автоматичного фенотипування насіння, що реалізують принцип відбракування за кількома параметрами (показниками якості) назвемо багатокритеріальним. Алгоритм його роботи визначає фізичні параметри діагностованих насінин за допомогою перетворювачів зображення.

Найпоширеніший спосіб виділити об'єкт – це колір. Колір – це властивість тіл відбивати або випускати видиме випромінювання певного спектрального складу і інтенсивності. Однією з важливих проблем пошуку за кольором – це вплив безлічі чинників (наприклад, освітлення).

Кольорова палітра – математична модель представлення кольору, заснована на використанні колірних координат. Кольорова палітра будується таким чином, щоб будь-який колір був представлений точкою, що має певні координати [365].

Найчастіше для зберігання цифрових зображень використовується колірний простір RGB (рисунок 2.45, а). У ньому кожній з трьох осей (каналів) присвоюється свій колір: червоний, зелений і синій. На кожен канал

виділяється по 8 біт інформації, відповідно, інтенсивність кольору на кожній осі може приймати значення в діапазоні від 0 до 255. Всі кольори в цифровому просторі RGB виходять шляхом змішування трьох основних кольорів.

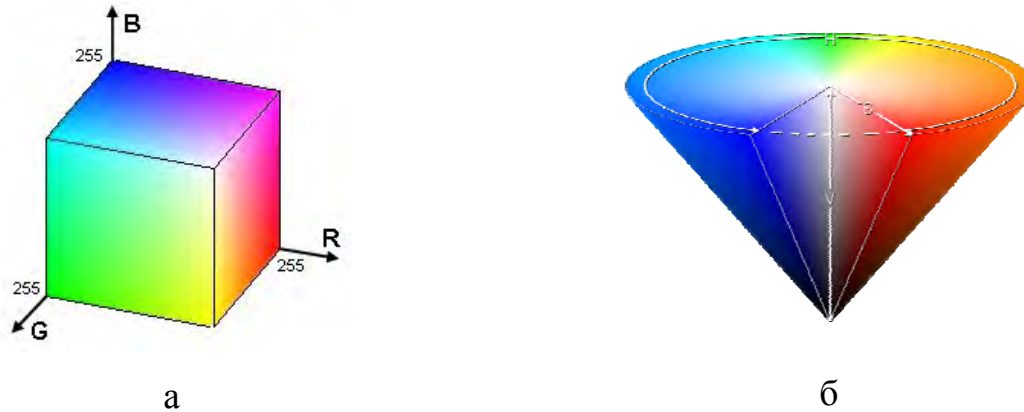


Рисунок 2.45 – Колірні простори RGB (а) і HSV (б) [365]

На жаль, RGB не завжди добре підходить для аналізу інформації. Експерименти показують, що геометрична близькість кольорів досить далека від того, як людина сприймає близькість тих чи інших кольорів один до одного.

Але існують і інші колірні простори. Для поставленої задачі найбільш підходить простір HSV (Hue, Saturation, Value). У ньому присутні (рисунок 2.45, б):

- вісь Value, що позначає кількість світла. На нього виділено окремий канал, на відміну від RGB, де це значення потрібно обчислювати кожен раз. Фактично, це чорно-біла версія зображення, з якої вже можна працювати;

- вісь Hue представляється у вигляді кута і відповідає за основний тон;

- вісь Saturation (відстань від центру до краю) залежить насиченість кольору.

Для перетворення колірних компонентів між моделями RGB та HSV приймаємо наступні положення:

$$\begin{aligned} H &\in [0;360], \\ S, V, R, G, B &\in [0;1]. \end{aligned} \quad (2.205)$$

Нехай MAX – максимальне значення з R, G, B, а MIN – мінімальне з них.

Тоді

$$H = \begin{cases} 0, & \text{якщо } MAX = MIN, \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, & \text{якщо } MAX = R \text{ і } G \geq B, \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{якщо } MAX = R \text{ і } G < B, \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{якщо } MAX = G, \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 240, & \text{якщо } MAX = B, \end{cases} \quad (2.206)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{якщо } MAX = 0, \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{інаше,} \end{cases}$$

$$V = MAX.$$

Для перетворення HSV в RGB приймаємо наступне:

$$\begin{aligned} H &\in [0;360], \\ S, V &\in [0;100]. \end{aligned} \quad (2.207)$$

Після перетворення вираз (2.206) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} H_i &= \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \bmod 6, \\ V_{\min} &= \frac{(100 - S) \times V}{100}, \\ a &= (V - V_{\min}) \frac{H \bmod 60}{60}, \\ V_{\text{inc}} &= V_{\min} + a, \\ V_{\text{dec}} &= V - a. \end{aligned} \quad (2.208)$$

Отримані значення червоного, зеленого і синього каналів RGB обчислюються у відсотках. Щоб привести їх у відповідність поширеному представленню COLORREF необхідно помножити кожне з них на 255/100.

При цілочисельному кодуванні для кожного кольору в HSV є відповідний колір в RGB. Однак зворотне твердження не є вірним: деякі кольори в RGB

можна виразити в HSV так, щоб значення кожного компонента було цілим. Фактично, при такому кодуванні доступна тільки 1/256 частини колірному простору RGB.

Два кольори називаються додатковими, якщо при змішуванні їх в рівній пропорції виходить чистий сірий колір. Якщо заданий один колір (H, S, V), то обов'язково існує додатковий йому колір (H', S', V'). Оскільки результуючий колір повинен бути сірим, його насиченість (S) повинна бути дорівнює 0. Таким чином,

$$\begin{aligned} H' &= \begin{cases} H - 180, & \text{якщо } H \geq 180, \\ H + 180, & \text{якщо } H < 180, \end{cases} \\ S' &= \frac{VS}{V(S-1)+1}, \\ V' &= V(S-1)+1. \end{aligned} \quad (2.209)$$

Вибір кольору для подальшого пошуку об'єкта з таким кольором зводиться до задачі виділення деякої цільової області в колірному просторі. Передбачається, що шуканий об'єкт повинен володіти кольором, відповідним точкам з цієї колірної області. Тут можливі дві ситуації:

- цільова область заздалегідь виділяється в колірному просторі;
- цільова область визначається вказівками користувача, наприклад, описується кольоровими термінами природної мови людини.

Перша ситуація реалізується в разі пошуку об'єктів заздалегідь відомих кольорів. Друга ситуація виникає при взаємодії з людиною. Інший приклад – це пошук по базі зображень із зазначенням кольору об'єкта або особливостей його колірної композиції.

Завдання побудові відповідностей між колірними термінами природної мови і областями колірному простору відома давно [366]. Існує безліч методик вирішення цього завдання [367, 368, 369].

Одна точка на шкалі H визначає двомірну область з різними значеннями S і V (насиченість і значення). Але підходять не всі точки цієї області. Наприклад, якщо вибрано значення H для червоного тону, то при S = 0 і будь-якому V

отримуємо відтінки, які стосуються градації сірого, а при малих V і будь-яких S отримуємо дуже темні відтінки, близькі до чорного кольору. Тому для заданого H цільову область в цій двомірній області визначаємо умовою: $V > V_{\min}$ і $S > S_{\min}$, де V_{\min} , S_{\min} – деякі константи.

Якщо обмежуватися тільки одним значенням H , то цільова область буде двовимірною областю, і будь-які, навіть незначні зміни колірному тону виводять за межі цієї області. Тому в загальному випадку людина вибирає цільовий діапазон на шкалі H , вказуючи два значення: H_{\min} і H_{\max} .

При цьому для кожного H з діапазону $[H_{\min}, H_{\max}]$ формується двомірною область, подібна вищезгаданій. Таким чином, в якості цільової області формується тривимірною область в просторі HSV. І ця область однозначно визначається вибором тільки двох значень за шкалою H , а саме H_{\min} і H_{\max} .

На даному етапі було запропоновано просте рішення, засноване на тому, що вибір кольору відбувається за рахунок встановлення діапазонів $[H_{\min}, H_{\max}]$, $[V_{\min}, V_{\max}]$, $[S_{\min}, S_{\max}]$, що відразу ж формує цільову тривимірною область в колірному просторі.

2.7 Висновки з розділу

1. Розроблено модель впливу агротехнологічних і техніко-технологічних параметрів на насінневу суміш, яка містить частково керований вплив (селекція, підготовка ґрунтів, післяпосівна обробка та ін.), випадковий некерований вплив (погода, температура, механічні пошкодження під час збирання та ін.) і керований фізичний вплив (всі види сепарації). Встановлені узагальнені перетворення зміни стану (фізико-механічних і морфологічних властивостей) насінневої суміші (2.9) в результаті керованого фізичного впливу.

2. В результаті теоретичних досліджень складено систему диференціальних рівнянь руху насіння соняшнику в повітряному потоці (2.32), що дає змогу визначити місце їх падіння в залежності від їх фізико-механічних і реологічних

властивостей. Представлена система диференційних рівняння покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу.

3. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) було отримано залежності масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів ξ_h (2.39) і ξ_l (2.40) від ефективного діаметру насіння соняшнику D_p і швидкості повітря V . Окрім цього, отримані залежності зміни об'ємних мас важких ρ_h (2.41) і легких ρ_l (2.42) компонентів від вищезазначених факторів досліджень. Встановлено, що різниця між ρ_h і ρ_l практично не змінюється і складає $58,2 \pm 2,2$ кг/м³. Отримані залежності дають змогу визначити швидкість потоку повітря V виходячи з необхідних об'ємних мас ρ_h і ρ_l та ефективного діаметру насіння соняшнику D_p .

4. У результаті чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку отримані залежності розподілу кожної фракції насіння по довжині області (середнє значення \bar{x} : (2.43)-(2.47), (2.53)-(2.57), (2.63)-(2.67); середньоквадратичне відхилення σ : (2.48)-(2.52), (2.58)-(2.62), (2.68)-(2.72); коефіцієнт заповнення χ : (2.74); коефіцієнт розподілу δ : (2.77)) від ефективного діаметра насіння D_p , швидкості подачі повітря V та подачі насіння Q . За умови максимуму коефіцієнта заповнення χ і коефіцієнта розподілу δ визначені раціональні режимні параметри зазначеного процесу: для ефективного діаметра насіння $D_p = 3$ мм подача складає $Q = 1,55$ т/год, а швидкість повітря $V = 5,6$ м/с.

5. Розроблено фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією віброуючого решета, який покладений в основу методу дискретних елементів і штрафного підходу для виявлення контактів та розрахунків сил контактної взаємодії насінин і поверхні решета. Розглянуті

контакти насінин між собою і поверхнею решета при різних умовах демпфування, тертя та зчеплення.

6. В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета отримані залежності зміни сумарної концентрації θ (2.129) і продуктивності q (2.126) від подачі насіння Q , кута нахилу решета α , частоти коливань решета ψ і амплітуди коливань решета A . За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією вібруючого решета необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння $Q = q = 1202$ кг/год, при цьому сумарна концентрація насіння θ повинна бути максимальною $\theta = 10,83$ %, а $\alpha = 1$ °, $\psi = 5,62$ с⁻¹, $A = 0,012$ м.

7. Створено фізико-математичний апарат дисипативного гранульованого газу шару насіннєвого матеріалу у стаціонарному стані, керованому вібраційними межами, для опису якого використані класичні теорії молекулярного газу та гідродинаміка.

8. В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією вібруючої поверхні отримані залежності зміни коефіцієнта заповнення χ (2.173), коефіцієнта розподілу δ (2.176) і продуктивності q (2.170) від подачі насіння Q , кутів нахилу вібруючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A і швидкості повітряного потоку V . За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією вібруючої поверхні необхідно, щоб забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією вібруючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння $Q = q = 1092$ кг/год, при цьому коефіцієнта заповнення χ повинен бути максимальним $\theta = 74,21$ %, а $\alpha = 3,5$ °, $\beta = 3,9$ °, $\psi = 5,0$ с⁻¹, $A = 0,013$ м, $V = 4$ м/с.

9. В результаті аналітичних досліджень розроблена фізико-математична модель руху насіння по лопаті барабана, згідно якої встановлена залежність

швидкості переміщення насінини V від модуля її радіус-вектора r для різних значень частоти обертання барабана n .

10. В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q (2.199) і середній інтервал часу між падаючим насінням t (2.201) від подачі насіння Q , частоти коливань вібрлотка ψ і частоти обертання барабана n . В результаті вирішення компромісної задачі, а саме, для забезпечення ефективної роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому середній інтервал часу між падаючим насінням t повинен бути максимальним, встановлені раціональні параметри блока подачі насіння: $Q = q = 47,1$ кг/год, $\psi = 10$ с⁻¹, $n = 12$ об/хв, $t = 0,047$ с.

11. Розроблена модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння, що реалізує принцип відбракування за кількома параметрами (забарвлення, форма, геометричні розміри) за допомогою перетворювачів зображення, які реалізовані на визначенні забарвлення і контуру насіння у кольорному просторі HSV.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388].

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень була перевірка правильності встановлених в ході теоретичних досліджень залежностей і експериментальне обґрунтування раціональних режимно-технологічних параметрів роботи обладнання для прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику.

У відповідності із програмою експериментальних досліджень було передбачено наступне:

- дослідження фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику;
- дослідження процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями;
- дослідження процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами;
- дослідження процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою;
- дослідження процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за забарвлення його епідермісу;
- дослідження процесу автоматичного фенотипування насіння.

3.2 Методика лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику

Фізико-механічні властивості насіння є важливими показниками, які слід враховувати у її післязбиральному обробітку, адже, практично, все насіння піддається механічній дії: руйнуванню, перемішуванню, транспортуванню, зберіганню та ін. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення

технологічних операцій неможливе без знання властивостей матеріалів, що обробляються. Значення маси 1000 насінин, щільності, коефіцієнту тертя, кута природного ухилу і т.д. необхідно знати для формування моделей та емпіричних математичних залежностей, для встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, що використовуються у технологічних процесах очищення і розділення насінневого матеріалу.

З метою інтенсифікації процесів очищення та розділення насіння соняшнику пропонується дослідити їх фізико-механічні властивості.

Для вирішення поставлених завдань була розроблена програма лабораторних досліджень, яка передбачала визначення наступних фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику, а саме:

– показників, що характеризують сипкість насіння (кут природного укосу φ);

– фрикційних властивостей насіння (статичного коефіцієнта тертя f насіння соняшника по сталі із шорсткістю поверхні $\sqrt[12.5]{}$);

– об'ємної маси ρ ;

– розмірно-масових характеристик насіння (довжина L , ширина B , товщина T , ефективний діаметр D_p , маса 1000 насінин M_{1000});

– забарвлення насіння.

В якості об'єктів досліджень обрано насіння соняшнику селекції Інституту олійних культур НААН (м. Запоріжжя): Надійний, Пріоритет, Прометей, Каменяр.

Задачею лабораторних досліджень було передбачено проведення аналізу впливу вологості насіння W_b на досліджувані показники. Для надання насінню соняшнику певної вологості додавалася розрахункова кількість води, ретельно перемішувалася, а потім герметизувалися отримана суміш в окремих поліетиленових мішках. Надалі зразки витримували при 50°C в теплоізоляційній шафі протягом одного тижня. Перед кожним випробуванням, необхідну кількість зразків витягували з теплоізоляційної шафи і давали

нагрітися до кімнатної температури. Всі фізико-механічні властивості були визначені при вмісті вологи, рівному $7,0\pm 0,2$ %, $10,0\pm 0,2$ %, $13,0\pm 0,2$ % і $16,0\pm 0,2$ %.

Повторність кожного вимірювання складало 5 разів.

Розмірні характеристики випадково обраних 100 насінин визначалися за довжиною, шириною і товщиною кожного насіння. Вимірювання проводилися за допомогою мікрометра з точністю до 0,01 мм. Ефективний діаметр, виражений як розмір, розраховувався з використанням наступного рівняння [389, 390, 391]:

$$D_p = 2\sqrt[3]{\frac{3 V_{100}}{4 \cdot 100}}, \quad (3.1)$$

де V_{100} – дійсний об'єм 100 насінини визначався методом витіснення гліцерином [389], мм³.

Маса 1000 насінин була визначена шляхом випадкового вибору 100 зразків і зважування на електронних вагах чутливістю 0,001 г.

Дійсну щільність (ρ_T) визначали методом витіснення гліцерином [389]. Об'ємну масу (ρ_b) насіння визначали шляхом заповнення кубічної ємності відомого об'єму (100 мм × 100 мм × 100 мм) і зважування на електронних вагах [392, 393, 394].

Кут природного укосу визначався, як арктангенс відношення подвійної висоти до діаметра купи насіння, яка розміщена на пластині з опуклою (сферичною) поверхнею [395, 396]. Насіння насипали з висоти 200 мм на круглу пластину діаметром 200 мм.

Статичний коефіцієнт тертя f визначався для сталі. Для цього вимірювання один кінець поверхні тертя був прикріплений до гвинта. Насіння поміщали на поверхню тертя, один кінець якої поступово піднімався за допомогою гвинта. Тангенс кута, при якому насіння починало ковзати по поверхні і визначало статичний коефіцієнт тертя [397].

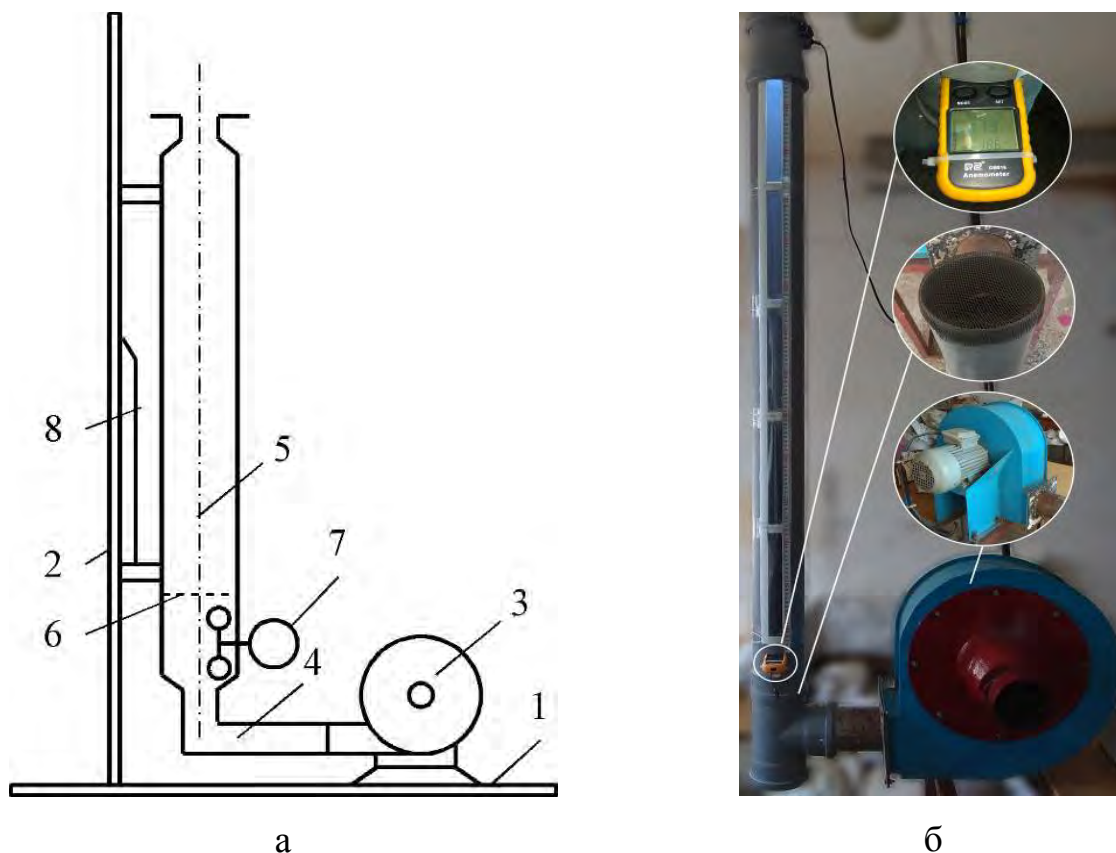
Геометричні параметри і фізико-механічні властивості визначають аеродинаміку насіння в повітряному потоці. При русі повітря через шари насіння соняшнику (в процесі технологічної обробки – очищення, теплової сушки, активного вентилявання і ін.) поведінка насіння визначається швидкістю руху повітря. При невеликих швидкостях насіння зберігає властивості шару, а повітря проходить через пори шару. Збільшення швидкості руху повітря призводить до того, що насінини, залишаючись в шарі, починають переміщатися одне відносно іншого. Концентрація насінин в шарі різко зменшується, а об'єм шару зростає. Виникає псевдозрідження, потім псевдокипіння, коли опір повітряного потоку стає близьким за величиною до ваги насінин. Швидкість потоку газу або повітря, при якій частинки сипучого середовища знаходяться в підвішеному стані є швидкість витання для даного матеріалу. На випробувальному стенді були виміряні швидкості витання насіння соняшнику.

Схема стенду для визначення швидкості витання часток представлена на рисунку 3.1.

На станині 1 жорстко встановлена вертикальна стійка 2 і повітрорудна машина 3 з регульованою заслінкою. Фітинг 4 з'єднує повітрорудну машину і вертикальну трубу 5, в нижній частині якої встановлена сітка 6. Швидкість повітря вимірюється анемометром GM816 7, висота підйому частинок – шкалою 8. На сітці вертикальної труби містився шар насіння товщиною 3-5 мм. Після включення електродвигуна повітрорудної машини, частота обертання ротора плавно підвищувалася. Швидкість витання визначалася по висоті підйому частинок. Коли приблизно 95 % частинок шару піднімалися в просторі труби, зчитуються показання анемометра. Досліджувалися різні фракції попередньо розділеного за розмірами матеріалу.

Оцінка забарвлення насіння соняшнику проводилась візуально. Після цього проводилось групування сортозразків соняшнику. В якості об'єктів

досліджень обране насіння сортозразків соняшнику колекції Інституту олійних культур НААН (м. Запоріжжя).



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

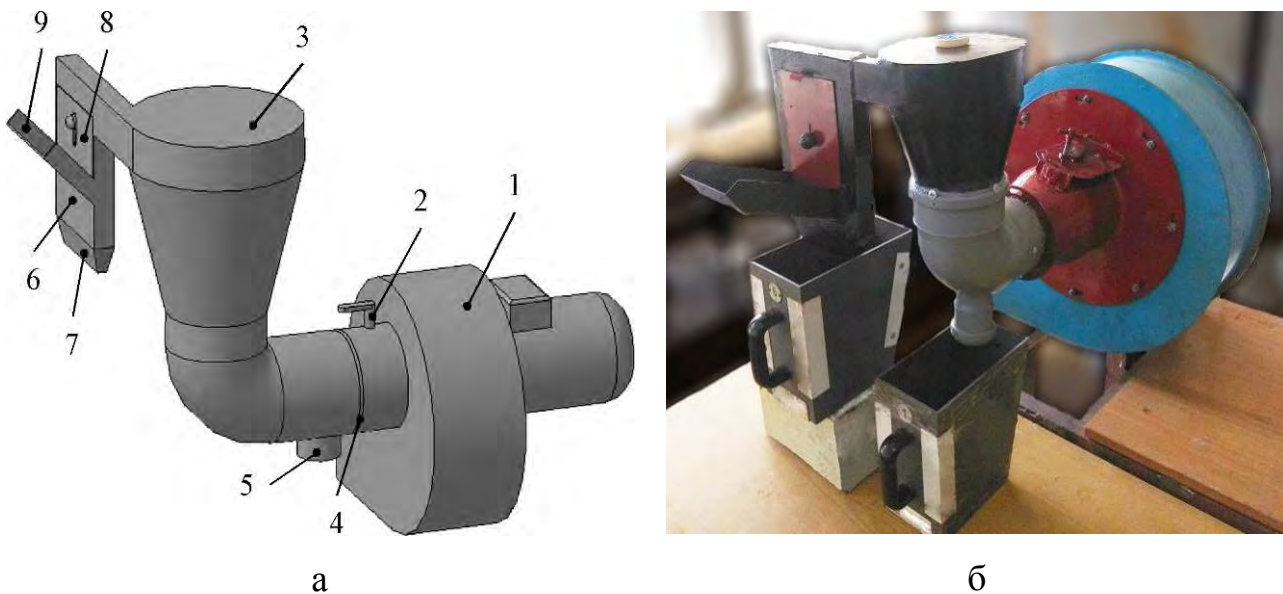
Рисунок 3.1 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) стенду для визначення швидкості витання часток

3.3 Методика експериментальних досліджень процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями

Експериментальні дослідження були проведені в два етапи. На першому етапі досліджувалися режимні параметри розробленого малогабаритного аеродинамічного сепаратора (віялки), який складався з повітродувної машини 1 із заслінки 2, циклону 3, сітки 4, патрубку для домішок і неліквідного насіння 5, сепараційної камери 6, патрубку для ліквідного насіння 7, заслінки 8, лотка для подачі насіння 9 (рисунок 3.2). Для забезпечення певної подачі насіння

використовується відкалібрована заслінка 8, яка обмежує вхідну продуктивність. Задана подача повітря встановлюється за допомогою заслінки 2 і контролювалася анемометром GM816.

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень були насіння соняшнику гібриду Пріоритет, селекції Інституту олійних культур НААН. Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок 200 г насіння. Об'ємна маса вихідного матеріалу складала 202-211 кг/м³.



1 – повітрорудна машина; 2 – заслінка; 3 – циклон; 4 – сітка; 5 – патрубок для домішок і неліквідного насіння; 6 – сепараційна камера; 7 – патрубок для ліквідного насіння; 8 – заслінка; 9 – лоток для подачі насіння

Рисунок 3.2 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) малогабаритного аеродинамічного сепаратора (віялки)

Факторами для експериментальних досліджень є швидкість подачі повітря V і ефективний діаметр компонентів насінневої суміші D_p , який визначався за фракційним складом.

Експериментальні дослідження були проведені за повнофакторним дослідом для 2 факторів (9 дослідів) у трикратній повторності. Рівні і інтервали варіювання факторів досліджень представлені в таблиці 3.1.

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів, виконувались за допомогою комп'ютерної програми Mathematica.

Критерієм оцінки якості процесу сепарації насіння соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) було прийнято масові концентрації ξ об'ємної маси важких ρ_h і легких ρ_l компонентів. Так як даний технічний засіб повинен забезпечити найбільшу якість виконання процесу сепарації, то потужність, що витрачається приводом вентилятора, визначається лише для технічної характеристики за допомогою лічильника електроенергії НІК 2303 АРПЗ 1140.

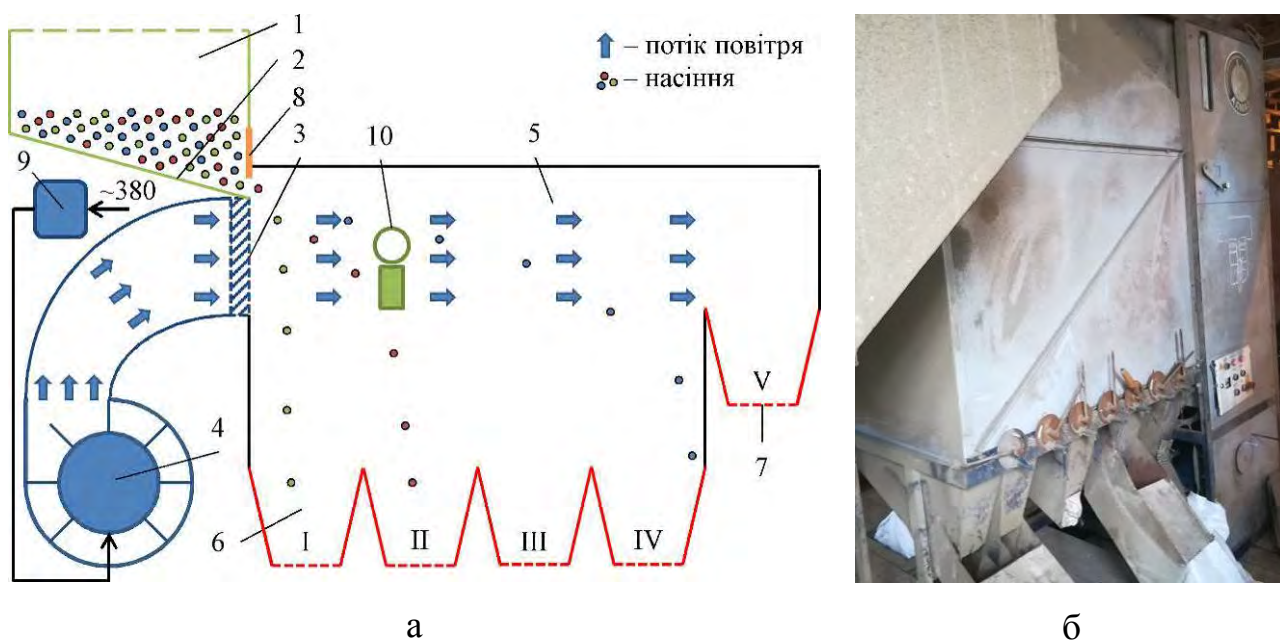
Таблиця 3.1 – Рівні та інтервали варіацій факторами процесу сепарації насіння соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

Рівні варіацій факторів	Фактори	
	Швидкість повітря V , м/с (x_1)	Ефективний діаметр насіння D_p , мм (x_2)
	x_1	x_2
Верхній рівень (+)	15	7
Основний рівень (0)	10	5
Нижній рівень (-)	5	3
Інтервал варіацій	5	2

Другий етап експериментальних досліджень був проведений на установці із базою аеродинамічного сепаратора серії «Алмаз» (виробництва ЧП ПФ «Агротех»), що складалася з бункера 1 для завантаження насінневого матеріалу, що підлягає сепаруванню, з вібрлотка 2, встановлений під ними генератор 3 каскаду повітряних струменів, який пов'язаний з джерелом 4 подання повітря (вентилятор) під тиском у генератор 3, та сепараційну камеру 5. Під сепараційною камерою 5 розташовані збірники фракцій 6 (I–IV). В кінці сепараційної камери 5 змонтовано забірник пилу і легкої фракції 7 (V). Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд експериментальної

установки представлено на рисунку 3.3. Для забезпечення певної подачі насіння використовується відкалібрована заслінка 8, яка обмежує вхідну продуктивність. Задана подача повітря встановлюється за допомогою частотного перетворювача 9 (Danfoss VLT Micro Drive), а контролюється з використанням анемометра 10 (GM816).

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень були насіння соняшнику гібриду Пріоритет, селекції Інституту олійних культур НААН, які були відкалібровані до фракції 3,2–3,4 мм. Один дослід проводився при пропусканні через установку 100 кг насіння.



1 – бункер; 2 – вібралоток; 3 – генератор каскаду повітряних струменів;
4 – вентилятор; 5 – сепараційна камера; 6 – збірники фракцій; 7 – забірник
пилу і легкої фракції; 8 – заслінка; 9 – частотний перетворювач 10 – анемометр

Рисунок 3.3 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки для дослідження процесу сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією повітряного потоку

Факторами для експериментальних досліджень є швидкість подачі повітря V і подача насіння Q .

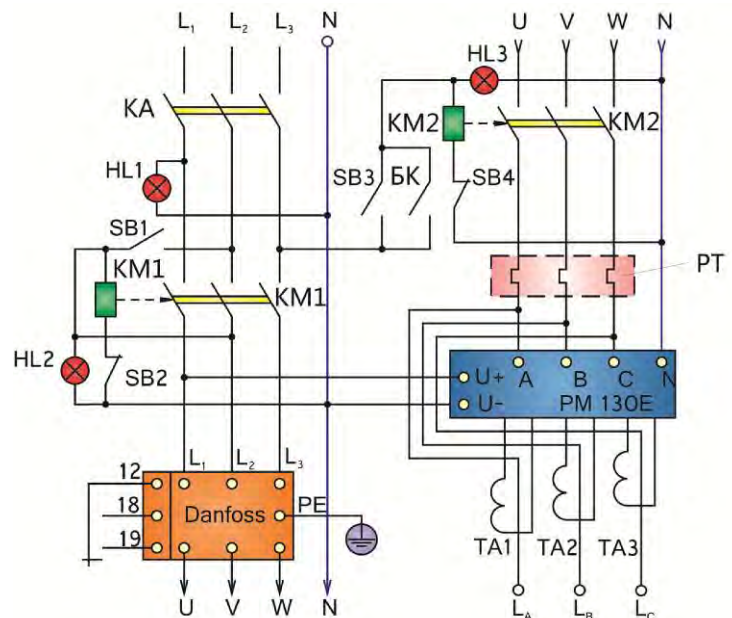
Інтервали і рівні варіювання даними факторами представлені в таблиці 3.2.

В якості критеріїв оптимізації було прийнято: споживану потужність – P і коефіцієнт розподілу – δ . Потужність, що витрачається приводом вентилятора, вимірювалася з використанням однієї з додаткових функцій частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive (рисунок 3.4).



а

$L_1, L_2, L_3, L_A, L_B, L_C$ – фазні проводи на вході та виході шафи керування відповідно; N – нульовий провід; KA – комутаційний апарат (автоматичний вимикач); $KM1, KM2$ – контактори; $SB1, SB3$ – кнопки «Пуск»; $SB2, SB4$ – кнопки «Стоп»



б

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive (а) і принципова електрична схема його з'єднання з електродигуном (б)

Так як задачею сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією повітряного потоку є розділення на 4 фракцій (виповнені; неповністю виповнені і пусті; голе ядро і уражене грибовими хворобами; органічні домішки), то на експериментальній установці виставлено 4 забірні області. При кожному досліді для кожної забірної області визначається фракційний склад

згідно загальноприйнятою методикою [398] і розраховується відповідний коефіцієнт розподілу δ за формулою (2.35)–(2.37).

Таблиця 3.2 – Рівні та інтервали варіацій факторами експериментальних досліджень процесу переміщення насіння в повітряному потоці

Рівні варіацій факторів	Фактори	
	Подача насіння Q , т/год (x_1)	Швидкість повітря V , м/с (x_2)
	x_1	x_2
Верхній рівень (+)	3	15
Основний рівень (0)	2	10
Нижній рівень (-)	1	5
Інтервал варіацій факторів	1	5

Експериментальні дослідження були проведені за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 2 факторів (9 дослідів) у трикратній повторності. Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів, виконувались за допомогою комп'ютерної програми Mathematica. Математична модель визначається по кожному критерію оптимізації.

3.4 Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами

Дослідження були проведені на насінні соняшнику гібриду Пріоритет (селекція Інституту олійних культур НААН).

Експериментальну перевірку отриманих теоретичних моделей було проведено на експериментальному стенді на базі калібрувальної машини ОКМФ (рисунок 3.5). Решета були обрані з розміром отворів $3,6 \times 20$ мм трьох видів: пробивні, пруткові і точні (виготовлені шляхом лазерної різки). Відхилення розмірів отворів решіт складало 0,09 мм, 0,03 мм і 0,001 мм відповідно. Відносна корисна площа решіт складала 0,42, 0,56 і 0,56 відповідно.

За фактори експериментальних досліджень були прийняті наступні режимно-технологічні параметри: подача насіння – Q , кут нахилу решета – α ,

частота коливань решета – ψ (межі варіювання представлені в таблиці 3.3). Згідно результатів чисельного моделювання (розділ 2.2) було встановлено, що амплітуда коливань решета A не значно впливає на сумарну продуктивність q (вплив фактора – 8,1 %). Однак сумарна концентрація насіння θ є найменшою в досліджуваному діапазоні факторів при амплітуді коливань решета $A = 0,012$ м, що і приймаємо в якості умови при проведенні експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження були проведені за D-оптимальним планом Бокса- Бенкіна для трьох факторів із числом дослідів – 15. Експозиція одного дослідів складала 20 хв.

Подача насіння змінювалася за допомогою відкаліброваної заслінки на бункері. Кут нахилу решета встановлювався за рахунок регулювання відповідних важелів і контролювався електронним кутоміром Digital inclinometer. Частота коливань решета співпадала з частотою коливань вібродвигуна ИВ-104Б-6 ($n = 1000 \text{ хв}^{-1}$, $P = 0,53 \text{ кВт}$, 3 фази) і змінювалася за допомогою блока керування на основі частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive (рисунок 3.4). Взаємозв'язок між частотою коливань решета ψ і частотою електромережі f , що живила вітродвигун ИВ-104Б-6 представлена у вигляді: $f [\text{Гц}] = (50 \text{ Гц}) \cdot (60 \text{ с}) \cdot \psi [\text{Гц}] / 1000 (\text{хв}^{-1}) = 3 \cdot \psi [\text{Гц}]$.

Кожен дослід супроводжувався вимірюванням фракційного складу насіння соняшнику на вході, проході і сході за допомогою комплекту решіт (3,0 мм, 3,2 мм, 3,4 мм, 3,6 мм, 3,8 мм, 4,0 мм), лабораторного розсіву РЛУ-3 і вагів ТВЕ-0,6 (рисунок 3.6) згідно загальноприйнятою методикою [398].

Для проведення досліджень було підібрано насінневу суміш соняшнику гібриду Пріоритет (врожай 2017 року, с. Сонячне, Запорізький район, Запорізька область), вологістю 7,6–8,1 % із наступним фракційним складом: 3,0–3,2 мм – 19,1 %, 3,2–3,4 мм – 22,3 %, 3,4–3,6 мм – 20,1 %, 3,6–3,8 мм – 18,2 %, 3,8–4,0 мм – 20,3 %. При цьому неоднорідність суміші соняшнику за фракційним складом складала 2,6 %. Для кожного дослідів через калібрувальну машину пропускатись 300 кг насінневої суміші соняшнику.

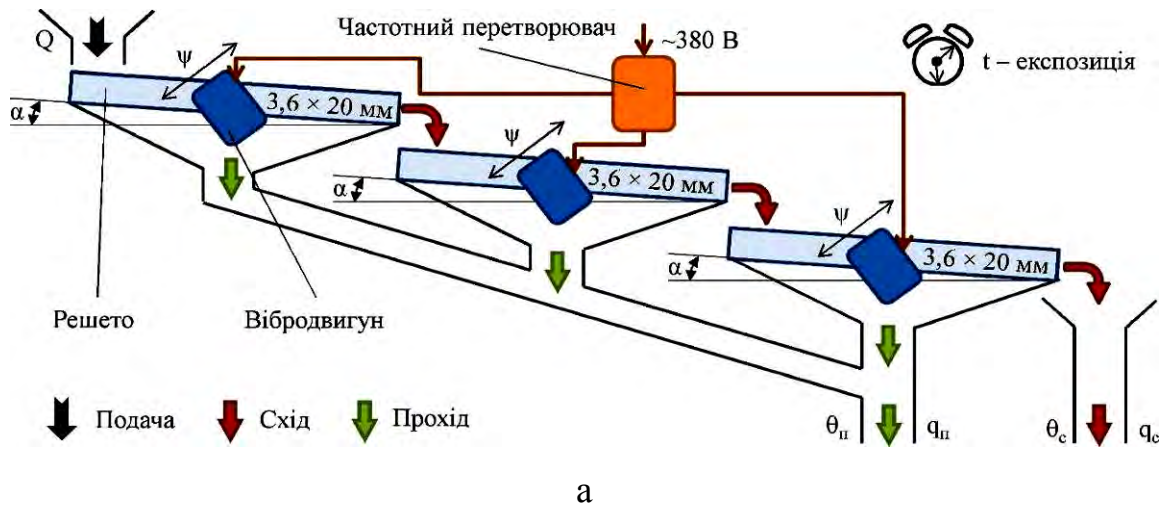


Рисунок 3.5 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального стану на базі калібрувальної машини ОКМФ



Рисунок 3.6 – Загальний вигляд вагів ТВЕ-0,6 (а) і лабораторного розсіву РЛУ-3 (б)

Таблиця 3.3 – Рівні та інтервали варіацій факторів чисельного моделювання процесу переміщення насіння соняшнику під дією віброуючого решета

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Подача насіння Q, кг/год (x_1)	Кут нахилу решета α , ° (x_2)	Частота коливань решета ψ , с ⁻¹ (x_3)
(-)	1100	1	4
(0)	1600	4	5
(+)	2100	7	6
Інтервал	500	3	1

В результаті досліджувалася концентрація кожної фракції насіння, що відбилося від поверхні решета (схід) θ^c та пройшло крізь нього (прохід) $\theta^п$. В зв'язку з тим, що розмір отвору решета було прийнято $3,6 \times 20$ мм, необхідною умовою якісного розділення насінневої суміші є мінімізація значень концентрацій фракцій 3,0 мм, 3,2 мм, 3,4 мм, 3,6 мм – за сходом ($\theta_{D_p=3,0}^c$, $\theta_{D_p=3,2}^c$, $\theta_{D_p=3,4}^c$, $\theta_{D_p=3,6}^c$ відповідно).

Згідно отриманих даних визначалися залежності сумарної концентрація насіння відповідно до формули (2.123) та сумарної продуктивності відповідно до формули (2.124) від факторів досліджень. Для порівняння отриманих залежностей з теоретичними використовувався коефіцієнт кореляції.

З використанням частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive визначалася залежність потужності, що споживається калібрувальною машиною, від факторів досліджень.

Обробка результатів досліджень здійснювалася за допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica з використанням кореляційного і дисперсійного аналізів.

3.5 Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою

Експериментальну перевірку отриманих теоретичних моделей було проведено на експериментальному стенді на базі пневмовібростола типу ПВС, що складався з бункера 1 для завантаження насіннєвого матеріалу, що підлягає сепаруванню, пневмовібростола 2, збірників фракцій 3 (I–III). Подача насіння змінювалася за допомогою відкаліброваної заслінки 4 на бункері 1. Кути нахилу деки пневмовібростола 2 встановлювалися за рахунок регулювання відповідних важелів 5 і контролювався електронним кутоміром Digital inclinometer. Частота коливань решета пневмовібростола 2 прямо пропорційна частоті обертання вала асинхронного електродвигуна 6 і змінювалася за допомогою блока керування на основі частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive (рисунок 3.4) 7. Генератором потоку повітря є вентилятор 8, який приводиться в дію асинхронним електродвигуном 9. Швидкість потоку повітря крізь деку пневмовібростола 2 встановлювалося за допомогою заслінок 10, а контролювалося з використанням анемометра 11 (GM816). Подача електроенергії до асинхронних електродвигунів 6 і 9 відбувалося по електричним проводам через лічильник електроенергії 12.

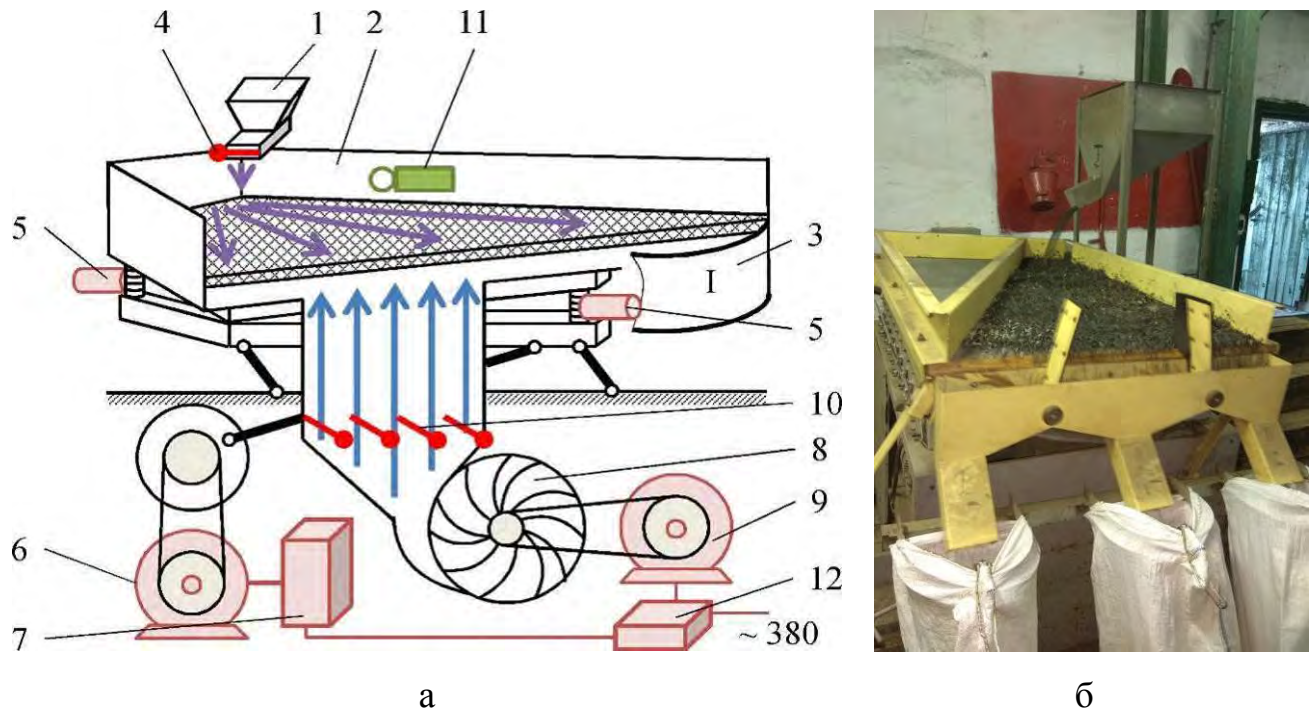
Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд експериментальної установки представлено на рисунку 3.7.

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень були насіння соняшнику гібриду Пріоритет, селекції Інституту олійних культур НААН, які були відкалібровані до фракції 3,2–3,4 мм і містили рослинні домішки, масова частка яких складала 12,3 %. Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок блока подачі 100 кг насіння.

Факторами для експериментальних досліджень є подача насіння Q , кути нахилу деки α і β , частота коливань ψ , швидкість повітря V .

Згідно результатів чисельного моделювання (розділ 2.3) було встановлено, що амплітуда коливань деки A не значно впливає на продуктивність q (вплив

фактора – 7,4 %). Однак коефіцієнт заповнення χ і коефіцієнт розподілу δ мають оптимум при амплітуді коливань деки $A = 0,013$ м, що і приймається в якості умови при проведенні експериментальних досліджень.



1 – бункер; 2 – пневмовібростол; 3 – збірники фракцій; 4 – відкалібрована заслінка; 5 – важелі регулювання кута нахилу деки; 6 – асинхронний електродвигун; 7 – частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive; 8 – вентилятор; 9 – асинхронний електродвигун; 10 – заслінки; 11 – анемометр GM816; 12 – лічильник електроенергії NIK 2303 АРПЗ 1140

Рисунок 3.7 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки для дослідження процесу сепарації насіння соняшнику за об'ємною масою

Інтервали і рівні варіювання даними факторами представлені в таблиці 3.4.

В якості критеріїв оптимізації було прийнято: продуктивність – q , споживану потужність – P і коефіцієнт розподілу – δ .

Таблиця 3.4 – Рівні та інтервали варіацій факторами експериментальних досліджень процесу переміщення насіння під дією вібруючої поверхні

Рівні варіацій факторів	Фактори				
	Подача насіння Q, кг/год (x ₁)	Кут нахилу α, ° (x ₂)	Кут нахилу β, ° (x ₃)	Частота коливань ψ, с ⁻¹ (x ₄)	Швидкість повітря V, м/с (x ₅)
Нижній рівень (-)	1000	1	1	5	3
Основний рівень (0)	1400	3	3	7,5	3,5
Верхній рівень (+)	1800	5	5	10	4
Інтервал варіацій факторів	400	2	2	2,5	0,5

Продуктивність пневмовібростола q визначалася шляхом вимірювання маси насіння M , що пройшло через нього, і відповідного часу τ . Розрахунок проводився за формулою:

$$q = \frac{M}{\tau}. \quad (3.2)$$

Потужність, що витрачається установкою, вимірювалася з використанням повіреного лічильника електроенергії і розраховувалася за формулою:

$$P = \frac{\Delta E}{\tau}, \quad (3.3)$$

де ΔE – показання електролічильника, Вт·год;

τ – час проведення дослідів, год.

Так як задачею сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією вібруючої поверхні є розділення на 3 фракції (голе ядро, виконані, неповністю виповнені і пусті), то на експериментальній установці виставлено 3 забірних областей. При кожному досліді для кожної забірної області визначається фракційний склад згідно загальноприйнятою методикою [398] і розраховується відповідний коефіцієнт розподілу δ за формулою (2.35)–(2.37).

Експериментальні дослідження були проведені за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 5 факторів (45 дослідів) у трикратній повторності. Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів, виконувались за допомогою комп'ютерної програми Mathematica. Математична модель визначається по кожному критерію оптимізації.

3.6 Методика експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за забарвленням його околопліддя

3.6.1 Методика експериментальних досліджень блока подачі насіння

Експериментальні дослідження проводилися на установці, що складалася з експериментального зразка блока подачі насіння, лабораторного блока живлення із можливістю зміни напруги та контрольно-вимірювальної апаратури (фотопреривачі, які підключені до аналого-цифрового перетворювача).

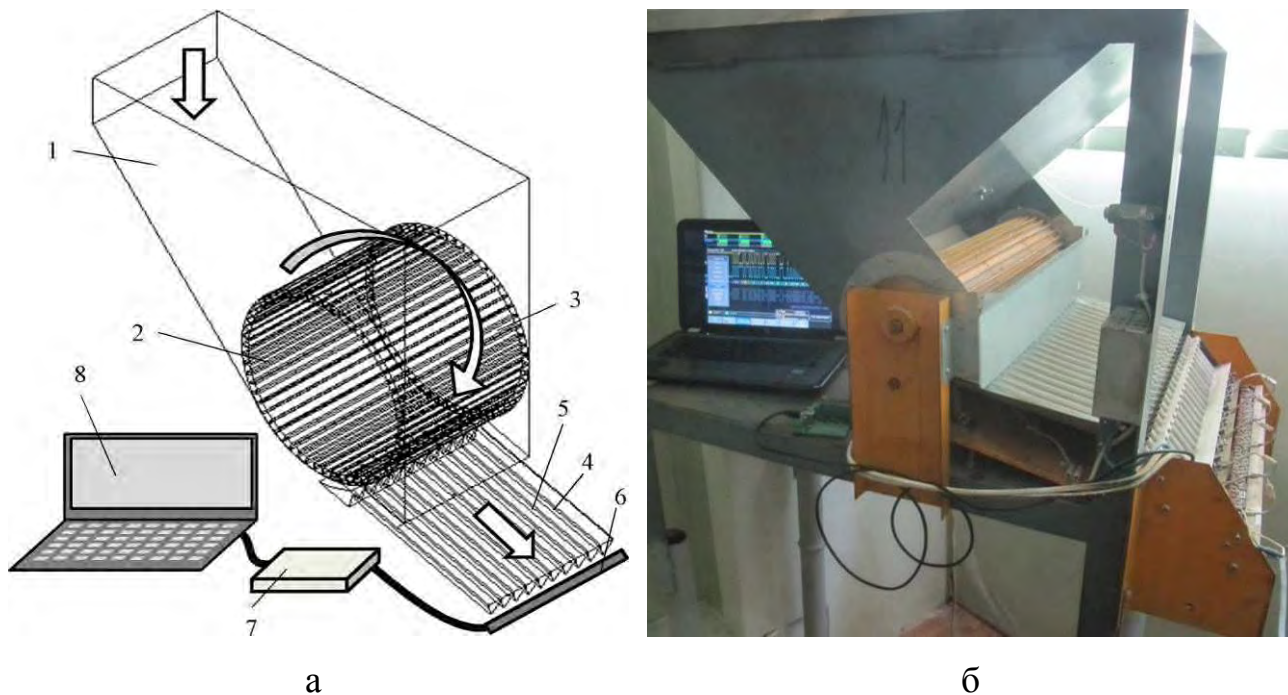
Конструктивно-технологічна схема та загальний вигляд експериментального зразка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора представлена на рисунку 3.8. Для забезпечення певної подачі насіння використовується відкалібрована заслінка, яка обмежує вхідну продуктивність.

Частота і амплітуда вібрації вібрототка забезпечується за допомогою зміни напруги лабораторного блока живлення, який приєднано до вібродвигуна. Обертання барабану здійснювалося з використанням двигуна постійного струму, що дозволило змінювати частоту його обертання шляхом зміни напруги.

Слід зазначити, що вібрототок складається з 20 однакових повздовжніх каналів, по яких переміщується насіння.

Принципова електрична схема фотопреривачів, які підключені до аналого-цифрового перетворювача представлено на рисунку 3.9. Контрольно-вимірювальна апаратура працює наступним чином. Падаюче насіння з

повздовжнього каналу потрапляє між випромінювачем і приймачем фотопреривача. В результаті чого виникає сигнал, який потрапляє до аналого-цифрового перетворювача, який оцифровується і відображається у персональному комп'ютері. Там відбувається вимірювання часу між падаючими насінинами.

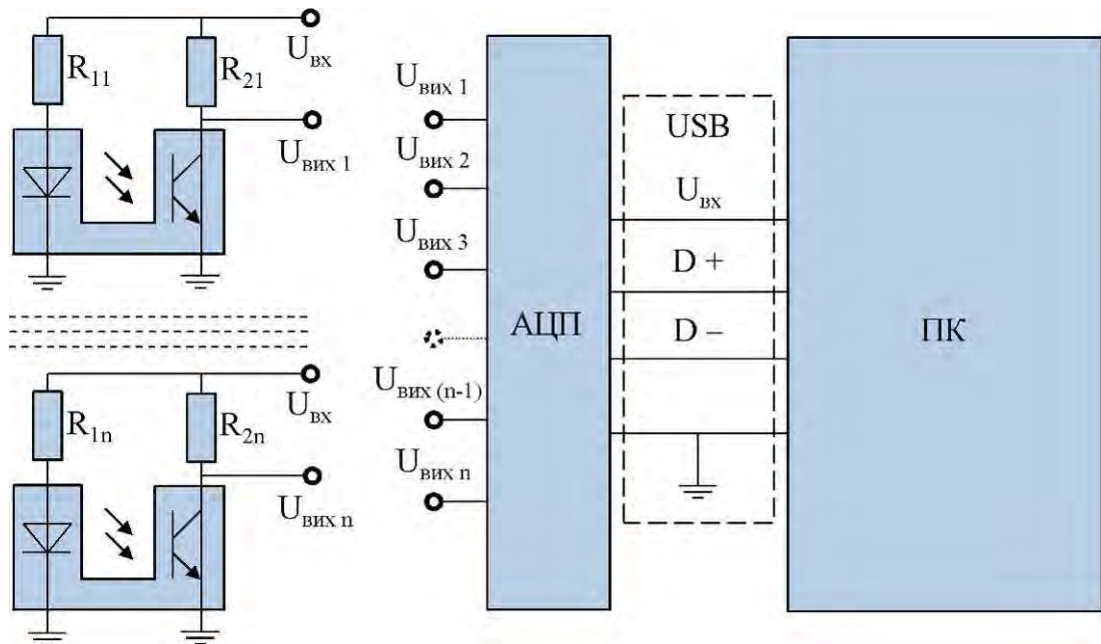


1 – бункер; 2 – барабан; 3 – лопаті; 4 – вібралоток; 5 – повздовжні канали;
6 – фотопреривачі; 7 – аналого-цифровий перетворювач; 8 – персональний
комп'ютер

Рисунок 3.8 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментального зразка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень експериментального зразка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було насіння соняшнику сортозразків колекції Інституту олійних культур НААН (розділ 4.1), які були відкалібровані на решетах із розміром комірок $3,6 \times 20$ мм.

На основі проведених теоретичних досліджень для проведення експериментальних досліджень блока подачі насіння було відібрано три фактори, які найбільш вагомо впливають на робочий процес і обрано їх натуральні значення на нульовому рівні та рівні їх варіювання. Інтервали і рівні варіювання факторів при проведенні досліджень наведені у таблиці 3.5.



АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПК – персональний комп'ютер

Рисунок 3.9 – Принципова електрична схема фотопереривачів

В якості критеріїв оптимізації було прийнято:

- продуктивність блока подачі насіння – q , кг/год;
- споживана потужність – P , кВт;
- середній інтервал часу між падаючим насінням – t , с.

Продуктивність блока подачі насіння q визначалася шляхом вимірювання маси насіння M , що пройшло через нього, і відповідного часу τ . Розрахунок проводився за формулою (3.2).

Потужність, що витрачається блоком подачі насіння, вимірювалася з використанням повіреного електролічильника NIK 2303 АРПЗ 1140 і розраховувалася за формулою (3.3).

Таблиця 3.5 – Рівні та інтервали варіювання факторів при проведенні досліджень процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Подача насіння Q, кг/год (x ₁)	Частота коливань вібрлотка ψ , с ⁻¹ (x ₂)	Частота обертання барабана n, об/хв. (x ₃)
Верхній рівень (+)	150	10	15
Основний рівень (0)	90	7,5	10
Нижній рівень (-)	30	5	5
Інтервал варіацій факторів	60	2,5	5

Середній інтервал часу між падаючим насінням визначався за допомогою фотопреривачів під'єднаних через аналого-цифровий перетворювач до персонально комп'ютера і розраховувався за формулою:

$$t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.4)$$

де N – кількість насінин;

t_i – інтервал часу між двома падаючими насінинами, с.

Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок блока подачі 10 кг насінин.

Дослідження проводились за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 3 факторів у трикратній повторності. Матриця плану представлено в таблиці М.1.

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів, виконувались за допомогою комп'ютерної програми «Mathematica» [399, 400]. Математична модель визначається по одному критерію оптимізації. Коефіцієнти регресії математичних моделей обчислюється за формулами для D-оптимальних планів дослідів [401, 402].

3.6.2 Методика експериментальних досліджень блока виходу насіння

Експериментальні дослідження блока виходу насіння проводилися на установці, що складалася з USB-реле STU2161407M-H, газових форсунок RAIL 67R-01 4303 і персонального комп'ютера з відповідним розробленим програмним забезпеченням (рисунок 3.10). Електронна апаратура працює наступним чином. Падаюче насіння з поздовжнього каналу блока подачі потрапляє в огляд камери блока розпізнавання. Там формується певний цифровий сигнал, який через USB-реле STU2161407M-H надходить до газових форсунок RAIL 67R-01 4303 вмикаючи їх. Стиснене повітря з компресору потрапляє на певну насініну і відштовхує її у приймальну камеру.

Для забезпечення заданого потоку насіння на блоці подачі насіння задаються певні режимні параметри відповідно до отриманих залежностей (розділ 4.5.1).

Принципова електрична схема блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора представлено на рисунку 3.11.

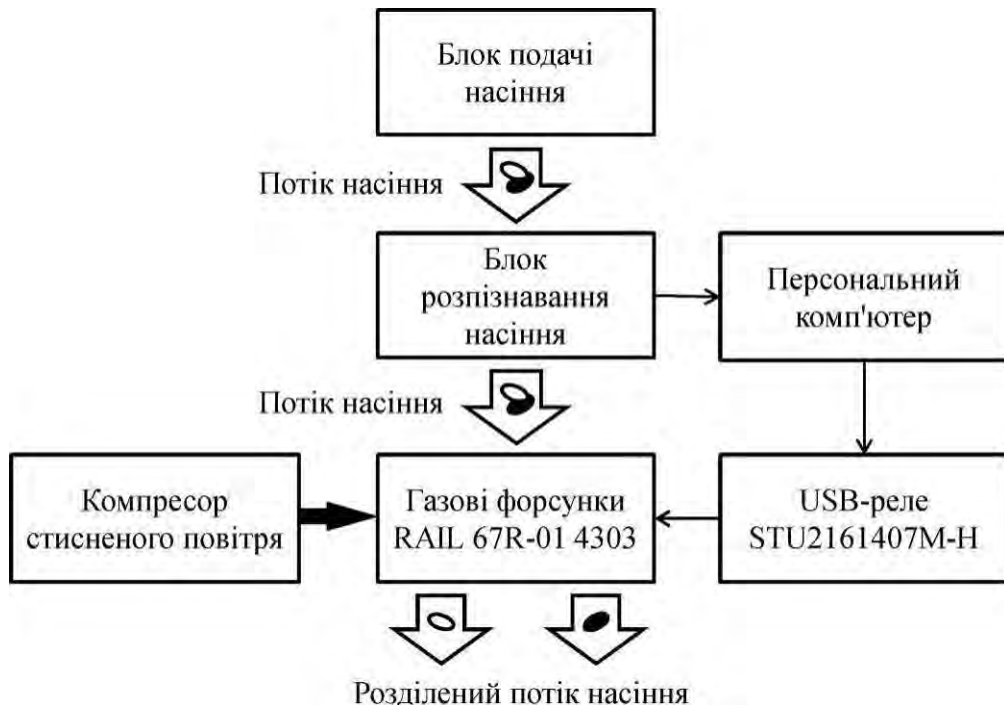
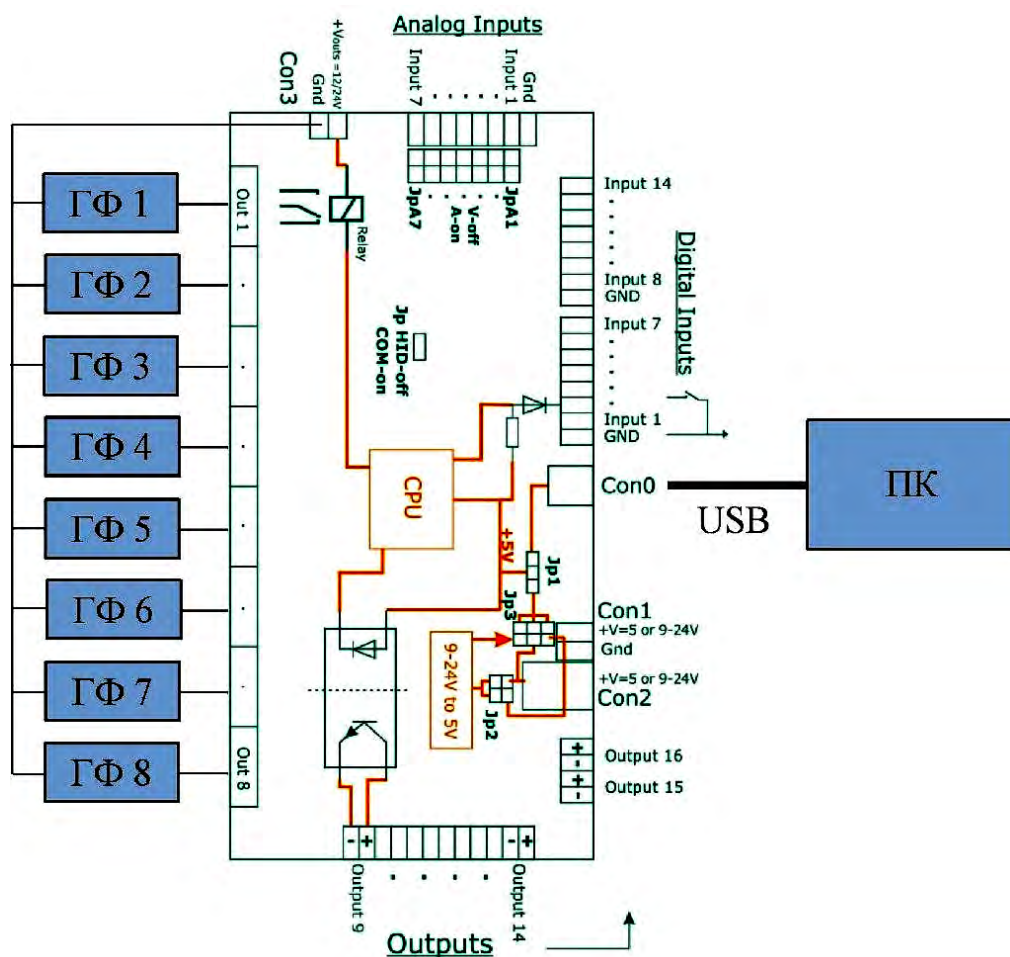


Рисунок 3.10 – Конструктивно-технологічна схема експериментального зразка блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень експериментального зразка блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора були насіння соняшнику сортозразків колекції Інституту олійних культур НААН (розділ 4.1), які були відкалібровані на решетах із розміром комірок розміру $3,6 \times 20$ мм.

В якості фактора досліджень було обрано інтервал часу між двома падаючими насінинами t в інтервалі від 0,03 с до 0,2 с, який задавався шляхом встановлення певних режимних параметрів блока подачі насіння відповідно до результатів розділу 4.5.1.



ГФ – газова форсунка; ПК – персональний комп’ютер

Рисунок 3.11 – Принципова електрична схема блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора

В якості критерію оцінки ефективності роботи блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора була обрано ймовірність реагування газової форсунки, яка розраховувалась за формулою:

$$p = \frac{N_n}{N_3}, \quad (3.5)$$

де N_n – кількість насінин, які потрапили під потік повітря з газової форсунки, шт;

N_3 – загальна кількість насінин, шт.

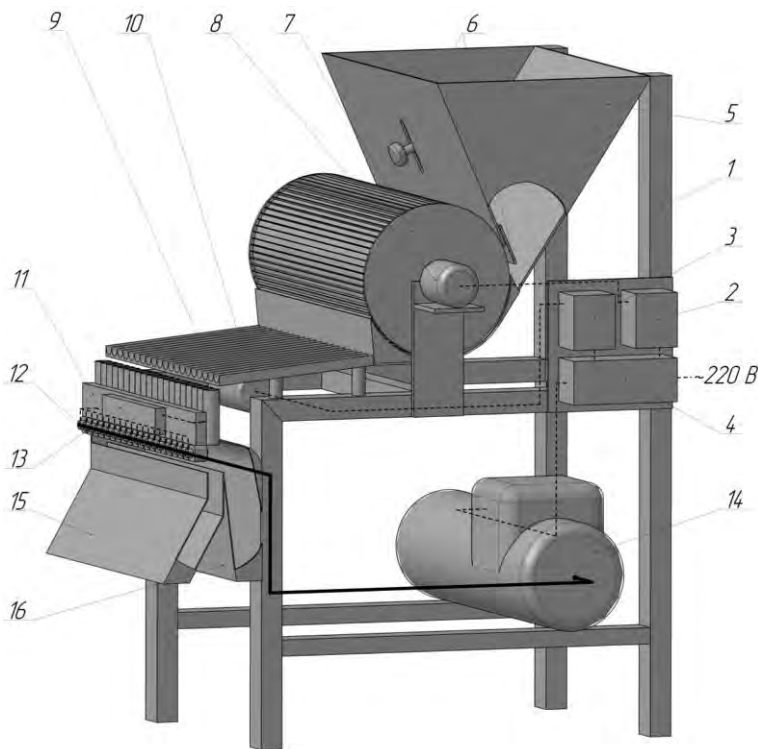
Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок блока виходу 10000 насінин.

Обробка результатів досліджень у вигляді математичної моделі виконувались за допомогою комп'ютерної програми «Mathematica».

3.6.3 Методика експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора насіння

Експериментальні дослідження проводилися на установці, що складалася з експериментального зразка фотоелектронного сепаратора, частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive, лабораторного блока живлення із можливістю зміни напруги і лічильника електроенергії NIK 2303 АРПЗ 1140. Експериментальний зразок фотоелектронного сепаратора містив бункер, відкалібровану заслінку, барабан із радіальними лопатями, електродвигун, вібрлоток із 20 однакових повздовжніх каналів, вібродвигун, фотоелектронну систему реєстрації насіння, газові форсунки RAIL 67R-01 4303, USB-реле керування STU2161407M-H, повітряний компресор (рисунок 3.12).

Фотоелектронний сепаратор працює наступним чином. Насіння з бункера через відкалібровану заслінку потрапляє на барабан, який приводиться в дію електродвигуном. Далі насіння розподіляється по довжині барабана і переміщується до повздовжніх каналів вібрлотка, який виконує механічні коливання під дією вібродвигуна.



а



б

1 – експериментальний зразок фотоелектронного сепаратора; 2 – частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive; 3 – лабораторний блок живлення;
 4 – лічильник електроенергії NIK 2303 АРПЗ 1140; 5 – бункер;
 6 – відкалібрована заслінка; 7 – барабан із радіальними лопатями;
 8 – електродвигун; 9 – вібралоток; 10 – вібродвигун; 11 – фотоелектрона система реєстрації насіння; 12 – газові форсунки RAIL 67R-01 4303; 13 – USB-реле керування STU2161407M-H; 14 – повітряний компресор; 15 – камера ліквідних насінин; 16 – камера неліквідних насінин

Рисунок 3.12 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки

Падаюче насіння з поздовжнього каналу вібралотка потрапляє в огляд фотодатчиків фотоелектронної система реєстрації насіння. Там формується певний цифровий сигнал, який через USB-реле STU2161407M-H надходить до газових форсунок RAIL 67R-01 4303. Якщо насінина має зазначений колір газова форсунка відкривається, а в протилежному випадку є закритою.

Стиснене повітря з повітряного компресору через відкриту газову форсунку потрапляє на насінину і відштовхує її у приймальну камеру неліквідних насінин. Всі інші насінини потрапляють у приймальну камеру ліквідних насінин.

Для забезпечення певної подачі насіння використовувалася відкалібрована заслінка, яка обмежує вхідну продуктивність. За допомогою зміни напруги здійснювалася зміна частоти обертів ротора електродвигуна постійного струму і як наслідок барабана. Зміна частоти вібрації вібралотка здійснювалася за допомогою зміни напруги лабораторного блока живлення, який приєднано до вібродвигуна. Часова затримка спрацьовування газової форсунки і чутливість фотодатчиків фотоелектронної система реєстрації насіння змінюється за допомогою відповідних змінних резисторів.

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень була насіннева суміш соняшнику, яка були відкалібровані до розміру 2,8-3,0 мм. До складу насінневої суміші входили наступні різнобарвні сортозразки соняшнику селекції Інституту олійних культур НААН: Сл2613, 14RNA274, ВК419-2, ІnK225 – 1 група; ІnK404, І2K2218, ВІР130, КГ9 – 2 група (рисунок 3.13, таблиця М.2).

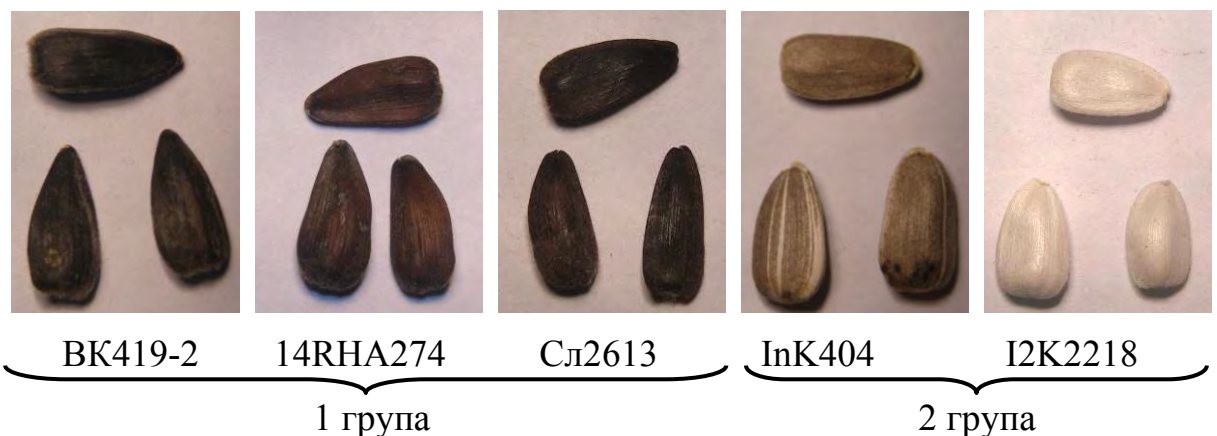


Рисунок 3.13 – Забарвлення сортозразків соняшнику, що входять до складу вхідної насінневої суміші

На основі проведених попередніх теоретичних (розділ 2.4) і експериментальних досліджень (розділи 4.5.1, 4.5.2) в якості найбільш вагомих факторів було обрано: подача насіння Q , частота коливань вібралотка ψ , частота обертання барабана n , часова затримка спрацьовування форсунки Δt , чутливість фотодатчика λ . Інтервали і рівні варіювання факторів при проведенні досліджень наведені у таблиці 3.6.

В якості критеріїв оптимізації було прийнято: продуктивність q , кг/год; споживану потужність P , кВт; сумарну концентрацію насіння θ , %.

Продуктивність фотоелектронного сепаратора q визначалася шляхом вимірювання маси насіння M , що пройшло через нього, і відповідного часу τ . Розрахунок проводився за формулою (3.2).

Потужність, що витрачається фотоелектронним сепаратором, вимірювалася з використанням повіреного лічильника електроенергії NIK 2303 АРПЗ 1140 і розраховувалася за формулою (3.3).

Сумарна концентрація насіння θ – це сума масових концентрацій неліквідних насінини у приймальній камері ліквідних насінин і ліквідних насінини у приймальній камері неліквідних насінин. Чим нижче сумарна концентрація, тим вище якість технологічного процесу сепарації насіння.

Таблиця 3.6 – Рівні та інтервали варіювання факторів при проведенні експериментальних досліджень процесу роботи фотоелектронного сепаратора

Рівні варіацій факторів	Фактори				
	Подача насіння Q , кг/год	Частота коливань вібралотка ψ , s^{-1}	Частота обертання барабана n , об/хв	Часова затримка спрацьовування форсунки Δt , мс	Чутливість фотодатчика λ , %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Верхній (+1)	15	10	15	140	90
Нульовий (0)	9	7,5	10	80	70
Нижній (-1)	3	5	5	20	50
Інтервал	6	2,5	5	60	20

Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок блока подачі 10 кг насінневої суміші.

Дослідження проводились за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 5 факторів у трикратній повторності. Матриця плану представлено в таблиці М.3.

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів, виконувались за допомогою комп'ютерної програми «Mathematica». Математична модель визначалася по кожному критерію оптимізації.

3.7 Методика експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння

В області очищення і розділення насінневого матеріалу важливе місце займає проблема пошуку насіння на основі їх колірних характеристик. До основних переваг використання кольору в якості ключової ознаки відносяться швидкість виділення об'єкта і мала мінливість від кута зору. Однак можна виділити дві проблеми, що ускладнюють використання кольору для пошуку об'єкта:

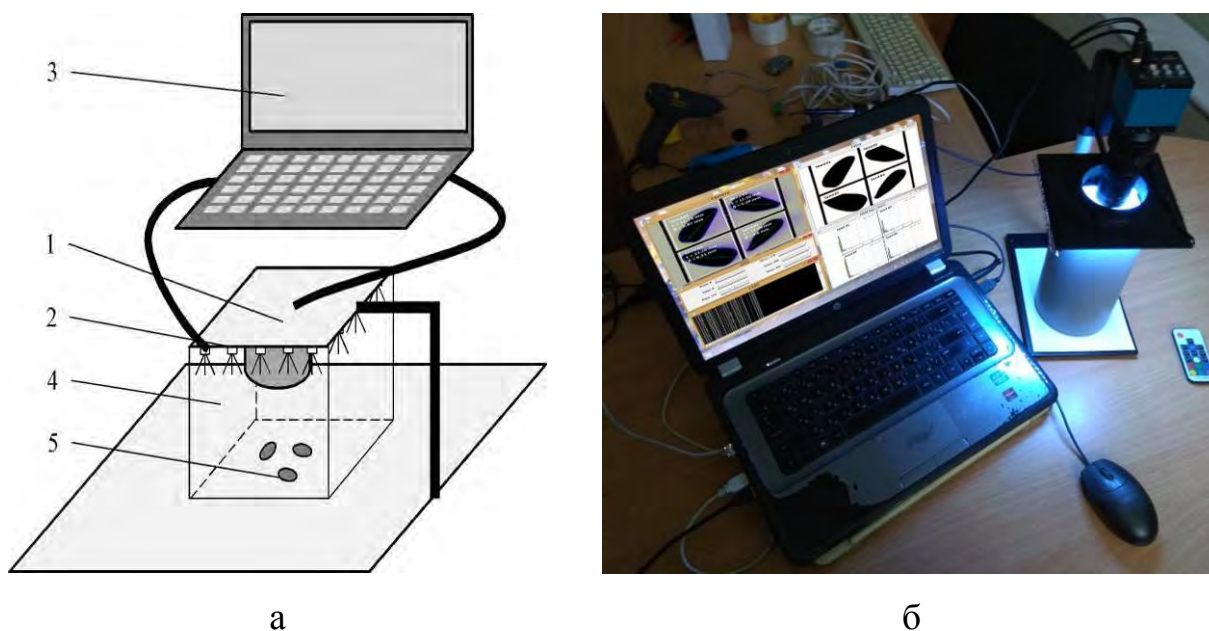
– проблема зміни інтенсивності освітлення і зміщення відтінків за рахунок джерела освітлення [403, 404];

– проблема інтерпретації кольорів, що виникає в разі команд і запитів оператора [405].

З огляду на перелічені проблеми, було поставлено завдання розробки пристрій для автоматичного фенотипування насіння і алгоритму пошуку і виділення насіння на основі інформації про забарвлення.

Дослідження були проведені на стенді (рисунок 3.14), який складався з наступних елементів: відеокамери Video Microscope Camera 1080P 16MP HDMI USB виробництва Eakins, набору світлодіодів трьох типів (червоний, зелений, синій) і персональний комп'ютер. Принцип роботи полягав в наступному:

оператор за допомогою вмикання світлодіодів задає освітлення певного кольору, а відеокамера фіксує розміщені в стаціонарному положенні або під час руху насіння і передає отримані дані на персональний комп'ютер.



1 – відеокамера Video Microscope Camera 1080P 16MP HDMI USB виробництва Eakins; 2 – набори світлодіодів трьох типів (червоний, зелений, синій); 3 – персональний комп'ютер; 4 – захисний екран; 5 – насіння

Рисунок 3.14 – Конструктивна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального пристрою для автоматичного фенотипування насіння

Алгоритм програмного забезпечення складається з наступних етапів:

- отримання зображення з відеокамери;
- переклад зображення з колірного простору RGB в HSV;
- фільтрація за кольором (настройка колірної маски);
- проведення основних морфологічних перетворень – розтягування і звуження;
- знаходження контурів знайденого об'єкта;
- відтисовка мітки.

До переваг даного алгоритму можна віднести наступні особливості:

- оператор вибирає діапазони за шкалами H , V , S , і в результаті відразу формується тривимірний простір в колірному просторі;
- оператор не обмежений набором тонів, відповідних базовому кольору або кольору, похідному з базових, він може вибирати будь-який діапазон колірних тонів на шкалі H , навіть об'єднуючи колірні тони сусідніх базових кольорів в один діапазон.

Для реалізації алгоритму було вирішено написати програму з використанням бібліотеки OpenCV.

На вхід відеопотоку подавалися різні насінини різних кольорів, розмірів і форм. Як вже зазначалося, для кожної насінини потрібно спеціально налаштувати кольорову маску. Щоб виділити потрібний колір, необхідно підібрати межі компоненту H . Параметр S відповідає за насиченість кольору. V визначає яскравість кольору. Затінений об'єкт буде мати низьке значення V .

При запуску програмного забезпечення пристрою для автоматичного фенотипування насіннєвого матеріалу з'являється 5 вікон (рисунки 3.15). Перше вікно (Camera) – оригінальне зображення з фотокамери при білому освітленні (всі світлодіоди увімкнені) із виділеними контурами насінин і їх геометричними розмірами. Друге вікно (Filter) – зображення з фотокамери після перетворення кольорової картини з колірний простору HSV в чорно-білу маску. У цій масці, всі пікселі, що потрапляють в заданий діапазон – стають білими. Інші – чорними. Третє вікно (HSV) – повзунки HSV, за допомогою яких налаштовується кольорова маска. Четверте вікно (RGB bar chart) – гістограми розподілу кольорів в колірному просторі RGB. П'яте вікно (CMD) – вікно вводу і виводу повідомлень і даних.

В результаті тестування були отримані наступні результати:

- алгоритм дозволяє коректно визначити насінини в просторі;
- при зміні положення насінини в просторі мітка коректно переміщується за ним;

– для правильної роботи алгоритму потрібне попереднє налаштування колірної маски;

– завдяки правильному вибору колірної моделі алгоритм стійкий по відношенню до зміни умов освітлення.

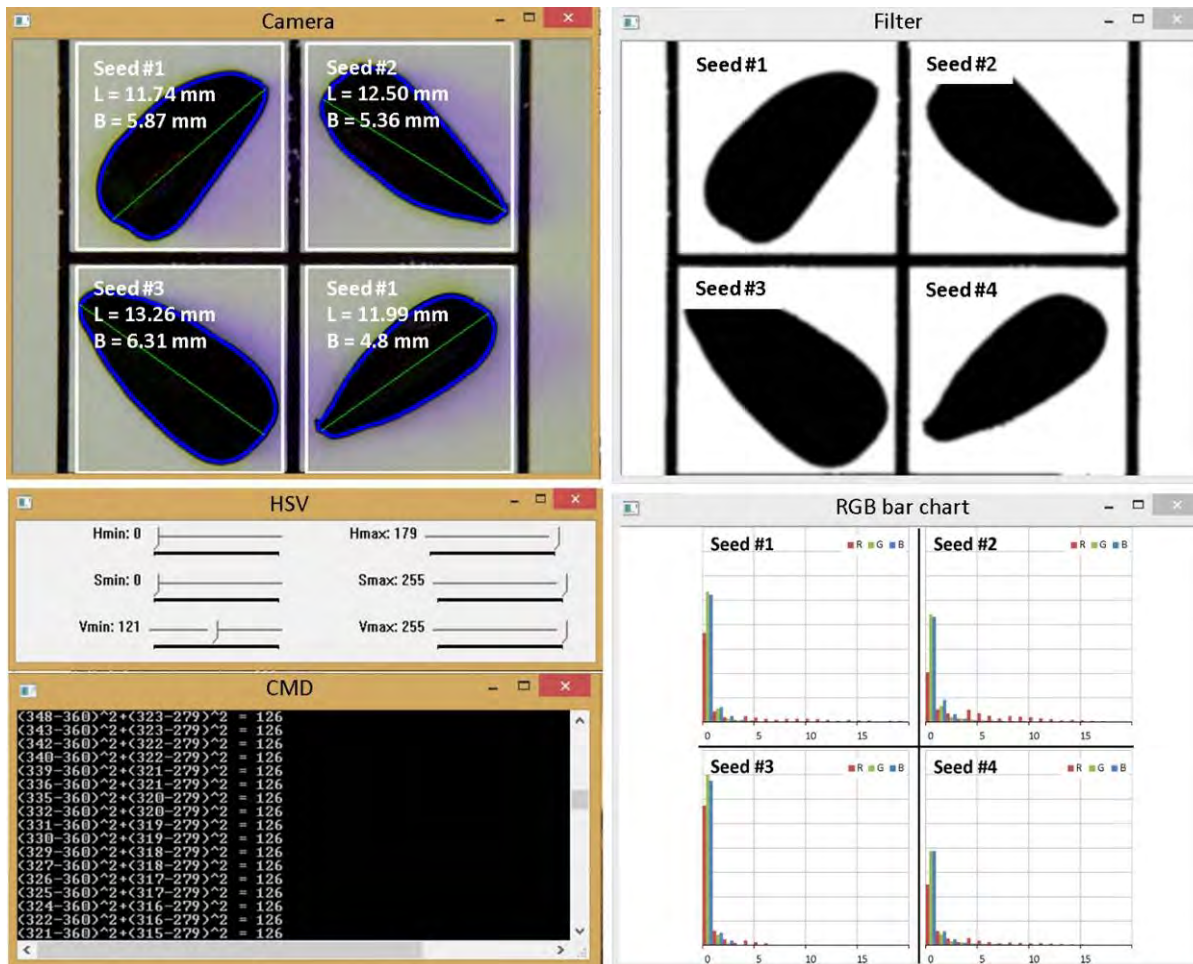


Рисунок 3.15 – Програмне забезпечення пристрою для автоматичного фенотипування насіннєвого матеріалу

В якості об'єкту дослідження було обрано насіння соняшника наступних сортотипів колекції Інституту олійних культур НААН: APS04, HA300B, HA07, I2K87, InK1276, LD4, AH70029RF, APS10, HA298, I2K670, I3K1070, In18906, InK85, InK1124, InK2830, LD722, LD723, M19, RHA273, SL2966, KГ13, KГ15, KГ111, KГ113, Л7242, Л259524, СЛ1218, СЛ2354, I2K20031, In7034, In18917. Обрані насіння сортотипів соняшника відрізнялися між собою за

маркерними ознаками, а саме за забарвленням.

В якості фактору досліджень було обрано освітлення, яке встановлювалося за допомогою вмикання або вимикання діодів певного кольору. Для досліджень було прийнято чотири типа освітлення: червоне ($R = 255, G = 0, B = 0$), зелене ($R = 0, G = 255, B = 0$), блакитне ($R = 0, G = 0, B = 255$) і біле ($R = 255, G = 255, B = 255$).

Для виділення чіткої області (границі) насіння в вікні чорно-білого зображення розробленого програмного забезпечення встановлювалися діапазони значень шкал кольорового простору HSV. Критеріями ідентифікації насіння є їх геометричні розміри (довжина L , ширина B і їх відношення) і гістограми розподілу кольорів областей насіння в колірному просторі RGB. В результаті досліджень слід було встановити похибку вимірювання геометричних розмірів, яка визначалася шляхом порівняння отриманих цифрових даних із показниками мікрометра 1 класу точності ($\pm 2,0$ мкм). Окрім цього необхідно визначити узагальнений універсальний показник забарвлення насіння.

3.8 Засоби статистичного оцінювання експерименту

Відтворення дослідів визначається по однорідності результатів вимірювань. Умови однорідності формалізуються так, щоб усі вимірювання, які входять у дану сукупність, могли виглядати, як значення однієї випадкової величини, підпорядкованої нормальному розподілу.

Умови однорідності дослідів припускають приблизно однаковий вплив помилок за усіма точками у плані досліду. Для перевірки відтворення дослідів використовують критерій Кохрена.

Це відношення максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій [406]:

$$G_p = \frac{\sigma_i^2 \max}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}, \quad (3.6)$$

де $\sigma_i^2 \max$ – найбільша порядкова дисперсія;

$\sum_{i=1}^N \sigma_i^2$ – сума порядкових дисперсій.

Дисперсія обчислюється по формулі [407]:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (Y_{i_u} - \bar{Y}_u)^2}{m-1}, \quad (3.7)$$

де Y_{i_u} – значення критерію оптимізації в u -му досліді по i -й повторності;

\bar{Y}_u – середнє значення критерію оптимізації в u -му досліді;

m – кількість повторностей у досліді.

Обчислюване значення дисперсії порівнюється з табличним, виходячи з чого дисперсії вважаються однорідними при умові $\sigma_p \leq \sigma_{\text{табл.}}$. При $\sigma_p > \sigma_{\text{табл.}}$ необхідно підвищити точність вимірів, або установити менші інтервали варіації факторів та збільшити кількість повторностей у досліді [408].

Табличне значення дисперсії визначається для 95 % рівня довірчої вірогідності та ступені свободи: $x = m - 1$. При визначенні похибки результатів дослідів враховується, що відхилення від середнього арифметичного значення не повинно перевищувати межі помилки $\pm 3\sigma$ (σ – середньоквадратичне відхилення). Тому відхилення, яке перевищує по своєму значенню $\pm 3\sigma$, показує, що його треба виключити з розгляду [407].

Довірчі межі випадкової похибки результатів вимірювань визначаються за критерієм Стьюдента:

$$\tau = t \cdot \sigma_{x_i}, \quad (3.8)$$

де t – коефіцієнт Стьюдента для довірчої вірогідності;

σ_{x_i} – середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань.

Коефіцієнт варіації розраховується за формулою [401]:

$$V = (\sigma_i / X_{\text{cp}}) \cdot 100\% . \quad (3.9)$$

Середньоквадратичне відхилення обчислюється за виразом [401]:

$$\sigma_i = \left[\left[\sum_{i=1}^m (X_i - X_{cp})^2 \right] / (m-1) \right]^{0.5}. \quad (3.10)$$

Середньоарифметичне значення вимірюваної величини:

$$X_{cp} = (\sum X_i) / m, \quad (3.11)$$

де X_i – значення вимірюваної величини;

m – кількість вимірювань у досліді.

Абсолютна похибка середнього арифметичного значення відхилення розраховується за формулою [401]:

$$\Delta = \pm 3 \sigma_i. \quad (3.12)$$

Похибка досліді визначається за виразом [401]:

$$\Pi = \pm 3 \sigma_i / X_{cp} \cdot 100\%. \quad (3.13)$$

З метою перевірки гіпотези по адекватності моделі другого порядку виконується статистичний аналіз рівнянь регресії. Адекватність моделі перевіряється за допомогою критерію Фішера [409, 410]:

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (3.14)$$

де S_{LF}^2 – дисперсія неадекватності математичної моделі;

S_y^2 – дисперсія помилки досліді.

Моделі адекватна у випадку коли виконується умова $F_p \leq F_{табл.}$

Значимість коефіцієнтів регресії перевіряється за допомогою визначення довірчого інтервалу для коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт регресії враховується значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу Δv_i , який визначається за формулою [409, 411]:

$$\pm \Delta v_i = \pm t S_{v_i}, \quad (3.15)$$

де S_{v_i} – квадратична похибка коефіцієнта регресії;

t – табличне значення t-критерію при числі ступенів свободи для S_y^2 .

Квадратична похибка коефіцієнта регресії дорівнює [409, 412]:

$$S_{vi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (3.16)$$

де N – кількість дослідів.

Якщо коефіцієнти значимі, це означає, що дія одного з них залежить від рівня, на якому знаходиться інший фактор. Якщо він має позитивний знак, то величина критерію оптимізації підвищується, тобто обидва фактора одночасно знаходяться на верхніх рівнях (або на нижніх). Якщо коефіцієнт має негативний знак, тоді підвищенню критерію оптимізації сприяють сполучення факторів на різних рівнях [413].

Після отримання математичної моделі процесу визначаються оптимальні значення факторів за координатами оптимуму поверхні відгуку, та вивчаються властивості цієї поверхні біля оптимуму. Пошук оптимуму ведеться методом канонічного перетворення математичної моделі у форму наступного вигляду [409, 414]:

$$Y - Y_s = B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 + \dots + B_{kk} X_k^2, \quad (3.17)$$

де Y_s – значення критерію оптимізації у оптимальній точці;

X_1, X_2, \dots, X_k – нові осі координат, повернуті відносно старих x_1, x_2, \dots, x_k ;

$B_{11}, B_{22}, \dots, B_{kk}$ – коефіцієнти регресії у канонічній формі.

Канонічне перетворення моделі виконується за встановленою методикою. Результатом перетворення рівняння регресії є форма поверхні відгуку та оптимальні координати поверхні відгуку або оптимальні значення факторів процесу змішування [415].

Пошук оптимуму ведеться рішенням компромісної задачі, після визначення математичних моделей процесу за оцінювальними показниками та визначення оптимальних параметрів. На початку виділяються найбільш значимі фактори по кожній моделі та їх оптимальні параметри, потім із загального списку визначаються спільні фактори і аналізується діапазон їхніх оптимальних значень.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику

Результати лабораторних досліджень зведені в таблицю Н.1.

Взаємна кореляція морфологічних показників насіння сортозразків соняшнику представлена на рисунку 4.1.

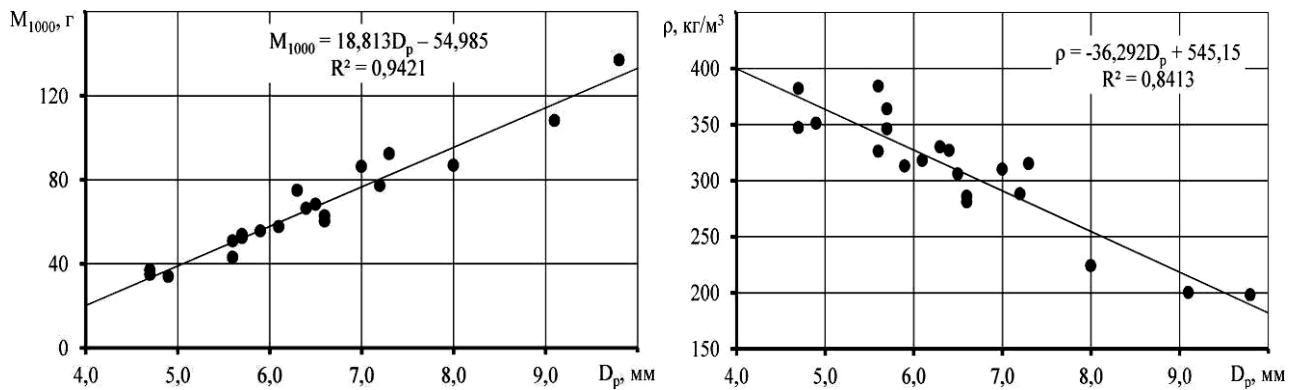


Рисунок 4.1 – Залежність маси 1000 насінин M_{1000} і об'ємної маси ρ від ефективного діаметра D_p насіння соняшнику

В результаті досліджень отримані залежності впливу вологості насіння W_b на ефективний діаметр D_p , масу 1000 насінин M_{1000} , об'ємної маси ρ , кут природного ухилу ϕ , коефіцієнт тертя f , графічна інтерпретація який представлена на рисунку 4.2.

Аеродинаміка насіння в повітряному потоці досліджувалася для різних фракцій попередньо розділеного за розмірами матеріалу. На рисунку 4.3 представлена лінія тренда, яка описує експериментальні залежності швидкостей витання від геометричних параметрів насіння (коефіцієнт детермінації складає $R^2 = 0,71$). Аналіз графіків показує, що із збільшення геометричних розмірів насіння швидкість їх витання збільшується лінійно.

Аналізуючи одержані дані та побудовані на основі них експериментальні залежності, можна зробити ряд висновків та встановити вплив вологості насіння соняшнику на досліджувані показники.

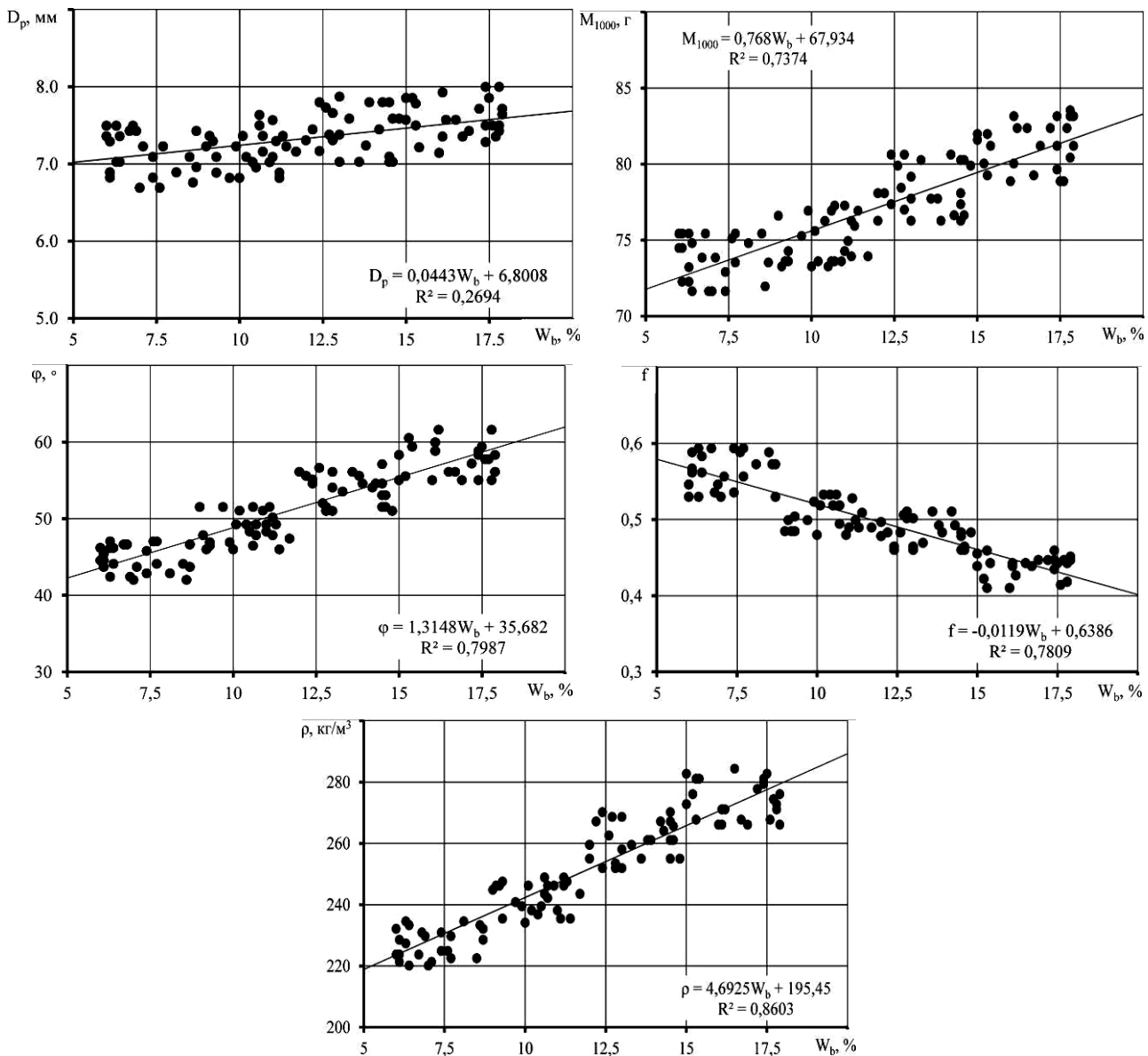


Рисунок 4.2 – Залежність впливу вологості насіння W_b на ефективний діаметр D_p , масу 1000 насінин M_{1000} , об'ємну масу ρ , кут природного ухилу φ , коефіцієнт тертя f

Вологість насіння соняшнику має істотний вплив фізико-механічні властивості. Прямі отриманих значень свідчать, що зі збільшенням вологості матеріалу значення показників, що досліджуються, збільшуються. Такий

характер кривих пояснюється тим, що при збільшенні вологості форма насінини наближається до кулястої, що в свою чергу призводить до збільшення кривизни поверхні і зменшення точок контакту між насінинами. Як наслідок, відбувається збільшення кута природного ухилу.

Коефіцієнт тертя насіння соняшнику значно залежить від шорсткості поверхні тертя і зменшується із збільшенням вологості. Це пояснюється тим, що при збільшенні вологості зменшуються сили молекулярного тяжіння оболонки насінини до поверхні матеріалу.

Підвищення вологості насіння соняшнику – суб'єктивний визначальний фактор її об'ємної маси. Зі збільшенням вологості, об'ємна маса насіння зростає. Цілком очевидно, що поглинання води матеріалом, призводить до збільшення сумарної маси насінини і, як наслідок – збільшення її об'ємної маси.

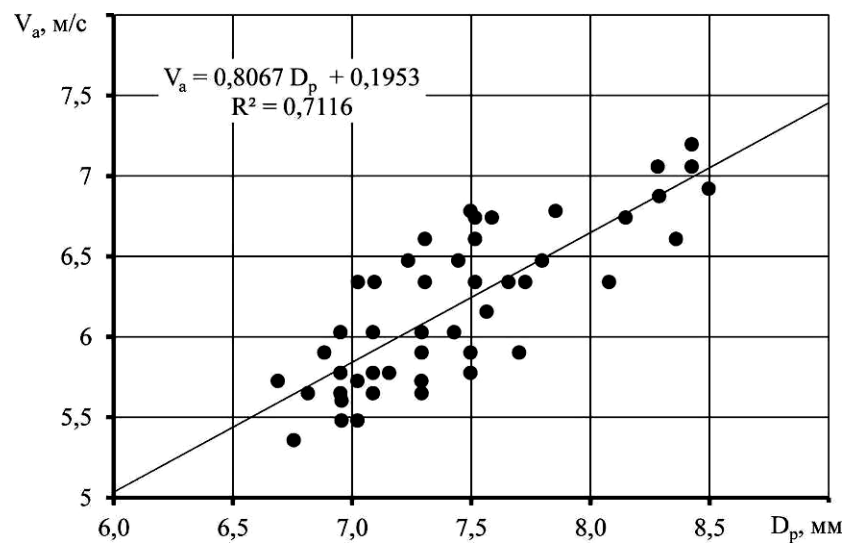


Рисунок 4.3 – Залежність швидкості витання V_a від ефективного діаметру насіння D_p

Кут природного ухилу насіння соняшнику зростає внаслідок підвищення вологості матеріалу. Це пояснюється тим, що зі збільшенням вологості сипкість будь-якого сільськогосподарського матеріалу зменшується, а це в результаті і призводить до збільшення кута природного ухилу.

В результаті досліджень виявлено особливість зміни кута нахилу прямої лінії тренда залежності швидкості витання від геометричних параметрів насіння соняшнику, що пояснюється, перш за все, їх формою.

З колекції соняшнику нами було виділено 12 груп, які відрізнялися між собою забарвленням і наявністю панцирності і антоціана. Забарвлення насіння соняшнику у сортозразків з встановлених груп представлено в таблиці Н.2 і рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 – Візуальне сприйняття забарвлення насіння соняшнику

На основі проведених досліджень, можна стверджувати, що при проектуванні та розрахунку машини для очищення та розділення насіннєвого матеріалу соняшнику в якості вихідних розмірних показників насіння можуть бути прийняті їх середні значення. Також дані дослідження зі встановлення фізико-механічних властивостей насіння соняшнику дозволять отримати вихідні дані для моделювання процесу їх очищення та розділення, вибору оптимальних параметрів машин для забезпечення зазначених процесів.

4.2 Результати експериментальних досліджень процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями

В результаті досліджень на першому етапі отримані числові дані об'ємних мас важких ρ_h і легких ρ_l компонентів в результаті сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки), які представлені в таблиці П.1.

Графічна інтерпретація результатів порівняння теоретичних залежностей (2.41)-(2.42) і експериментальних даних представлено на рисунку 4.5.

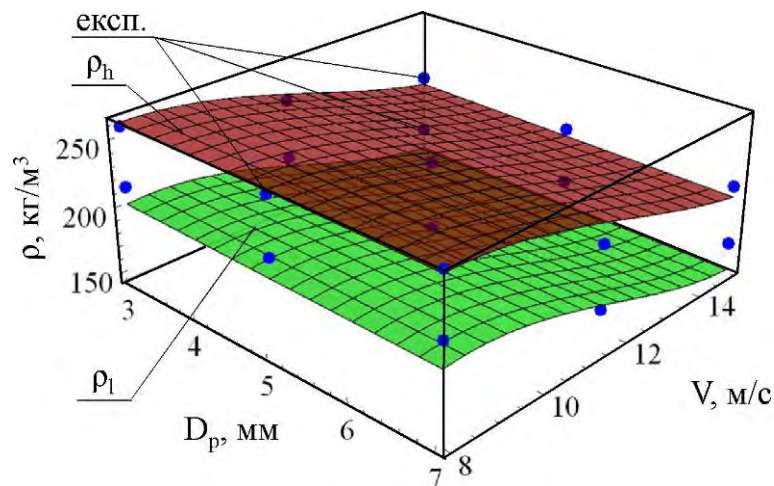


Рисунок 4.5 – Порівняння теоретичних залежностей зміни об'ємних мас важких ρ_h (2.41) і легких ρ_l (2.42) компонентів і експериментальних даних (краски) процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

Порівнюючи отримані дані з теоретичними залежностями (2.41)-(2.42) встановлено критерій Фішера, який складає $F = 2,21 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$ для рівняння (2.41) і $F = 2,16 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$ для рівняння (2.42). При цьому коефіцієнт кореляції становить $R = 0,953$ для рівняння (2.41) і $R = 0,948$ для рівняння (2.42). З урахуванням вищезазначеного можна стверджувати про адекватність теоретичних залежностей (2.41)-(2.42).

Процес дослідження розділення насінневого матеріалу соняшнику на аеродинамічному сепараторі серії «Алмаз» у другому етапі експериментальних досліджень представлено на рисунку 4.8.



Рисунок 4.6 – Процес дослідження розділення насінневого матеріалу соняшнику на аеродинамічному сепараторі серії «Алмаз»

В результаті розділення насінневого матеріалу соняшнику на аеродинамічному сепараторі серії «Алмаз» отримано фракції, які можна розділити на 4 групи: виповнені; неповністю виповнені і пусті; голе ядро і уражене грибковими хворобами; органічні (рослинні) домішки (рисунок 4.7). Згідно методики лабораторних досліджень (розділ 3.2) визначено об'ємну масу

і швидкість витання отриманих фракцій:

– виповнені – $\rho = 272 \pm 18 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 7,8 \pm 0,6 \text{ м/с}$;

– неповністю виповнені і пусті – $\rho = 248 \pm 19 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 6,8 \pm 0,5 \text{ м/с}$;

– голе ядро і уражене грибковими хворобами – $\rho = 314 \pm 15 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 8,9 \pm 0,5 \text{ м/с}$;

– органічні (рослинні) домішки – $\rho = 213 \pm 20 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 5,1 \pm 0,7 \text{ м/с}$.



виповнені
 $\rho = 272 \pm 18 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 7,8 \pm 0,6 \text{ м/с}$



неповністю виповнені і пусті
 $\rho = 248 \pm 19 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 6,8 \pm 0,5 \text{ м/с}$



голе ядро і уражене грибковими
хворобами
 $\rho = 314 \pm 15 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 8,9 \pm 0,5 \text{ м/с}$



органічні (рослинні) домішки
 $\rho = 213 \pm 20 \text{ кг/м}^3$, $V_a = 5,1 \pm 0,7 \text{ м/с}$

Рисунок 4.7 – Фракції насінневого матеріалу соняшнику

Експериментальні дослідження проводились із застосуванням методу математичного планування багатофакторного експерименту, який дозволяє визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії. Зведені дані

результатів досліджень представлені в таблицях П.3 – П.2.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на коефіцієнт розподілу δ мала вигляд:

$$\delta = 73,7176 - 1,74862 x_1 + 0,0444444 x_1^2 + 6,24326 x_2 + 1,76716 x_1 x_2 - 2,50626 x_2^2. \quad (4.18)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена $G = 0,2594 < G_{0,05}(2, 9) = 0,4775$. Дисперсія адекватності математичної моделі $S_{ад}^2 = 1,879$; дисперсія похибки дослідів $S_y^2 = 1,4870$; значення критерію Фішера $F = 1,26 < F_{0,05}(5, 18) = 2,77$, модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента $t_{0,05}(18) = 2,1$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є всі коефіцієнти. У розкодованому вигляді модель (4.18) має вигляд:

$$\delta = 54,7034 - 1,74862 Q + 3,25366 V - 0,10025 V^2. \quad (4.19)$$

Аналізуючи рівняння (4.19), можна стверджувати, що на коефіцієнт розподілу δ впливають всі вищезгадані фактори. При цьому зі збільшенням швидкості повітря V збільшується і коефіцієнт розподілу δ . А при збільшенні подачі насіння Q , коефіцієнт розподілу δ зменшується. Графічна інтерпретація отриманої експериментальної (4.19) і теоретичної (2.77) залежностей при $D_{p1} = 6$ мм та $D_{p2} = 7$ мм представлена на рисунок 4.8. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (2.77) і експериментальною (4.19) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,86.

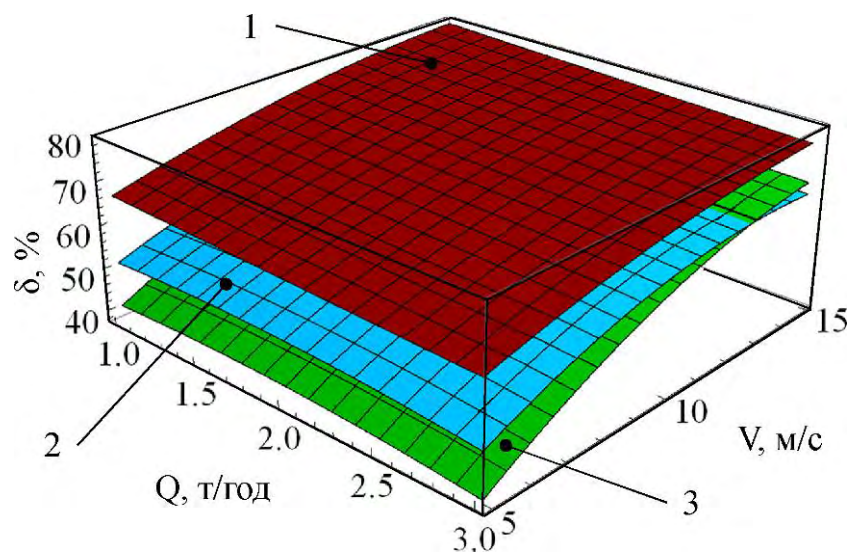
Математична модель впливу досліджуваних факторів на потужність, що споживається експериментальною установкою, мала вигляд:

$$P = 1,62667 + 0,0116667 x_1 - 0,0183333 x_1^2 + 0,995556 x_2 - 0,000833333 x_1 x_2 - 0,01 x_2^2. \quad (4.20)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена $G = 0,1675 < G_{0,05}(2, 9) = 0,4775$.

Дисперсія адекватності математичної моделі $S_{ад}^2 = 0,00215$; дисперсія похибки дослідів $S_y^2 = 0,00135$; значення критерію Фішера $F = 1,59 < F_{0,05}(7, 18) = 2,58$; модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(18) = 2,1$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є всі коефіцієнти. У розкодованому вигляді модель (4.20) має вигляд:

$$P = - 0,364444 + 0,199111 V. \quad (4.21)$$



1 – експериментальна залежність (4.19); 2 – теоретична залежність (2.77) при $D_p = 6$ мм; 3 – теоретична залежність (2.77) при $D_p = 7$ мм

Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від подачі насіння Q і швидкості повітря V

Графічна інтерпретація отриманої залежності (4.21) представлена на рисунку 4.9. Аналізуючи рівняння (4.21), можна стверджувати, що на потужність, що споживається експериментальною установкою, лінійно впливає тільки швидкості повітря V . Що є абсолютно логічним, так як основним споживачем енергії є генератор повітряного потоку (вентилятор).

Завданням вирішення компромісної задачі була мінімізація потужності P , що споживається експериментальною установкою, при максимальному значенні коефіцієнта розподілу δ і подачі насіння Q , тобто:

$$\begin{cases} \delta(Q, V) \rightarrow \max, \\ P(Q, V) \rightarrow \min, \\ Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.22)$$

Перетворимо систему рівнянь (4.22) до вигляду:

$$\frac{P(Q, V)}{Q \times \delta(Q, V)} \rightarrow \min. \quad (4.23)$$

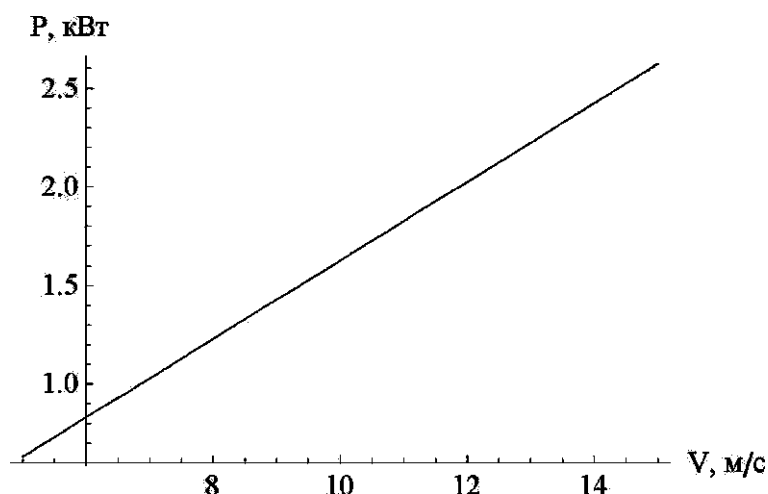


Рисунок 4.9 – Залежність потужності P , що споживається експериментальною установкою, від швидкості повітря V

Вирішення задачі (4.23) за допомогою програмного пакету Mathematica призвели до оптимальних технологічних режимів процесу сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією повітряного потоку:

$$Q = 1,49 \text{ т/год}, V = 5,49 \text{ м/с}, \delta = 66,9 \%, P = 0,72 \text{ кВт}. \quad (4.24)$$

4.3 Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами

Процес дослідження розділення насіннєвого матеріалу соняшнику на калібрувальній машині ОКМФ представлено на рисунку 4.10.

В результаті розділення насіннєвого матеріалу соняшнику на калібрувальній машині ОКМФ отримано фракції, які можна розділити на 2 групи: прохід 3,6 і сід 3,6 (рисунок 4.11).



Рисунок 4.10 – Процес дослідження розділення насінневого матеріалу соняшнику на калібрувальній машині ОКМФ



прохід 3,6

схід 3,6

Рисунок 4.11 – Фракції насінневого матеріалу соняшнику

За даними, що отримані в результаті експериментальних досліджень (таблиця Р.1), з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав продуктивність q із факторами досліджень у

вигляді:

– для пробивних решіт:

$$q = -5592,57 + 0,527369 Q + 177,915 \alpha - 35,583 \psi \alpha + 2113,22 \psi - 179,262 \psi^2; \quad (4.25)$$

– для пруткових решіт:

$$q = -7202,09 + 0,706424 Q + 171,881 \alpha - 34,3762 \psi \alpha + 2670,95 \psi - 229,179 \psi^2; \quad (4.26)$$

– для точних решіт:

$$q = -7277,2 + 0,642679 Q + 177,512 \alpha - 39,6273 \psi \alpha + 2721,17 \psi - 232,098 \psi^2. \quad (4.27)$$

Порівнюючи отримані експериментальні моделі (4.25)–(4.27) із моделлю чисельного моделювання (2.126) можна стверджувати їх взаємну кореляцію, що підтверджується відповідними коефіцієнтами кореляції $R(4.25) = 0,91$, $R(4.26) = 0,92$, $R(4.27) = 0,91$.

За даними, що отримані в результаті експериментальних досліджень (таблиця Р.2 і додаток Р.4), з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав сумарну концентрацію насіння θ із факторами досліджень у вигляді:

– для пробивних решіт:

$$\theta = 109,431 + 0,00867581 Q - 0,00173516 \psi Q - 2,68759 \alpha + 0,43346 \psi \alpha - 30,9058 \psi + 2,56031 \psi^2; \quad (4.28)$$

– для пруткових решіт:

$$\theta = 98,6656 + 0,00845081 Q - 0,00169016 \psi Q - 2,31106 \alpha + 0,392071 \psi \alpha - 28,0976 \psi + 2,33626 \psi^2; \quad (4.29)$$

– для точних решіт:

$$\theta = 88,203 + 0,0111675 Q - 0,0022335 \psi Q - 2,17078 \alpha + 0,384571 \psi \alpha - 26,2659 \psi + 2,32216 \psi^2. \quad (4.30)$$

Порівнюючи отримані експериментальні моделі (4.28)–(4.30) із моделлю чисельного моделювання (2.129) можна стверджувати їх взаємну кореляцію, що

підтверджується відповідними коефіцієнтами кореляції $R(4.28) = 0,79$, $R(4.29) = 0,78$, $R(4.30) = 0,81$.

За даними, що отримані в результаті експериментальних досліджень (таблиця Р.3), з використанням програмного пакету Mathematica складено математичний вираз, який зв'язав потужність P із факторами досліджень у вигляді:

– для пробивних решіт:

$$P = -0,00351984 + 0,0000625 Q + 0,03125 \psi; \quad (4.31)$$

– для пруткових решіт:

$$P = 0,0803921 + 0,000106 Q + 0,0111 \psi; \quad (4.32)$$

– для точних решіт:

$$P = 0,0913286 + 0,0000793333 Q + 0,0198333 \psi. \quad (4.33)$$

Як видно з залежностей (4.31)–(4.33) на потужність P лінійно впливають тільки подача насіння Q і частота коливань решета ψ .

Статистичний аналіз отриманих експериментальних даних і математичних моделей (4.25)–(4.33) представлено в таблиці 4.1, а їх графічна інтерпретація на рисунках 4.12–4.14.

Аналіз представлених емпіричних залежностей доводить необхідність вирішення компромісної задачі, яка полягає у наступному: для забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією вібруючого решета необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q , при цьому сумарна концентрація насіння θ і потужність P , що споживається калібрувальною машиною, повинні бути мінімальними:

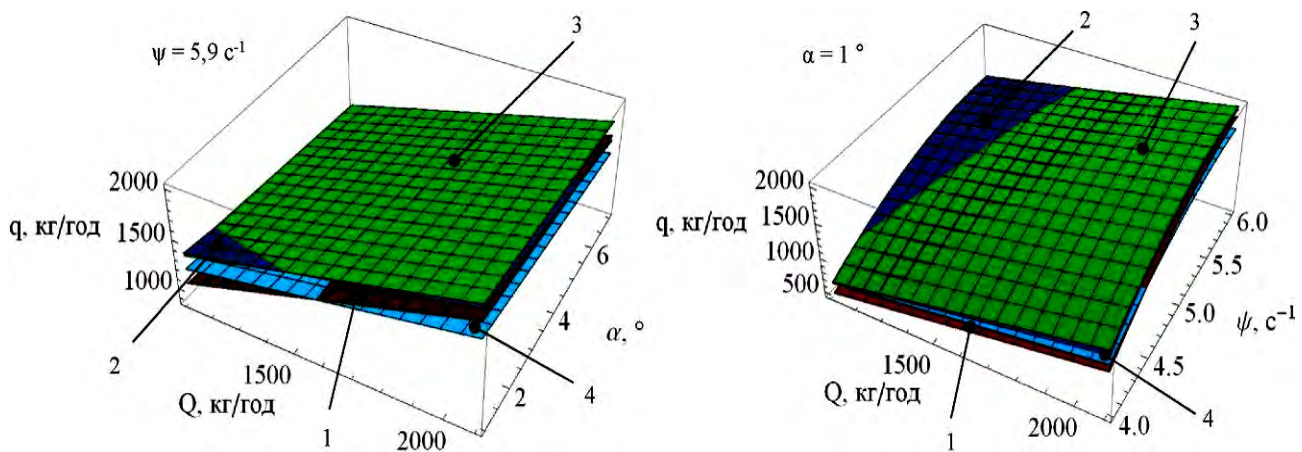
$$\begin{cases} q(Q, \alpha, \psi) = Q \rightarrow \max, \\ \theta(Q, \alpha, \psi) \rightarrow \min, \\ P(Q, \alpha, \psi) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4.34)$$

З використанням програмного пакету Mathematica рішенням системи рівнянь (4.34) для результатів експериментальних досліджень представлено в

таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Статистичний аналіз отриманих експериментальних даних і моделей

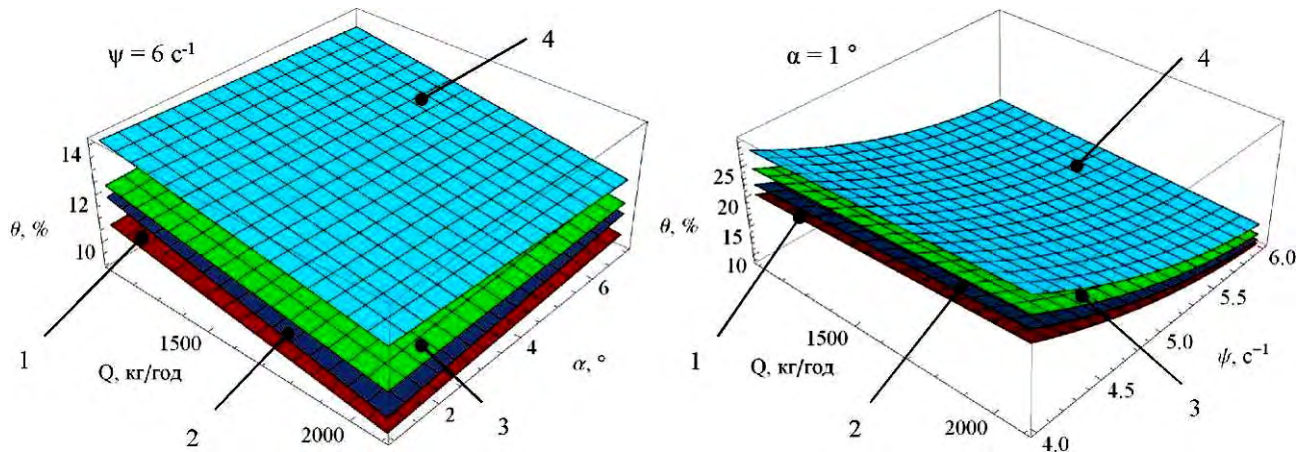
Вид решета	Продуктивність q , кг/год		Сумарна концентрація насіння θ , %		Потужність P , кВт	
	Критерій Кохрена	Критерій Фішера	Критерій Кохрена	Критерій Фішера	Критерій Кохрена	Критерій Фішера
Пробивні	$G=0,1918 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,85 < F_{0,05}(9, 30)=2,21$	$G=0,1010 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,62 < F_{0,05}(8, 30)=2,27$	$G=0,1215 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,34 < F_{0,05}(11, 30)=2,13$
Пруткові	$G=0,1144 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,39 < F_{0,05}(9, 30)=2,21$	$G=0,1320 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,15 < F_{0,05}(8, 30)=2,27$	$G=0,1461 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,49 < F_{0,05}(11, 30)=2,13$
Точні	$G=0,1207 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,88 < F_{0,05}(8, 30)=2,27$	$G=0,1350 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,26 < F_{0,05}(8, 30)=2,27$	$G=0,1368 < G_{0,05}(2, 15)=0,3346$	$F=1,37 < F_{0,05}(11, 30)=2,13$



1 – дані чисельного моделювання; 2 – пробивні решета;

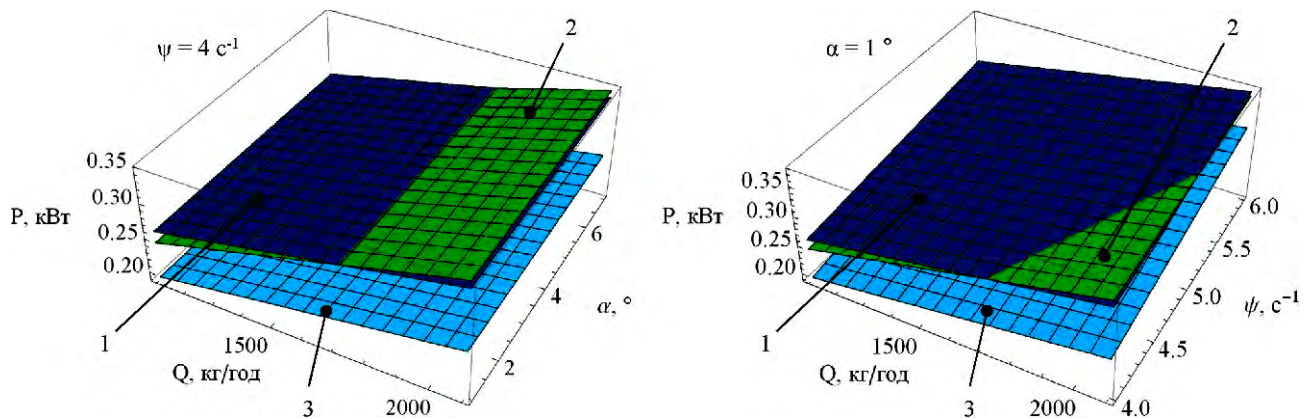
3 – пруткові решета; 4 – точні решета

Рисунок 4.12 – Залежність продуктивності q від подачі насіння Q , кута нахилу решета α і частоти коливань решета ψ



1 – дані чисельного моделювання; 2 – пробивні решета;
3 – пруткові решета; 4 – точні решета

Рисунок 4.13 – Залежність сумарної концентрації насіння θ від подачі насіння Q , кута нахилу решета α і частоти коливань решета ψ



1 – пробивні решета; 2 – пруткові решета; 3 – точні решета

Рисунок 4.14 – Залежність потужності P , що споживається калібрувальною машиною від подачі насіння Q , кута нахилу решета α і частоти коливань решета ψ

З таблиці 4.2 видно, що точні решета (виготовлені шляхом лазерної різки) мають найліпші показники за продуктивністю ($q = 1781$ кг/год), якістю ($\theta = 10,41$ %) і енерговитратами ($P = 0,35$ кВт). При цьому частота їх коливань повинна складати $\psi = 5,9$ Гц, а кут їх нахилу $\alpha = 5^\circ$.

Таблиця 4.2 – Раціональні режимно-технологічні параметри механіко-технологічного процесу калібрування насіння соняшнику під дією вібруючого решета

Вид решета	$Q = q$, кг/год	α , °	ψ , Гц	θ , %	P , кВт
Пробивні	1116	4,5	5,5	14,54	0,24
Пруткові	1518	6,2	5,5	12,45	0,30
Точні	1781	5,0	5,9	10,41	0,35

4.4 Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою

Процес дослідження розділення насінневого матеріалу соняшнику на пневмовібростолі типу ПВС представлено на рисунку 4.15.



Рисунок 4.15 – Процес дослідження розділення насінневого матеріалу соняшнику на пневмовібростолі типу ПВС

В результаті розділення насінневого матеріалу соняшнику на пневмовібростола типу ПВС отримано фракції, які можна розділити на 3 групи: виповнені; неповністю виповнені, пусті і органічні (рослинні) домішки; голе ядро і уражене грибковими хворобами (рисунок 4.16).

Згідно методики лабораторних досліджень (розділ 3.2) визначено об'ємну

масу отриманих фракцій:

– виповнені – $\rho = 263 \pm 17 \text{ кг/м}^3$;

– неповністю виповнені, пусті і органічні (рослинні) домішки – $\rho = 224 \pm 21 \text{ кг/м}^3$;

– голе ядро і уражене грибковими хворобами – $\rho = 301 \pm 14 \text{ кг/м}^3$.



виповнені
($\rho = 263 \pm 17 \text{ кг/м}^3$)



голе ядро і уражене грибковими
хворобами
($\rho = 224 \pm 21 \text{ кг/м}^3$)



неповністю виповнені, пусті і
органічні (рослинні) домішки ($\rho = 301 \pm 14 \text{ кг/м}^3$)

Рисунок 4.16 – Фракції насінневого матеріалу соняшнику

Експериментальні дослідження проводились із застосуванням методу математичного планування багатofакторного експерименту, який дозволяє

визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії. Зведені дані результатів досліджень представлені в таблицях С.1 – С.2.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на коефіцієнт розподілу δ мала вигляд:

$$\begin{aligned} \delta = & 73,0534 + 0,0104167 x_1 - 0,272222 x_1^2 - 4,9812 x_2 + 1,54167 x_1 x_2 - \\ & - 3,68775 x_2^2 - 1,05618 x_3 - 0,708333 x_1 x_3 + 1,34503 x_2 x_3 - \\ & - 8,39268 x_3^2 - 10,2233 x_4 + 0,75 x_1 x_4 + 0,660879 x_2 x_4 - \\ & - 4,72683 x_3 x_4 + 6,16355 x_4^2 + 6,51598 x_5 + 0,0416667 x_1 x_5 + \\ & + 3,64629 x_2 x_5 - 10,6318 x_3 x_5 + 1,5 x_4 x_5 - 6,66665 x_5^2. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності значення критерію Фішера складає $F = 1,46 < F_{0,05}(31, 90) = 1,57$, модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента $t_{0,05}(90) = 1,98$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти: $x_2, x_2^2, x_3, x_3^2, x_4, x_3x_4, x_4^2, x_5, x_2x_5, x_3x_5, x_4x_5, x_5^2$.

У розкодованому вигляді модель (4.35) має вигляд:

$$\begin{aligned} \delta = & - 294,326 - 9,721 \alpha - 0,921938 \alpha^2 + 56,3625 \beta - 2,09817 \beta^2 + \\ & + 211,655 V + 3,64629 \alpha V - 10,6318 \beta V - 26,6666 V^2 - \\ & - 20,2457 \psi - 0,945367 b \psi + 1,2 V \psi + 0,986169 \psi^2. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Аналізуючи рівняння (4.36), можна стверджувати, що на коефіцієнт розподілу δ не впливає подача насіння Q . При цьому для швидкості повітряного потоку V і кутів нахилу деки α і β спостерігається оптимум при якому коефіцієнт розподілу δ приймає максимальне значення; а при збільшенні частоти коливань деки ψ коефіцієнт розподілу δ зменшується за параболою. Характер експериментальних залежностей такий самий, як і у теоретичних. Тому опис їх фізичної суті є відповідним.

Коефіцієнт розподілу δ є максимальним при наступних оптимальних значеннях факторів досліджень:

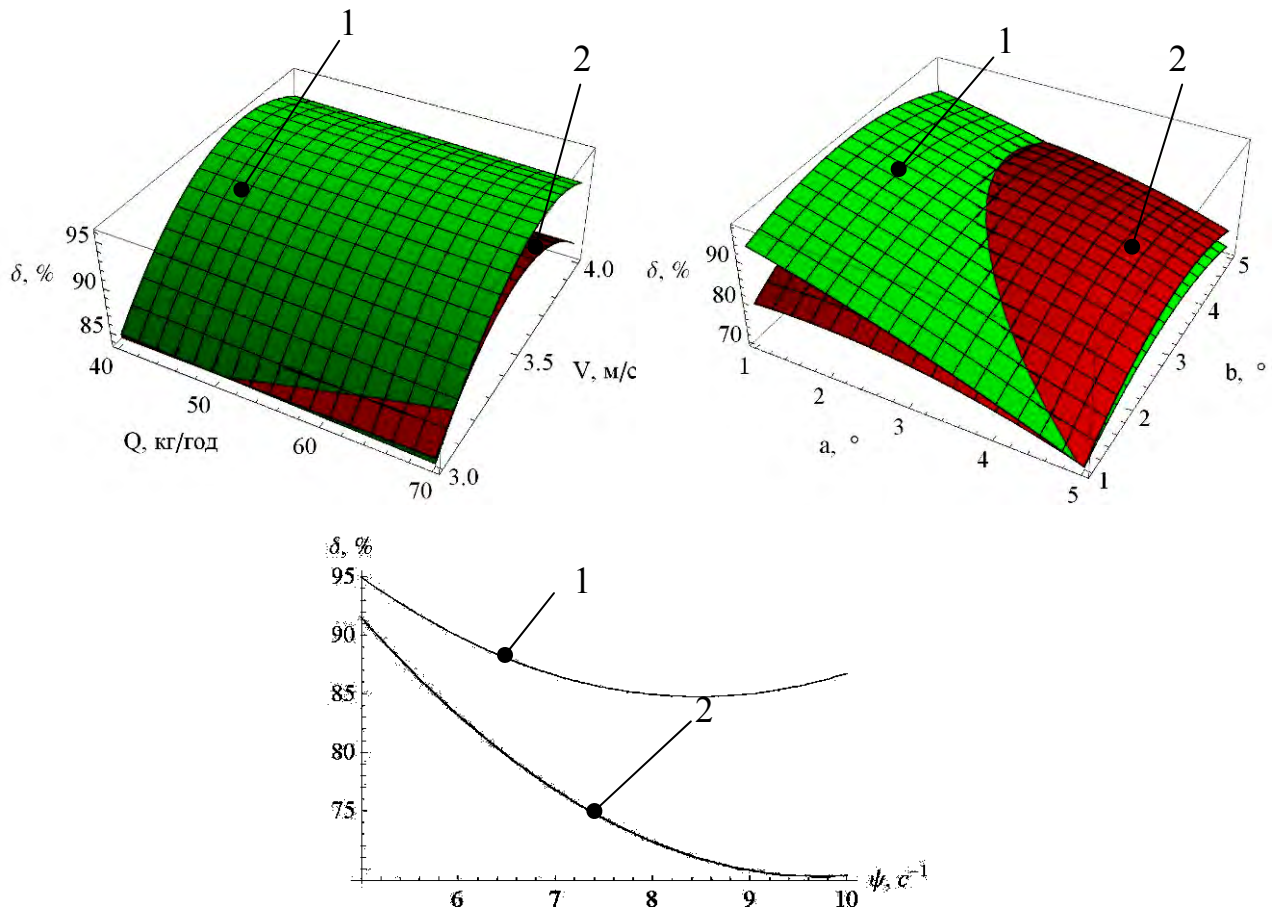
$$\delta = 91,5 \%, \alpha = 1,7^\circ, \beta = 3,4^\circ, \psi = 5 \text{ Гц}, V = 3,5 \text{ м/с}. \quad (4.37)$$

Графічна інтерпретація отриманої експериментальної (4.36) і теоретичної (2.176) залежностей при $A = 0,013 \text{ м}$ представлена на рисунку 4.17. Статистичний аналіз

показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (2.176) і експериментальною (4.36) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,92.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність пневмовібростола q мала вигляд:

$$\begin{aligned}
 q = & 1056,09 + 298,112 x_1 - 52,7528 x_1^2 + 168,418 x_2 + 109,278 x_1 x_2 - \\
 & - 241,515 x_2^2 + 49,4937 x_3 + 39, x_1 x_3 + 1,13687 \cdot 10^{-13} x_2 x_3 - \\
 & - 50,9194 x_3^2 - 41,5117 x_4 + 25,8015 x_1 x_4 - 35,3333 x_2 x_4 - \\
 & - 68,8333 x_3 x_4 - 59,7946 x_4^2 + 155,567 x_5 + 37,1667 x_1 x_5 + \\
 & + 42,6091 x_2 x_5 + 1,83333 x_3 x_5 - 64,5679 x_4 x_5 + 18,525 x_5^2.
 \end{aligned} \tag{4.38}$$



1 – теоретична залежність (2.176); 2 – експериментальна залежність (4.36)

Рисунок 4.17 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від подачі насіння Q , швидкості повітряного потоку V , частоти коливань деки ψ , кутів нахилу деки α і β при оптимальних значеннях (4.41)

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності значення критерію

Фішера складає $F = 1,55 < F_{0,05}(26, 90) = 1,62$, модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(90) = 1,98$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти: $x_1, x_1^2, x_2, x_1x_2, x_2^2, x_3, x_1x_3, x_3^2, x_4, x_2x_4, x_3x_4, x_4^2, x_5, x_1x_5, x_2x_5, x_4x_5, x_5^2$.

У розкодованому вигляді модель (4.38) має вигляд:

$$\begin{aligned} q = & -1901,46 + 159,113 \alpha - 60,3788 \alpha^2 + 136,126 \beta - 12,7299 \beta^2 + \\ & + 0,46994 Q + 0,136598 \alpha Q + 0,04875 \beta Q - 0,000329705 Q^2 - \\ & - 208,153 V + 42,6091 \alpha V + 0,185833 Q V + 74,1 V^2 + 370,192 \psi - \\ & - 7,06667 \alpha \psi - 13,7667 \beta \psi - 51,6543 V \psi - 9,56714 \psi^2. \end{aligned} \quad (4.39)$$

Аналізуючи рівняння (4.39), можна стверджувати, що на продуктивність пневмовібростола q впливають всі фактори досліджень. При цьому із збільшенням подачі насіння Q і кута нахилу деки α продуктивність q збільшується за параболою; швидкість повітряного потоку V і кут нахилу деки β прямо пропорційно впливає на продуктивність q ; із збільшенням частоти коливань ψ продуктивність q зменшується за параболою. Характер експериментальних залежностей такий самий, як і у теоретичних. Тому опис їх фізичної суті є відповідним.

Продуктивність пневмовібростола q є максимальною при наступних оптимальних значеннях факторів досліджень:

$$q = Q = 1800 \text{ кг/год}, \alpha = 4,5^\circ, \beta = 5^\circ, \psi = 5 \text{ Гц}, V = 4 \text{ м/с}. \quad (4.40)$$

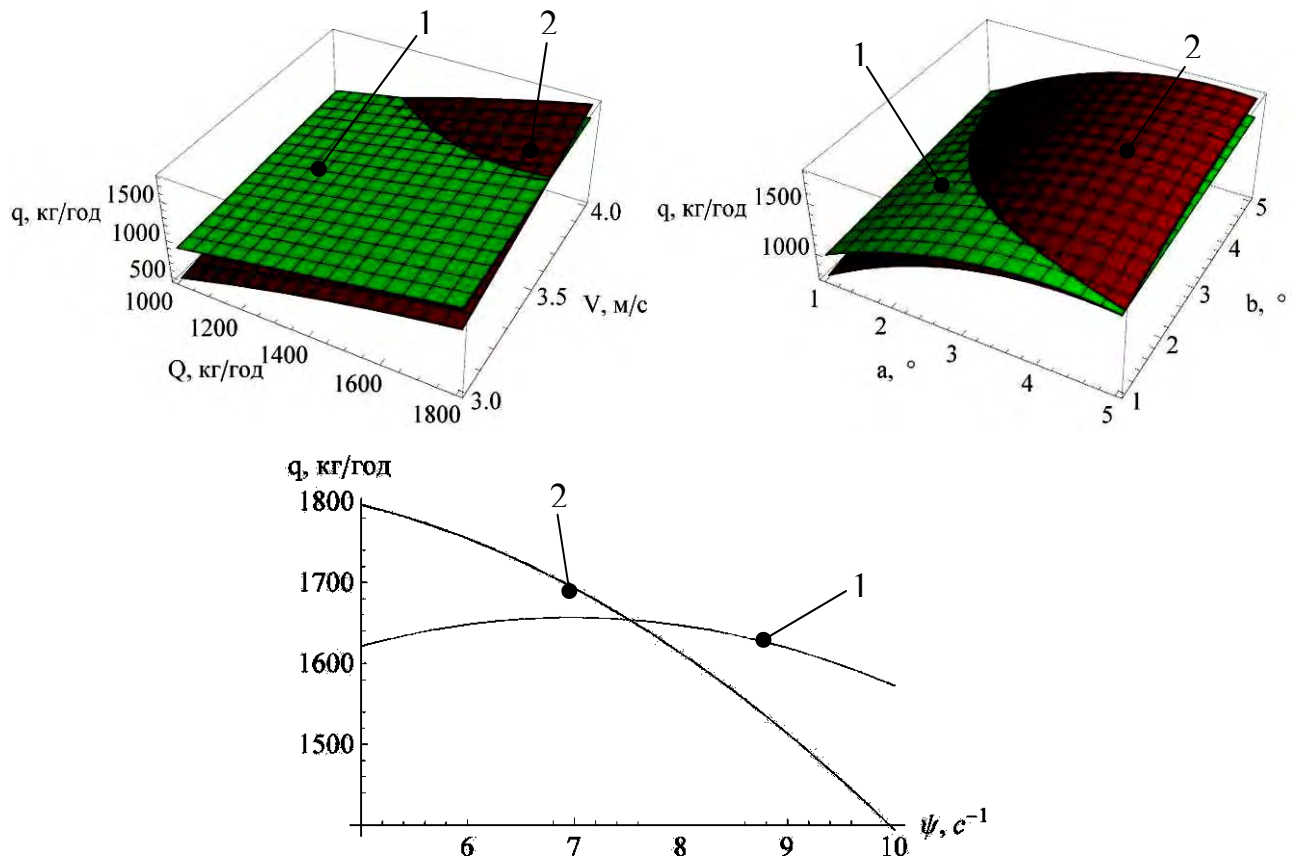
Графічна інтерпретація отриманої експериментальної (4.39) і теоретичної (2.170) залежностей при $A = 0,013$ м представлена на рисунку 4.18. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (2.170) і експериментальною (4.39) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,91.

Математична модель впливу досліджуваних факторів на потужність P , що споживається експериментальною установкою, мала вигляд:

$$P = 2,48264 + 0,287569 x_1 - 0,0535417 x_1^2 - 0,256875 x_2 + \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned}
& + 0,0208333 x_1 x_2 - 0,0252083 x_2^2 - 0,2725 x_3 + 0,0483333 x_1 x_3 + \\
& \quad + 1,66533 \cdot 10^{-16} x_2 x_3 - 0,044375 x_3^2 + 0,157917 x_4 - \\
& - 0,00916667 x_1 x_4 - 0,03 x_2 x_4 - 0,0508333 x_3 x_4 + 0,00173611 x_4^2 + \\
& + 0,200833 x_5 + 0,0391667 x_1 x_5 + 0,06 x_2 x_5 + 0,00916667 x_3 x_5 - \\
& \quad - 0,0183333 x_4 x_5 + 0,00951389 x_5^2.
\end{aligned}$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності значення критерію Фішера складає $F = 1,12 < F_{0,05}(30, 90) = 1,58$, модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(90) = 1,98$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти: $x_1, x_1^2, x_2, x_2^2, x_3, x_1 x_3, x_3^2, x_4, x_3 x_4, x_5, x_1 x_5, x_2 x_5$.



1 – теоретична залежність (2.170); 2 – експериментальна залежність (4.39)

Рисунок 4.18 – Залежність продуктивності пневмовібростоло q від подачі насіння Q , швидкості повітряного потоку V , частоти коливань деки ψ , кутів нахилу деки α і β при оптимальних значеннях (4.40)

У розкодованому вигляді модель (4.41) має вигляд:

$$\begin{aligned}
 P = & 1,19276 - 0,300625 \alpha - 0,00630208 \alpha^2 - 0,0780208 \beta - 0,011093 \beta^2 + \\
 & + 0,000789236 Q + 0,0000604167 \beta Q - 3,3463 \cdot 10^{-7} Q^2 - 0,0525 V + \\
 & + 0,06 \alpha V + 0,000195833 Q V + 0,0936667 \psi - 0,0101667 \beta \psi.
 \end{aligned} \quad (4.42)$$

Потужність P є мінімальною при наступних оптимальних значеннях факторів досліджень:

$$P = 1,16 \text{ кВт}, Q = 1000 \text{ кг/год}, \alpha = 5^\circ, \beta = 5^\circ, \psi = 5 \text{ Гц}, V = 3 \text{ м/с}. \quad (4.43)$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності (4.42) представлена на рисунку 4.19.

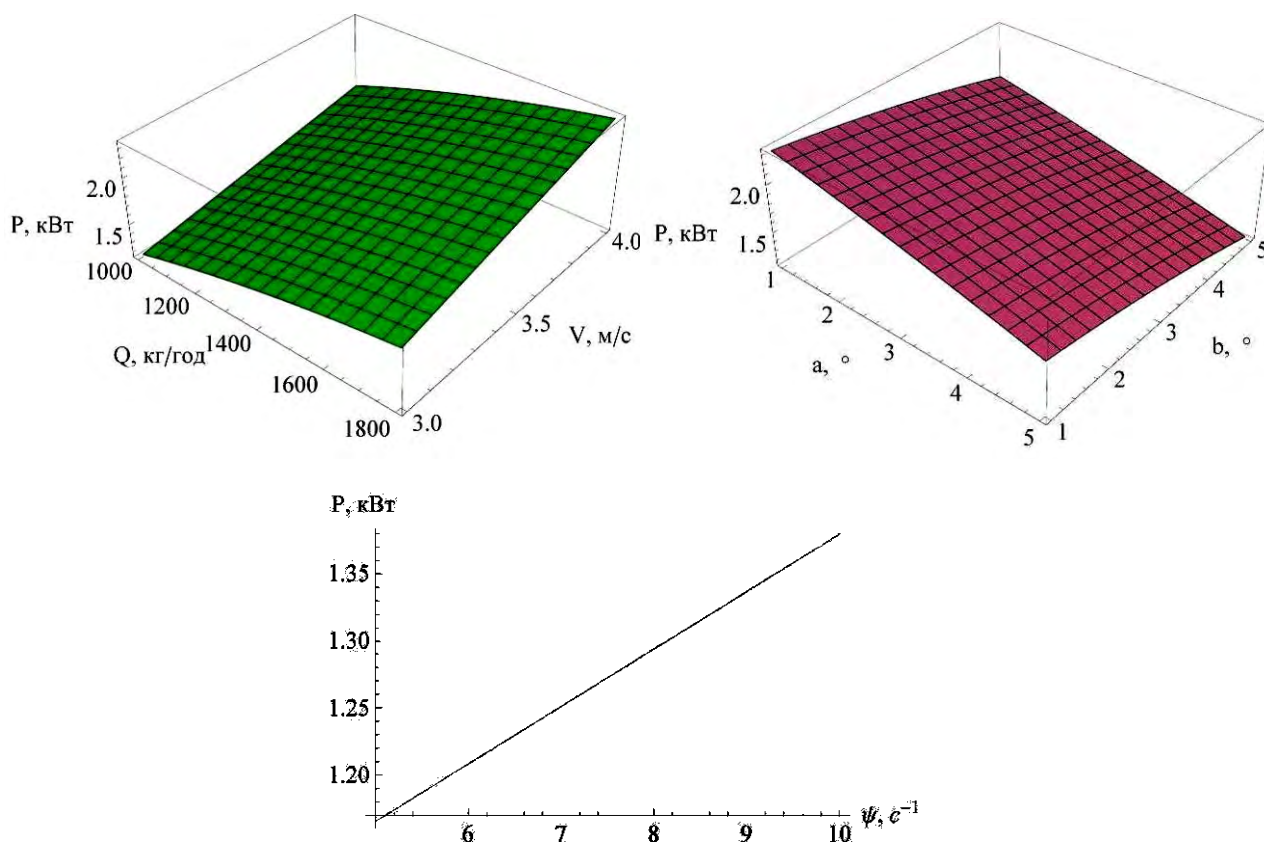


Рисунок 4.19 – Залежність потужності P , що споживається експериментальною установкою, від подачі насіння Q , швидкості повітряного потоку V , частоти коливань деки ψ , кутів нахилу деки α і β при оптимальних значеннях (4.44)

Аналізуючи рисунок 4.19, можна стверджувати, що на потужність P , що споживається експериментальною установкою прямо пропорційно впливають

подачі насіння Q , швидкості повітряного потоку V , частоти коливань деки ψ . Однак із збільшенням кутів нахилу деки α і β потужність P зменшується. Це є досить очевидним фактом, так як збільшення частоти і амплітуди коливань деки призводить до збільшення споживаної потужності її приводу. Аналогічно при збільшенні швидкості повітряного потоку споживана потужність вентилятора збільшується. Збільшення подачі насіння призводить до навантаження на віброуючу поверхню і відповідно на її привід. А збільшення кутів нахилу призводять до швидкого розвантаження віброуючої поверхні і зниження споживаної потужності її приводу.

За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією віброуючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння $q = Q$, при цьому коефіцієнт розподілу δ повинен бути найбільшим, а потужність P , що споживається пневмовібросепаратором – найменшою, тобто:

$$\begin{cases} \delta(Q, \alpha, \beta, \psi, V) \rightarrow \max, \\ P(Q, \alpha, \beta, \psi, V) \rightarrow \min, \\ q(Q, \alpha, \beta, \psi, V) = q. \end{cases} \quad (4.44)$$

Вирішення задачі (4.44) за допомогою програмного пакету Mathematica призвели до оптимальних технологічних режимів процесу сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією віброуючої поверхні:

$$\begin{aligned} q = Q = 1029 \text{ кг/год}, \alpha = 3,8^\circ, \beta = 4,0^\circ, \psi = 5 \text{ Гц}, V = 4 \text{ м/с}, \\ \delta = 80,8 \%, P = 1,94 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (4.45)$$

4.5 Результати експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за забарвленням

4.5.1 Результати експериментальних досліджень блока подачі насіння

Дослідження процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора проводились із застосуванням методу математичного планування багатofакторного експерименту, який дозволяє визначити математичні моделі

процесів у вигляді рівнянь регресії. Згідно поставлених задач було обрано D-оптимальний план Бокса- Бенкіна другого порядку для 3 факторів. Результати досліджень представлено у таблиці Т.1.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на середній інтервал часу між падаючим насінням мала вигляд:

$$t = 0,07462 - 0,0171528 x_1 + 0,0253056 x_1^2 - 0,0436112 x_2 + \\ + 0,0084375 x_1 x_2 + 0,0121805 x_2^2 + 0,00350001 x_3 + \\ + 0,00197917 x_1 x_3 - 0,00239584 x_2 x_3 - 0,00115278 x_3^2. \quad (4.46)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена $G = 0,1354 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$.

Дисперсія адекватності математичної моделі $S_{ад}^2 = 3,76 \cdot 10^{-6}$; дисперсія похибки дослідів $S_y^2 = 1,77 \cdot 10^{-6}$; значення критерію Фішера $F = 2,12 < F_{0,05}(5, 30) = 2,53$; модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(30) = 2,04$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є всі коефіцієнти.

У розкодованому вигляді модель (4.46) має вигляд:

$$t = 0,415665 - 0,0000461111 n^2 + 7,02933 \cdot 10^{-6} Q^2 + 0,00246598 n + \\ + 6,59722 \cdot 10^{-6} Q n - 0,000191667 \psi n - 0,00203901 Q + \\ + 0,00005625 \psi Q - 0,0498236 \psi + 0,00194889 \psi^2. \quad (4.47)$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності (4.47) представлена на рисунку 4.20.

Аналізуючи рисунок 4.20, можна стверджувати наступне. При цьому зі збільшенням частоти обертання барабана середній інтервал часу збільшується, так як перед вібрототком утворюється скупчення насінин, що затримує їх подальший рух. Збільшення подачі насіння призводить до зменшення середнього інтервалу часу між падаючим насінням, що є абсолютно адекватним і логічним. Збільшення частоти коливань вібрототка зменшує середній інтервал часу між падаючим насінням. Це пояснюється тим, що насінню

надається більша кінетична енергія, яка призводить до збільшення швидкості переміщення.

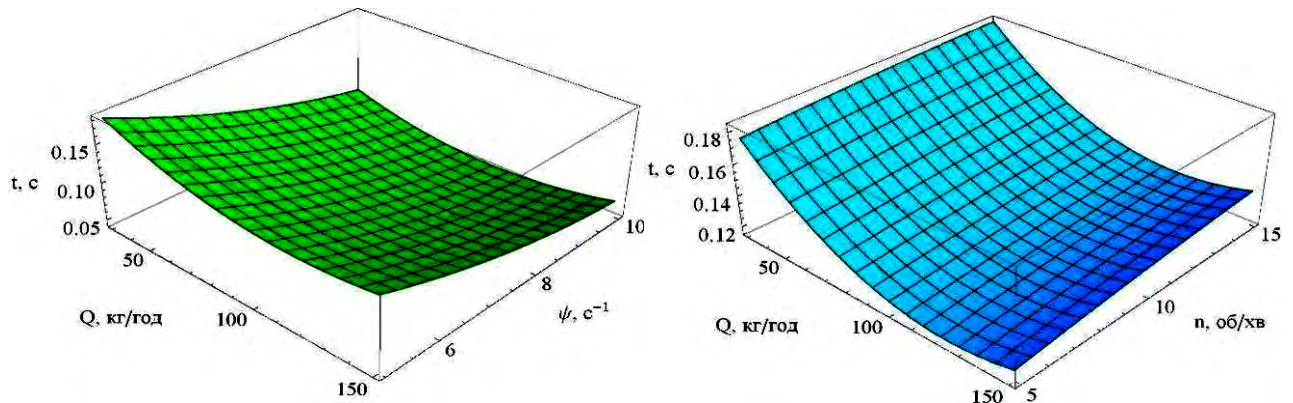


Рисунок 4.20 – Залежність середнього інтервалу часу між падаючим насінням t від подачі насіння Q , частоти коливань вібролотка ψ і частоти обертання барабана n при оптимальних значеннях $n = 15$ об/хв., $\psi = 5 \text{ с}^{-1}$

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність блока подачі насіння мала вигляд:

$$q = 75,8444 + 29,5042 x_1 - 28,7556 x_1^2 + 38,375 x_2 + 24,9917 x_1 x_2 + 15,5361 x_2^2 + 1,57083 x_3 - 2,7 x_1 x_3 + 3,09167 x_2 x_3 - 4,25556 x_3^2. \quad (4.48)$$

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена $G = 0,1296 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$.

Дисперсія адекватності математичної моделі $S_{ад}^2 = 0,2326$; дисперсія похибки дослідів $S_y^2 = 0,1170$; значення критерію Фішера $F = 1,98 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$; модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(30) = 2,04$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є всі коефіцієнти.

У розкодованому вигляді модель (4.48) має вигляд:

$$q = 97,4785 - 0,170222 n^2 - 0,00798765 Q^2 + 2,35944 n - 0,009 Q n + 0,247333 \psi n + 0,769931 Q + 0,166611 \psi Q - 39,405 \psi + 2,48578 \psi^2. \quad (4.49)$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності (4.49) представлена на рисунку 4.21.

Аналізуючи рисунок 4.21, можна стверджувати, що на продуктивність блока подачі насіння впливають всі вищезгадані фактори. При цьому зі збільшенням частоти коливань вібралотка і подачі насіння збільшується і продуктивність блока подачі. В першому випадку збільшується швидкість переміщення насіння, а в другому їх кількість. Для частоти обертання барабана $n = 10,3$ об/хв спостерігається оптимум. Це пов'язано з тим, що при нижчій частоті обертання до вібралотка надходить менша кількість насінин, а при більшій – утворюється скупчення насінин, що затримує їх подальший рух.

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на потужність, що споживається блоком подачі насіння, мала вигляд:

$$\begin{aligned}
 P = & 222,667 + 48,625 x_1 + 0,625 x_1^2 + 17,5 x_2 - 4,0 x_1 x_2 - \\
 & - 2,29167 x_2^2 + 40,2083 x_3 + 0,0833333 x_1 x_3 - \\
 & - 7,66667 x_2 x_3 + 6,79167 x_3^2.
 \end{aligned}
 \tag{4.50}$$

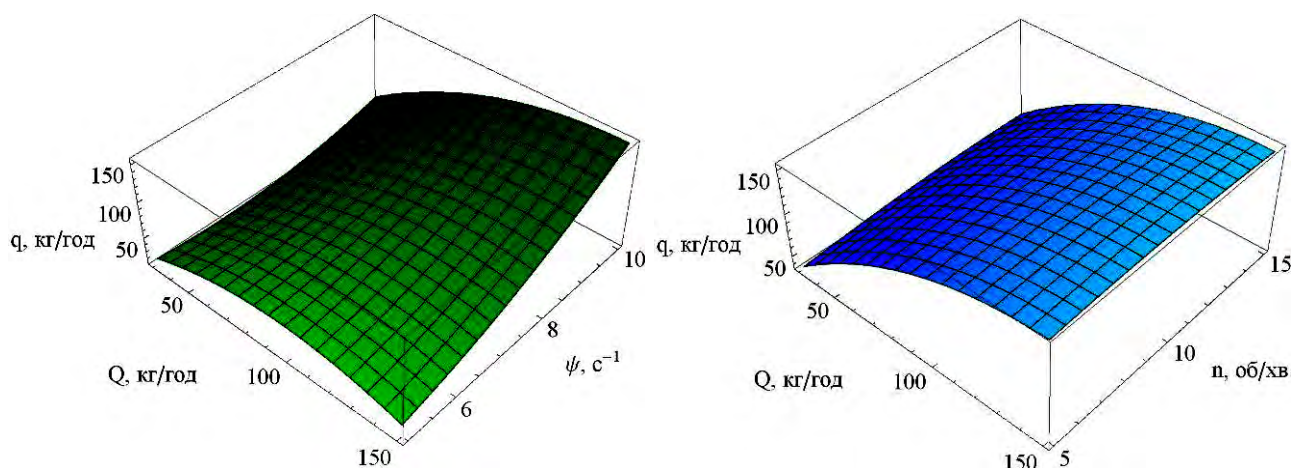


Рисунок 4.21 – Залежність продуктивності блока подачі насіння q від подачі насіння Q , частоти коливань вібралотка ψ і частоти обертання барабана n при оптимальних значеннях $n = 10,3$ об/хв., $\psi = 10$ с⁻¹

Для цього рівняння на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, значення критерію Кохрена $G = 0,1977 < G_{0,05}(2, 15) = 0,3346$.

Дисперсія адекватності математичної моделі $S_{ад}^2 = 169,24$; дисперсія похибки дослідів $S_y^2 = 80,33$; значення критерію Фішера $F = 2,11 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$; модель адекватна на 95 % рівні довірчої ймовірності.

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стьюдента $t_{0,05}(30) = 2,04$ значущими на рівні довірчої ймовірності більше 95 % є коефіцієнти при наступних змінних: $x_1, x_2, x_3, x_2x_3, x_3^2$.

У розкодзованому вигляді модель (4.50) має вигляд:

$$P = - 2,02083 + 0,271667 n^2 + 0,810417 Q + 7,20833 n - 0,613333 \psi n + 13,1333 \psi. \quad (4.51)$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності (4.51) представлена на рисунку 4.22.

Аналізуючи рисунок 4.22, можна стверджувати, що на потужність, що споживається блоком подачі насіння, впливають всі вищезгадані фактори. При цьому із їх збільшенням, збільшується і потужність. Це пояснюється тим фактом, що збільшення подачі насіння збільшує навантаження на вібралоток і барабан. А збільшення частоти обертання барабана і частоти коливань вібралотка призводить до збільшення споживаної потужності їх приводів.

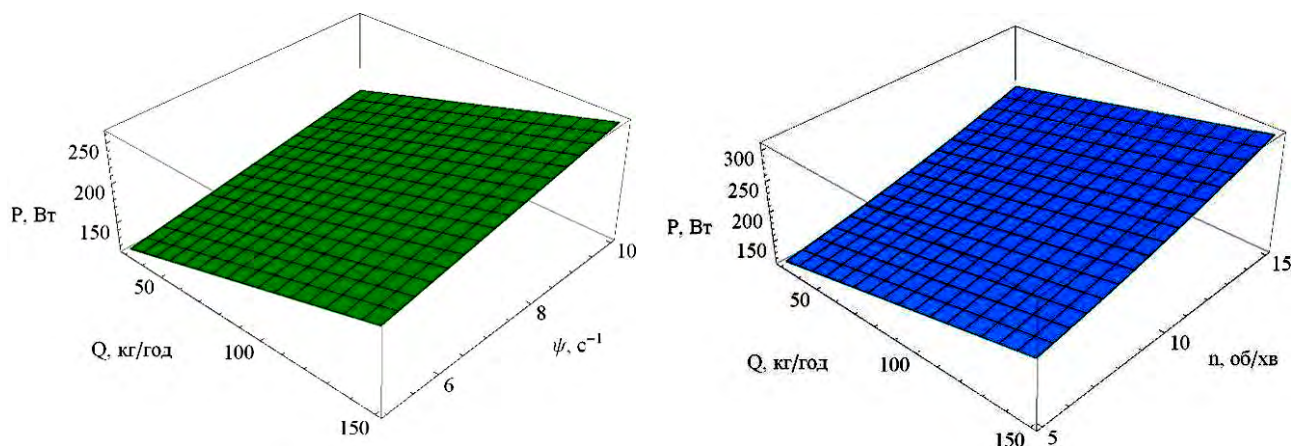


Рисунок 4.22 – Залежність потужності P , що споживається блоком подачі насіння, від подачі насіння Q , частоти коливань вібралотка ψ і частоти обертання барабана n при оптимальних значеннях $n = 5$ об/хв., $\psi = 5$ с⁻¹

Завданням вирішення компромісної задачі була максимізація середнього інтервалу часу між падаючим насінням і мінімізація потужності, що споживається блоком подачі насіння, при максимальному значенні його продуктивності, яка порівняна із значенням подачі насіння, тобто:

$$\begin{cases} t(Q, \psi, n) \rightarrow \max, \\ P(Q, \psi, n) \rightarrow \min \\ q(Q, \psi, n) = Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.52)$$

Перетворимо систему рівнянь (4.52) до вигляду:

$$\begin{cases} \frac{q(Q, \psi, n) \times t(Q, \psi, n)}{P(Q, \psi, n)} \rightarrow \max, \\ q(Q, \psi, n) = Q. \end{cases} \quad (4.53)$$

Вирішення задачі (4.53) за допомогою програмного пакету «Mathematica» призвели до оптимальних параметрів і режимів роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора:

$$\begin{cases} Q = q = 150 \text{ кг/год}, \\ \psi = 9,9 \text{ с}^{-1}, \\ n = 6,6 \text{ об/хв}, \\ t = 0,058 \text{ с}, \\ P = 269 \text{ Вт}. \end{cases} \quad (4.54)$$

Порівняння результатів теоретичних і експериментальних даних для функцій продуктивності блока подачі насіння (2.199) і (4.49) в досліджуваному діапазоні варіювання представлено на рисунку 4.23. В зв'язку з тим, що при теоретичних дослідженнях в блоці подачі насіння використовувалося 10 каналів, а при експериментальних – 20, то очевидно, що продуктивності будуть відрізнятися у 2 рази. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями факторів складає 0,92.

Порівняння результатів теоретичних і експериментальних даних для функцій середнього інтервалу часу між падаючим насінням (2.201) і (4.47) в досліджуваному діапазоні варіювання представлено на рисунку 4.24.

Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями факторів складає 0,94.

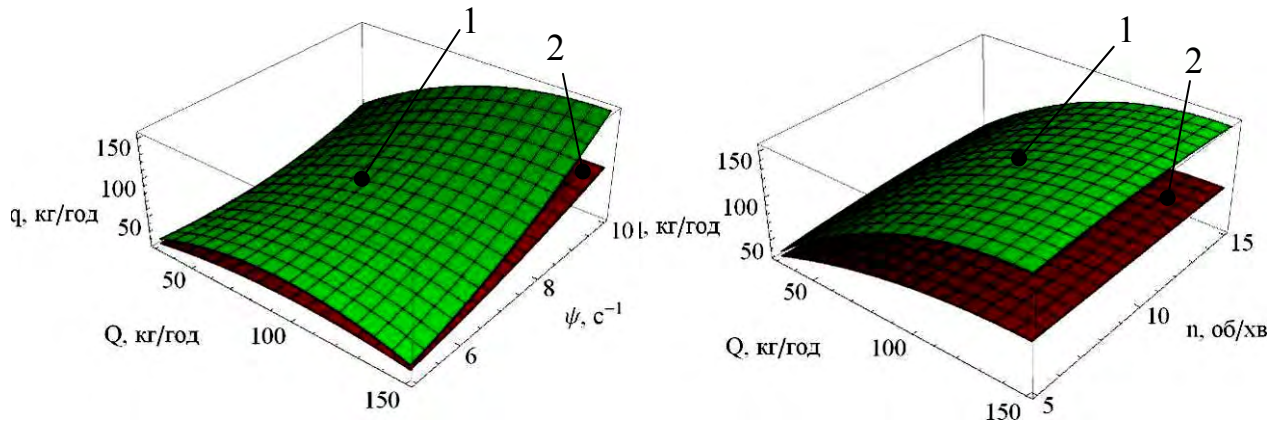


Рисунок 4.23 – Порівняння експериментальних (1) і теоретичних (2) залежностей продуктивності блока подачі насіння q при оптимальних значеннях $n = 10$ об/хв., $\psi = 10,3$ с⁻¹

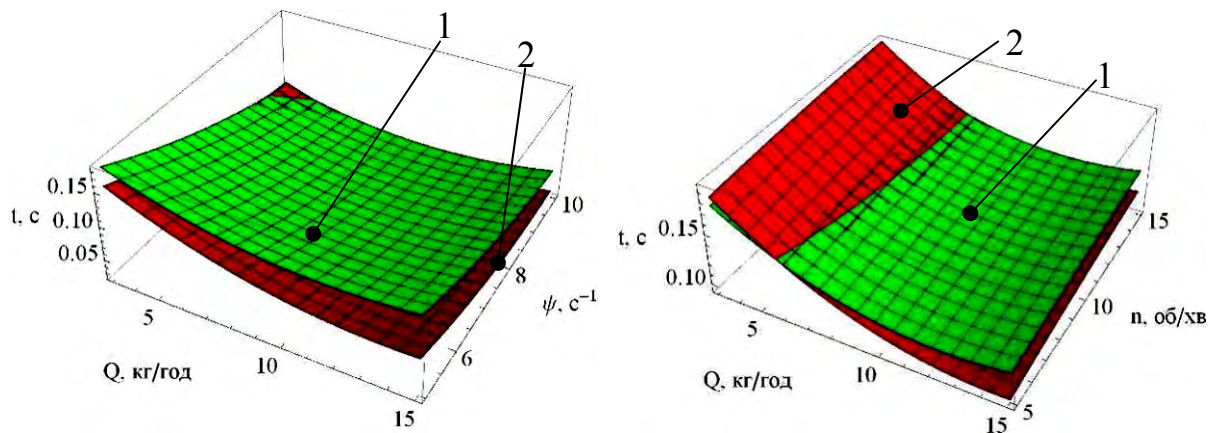


Рисунок 4.24 – Порівняння експериментальних (1) і теоретичних (2) залежностей середнього інтервалу часу між падаючим насінням t при оптимальних значеннях $n = 15$ об/хв., $\psi = 5$ с⁻¹ при оптимальних значеннях $n = 5$ об/хв., $\psi = 15$ с⁻¹

В зв'язку з тим, що при експериментальних дослідженнях оптимальні параметри визначалися на основі більш розширеної компромісної задачі (введена функція залежності потужності), то дійсними раціональними

конструктивно-технологічними параметрами блока подачі насіння приймаємо саме значення (4.54).

4.5.2 Результати експериментальних досліджень блока виходу насіння

Результати досліджень процесу роботи блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора представлено у таблиці Т.2.

Для визначення математичної моделі впливу інтервалу часу між двома падаючими насінинами t на ймовірність реагування газової форсунки P представимо експериментальні дані у вигляді графіку (рисунок 4.25).

Апроксимація отриманого масиву даних дозволила визначити пошукову математичну модель у вигляді експоненціальної функції:

$$p = 0,939841 - 1,07229 e^{-20,9153t} \quad (4.55)$$

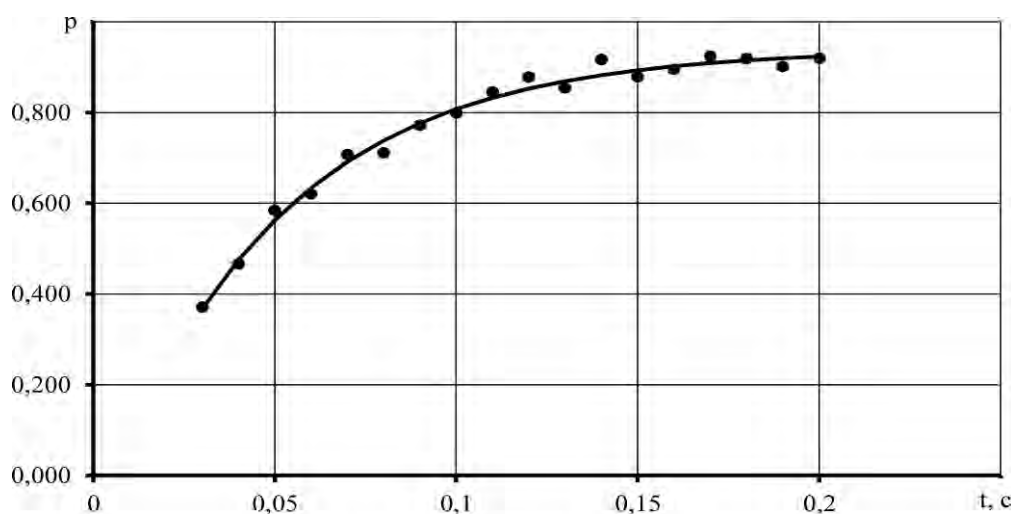


Рисунок 4.25 – Залежність ймовірності реагування газової форсунки p на інтервал часу між двома падаючими насінинами t

При цьому згідно критерію Стюдента всі коефіцієнти є значимими, а коефіцієнт кореляції складає $R = 0,995$.

Залежність на рисунку 4.25 доводить те, що із збільшенням інтервал часу між двома падаючими насінинами, ймовірність реагування газової форсунки збільшується до асимптотичної лінії $p = 0,939841$.

4.5.3 Результати експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора насіння

В результаті розділення насінневого матеріалу соняшнику на фотоелектронному сепараторі отримано фракції, які можна розділити на 2 групи: із чорним забарвленням та наявним білим кольором (рисунок 4.26).

Результати експериментальних досліджень були узагальнені в таблицях Т.3 і Т.7.



насіння із чорним забарвленням

насіння із наявним білим кольором

Рисунок 4.26 – Фракції насінневого матеріалу соняшнику

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на сумарну концентрацію насіння мала вигляд:

$$\begin{aligned}
 \theta = & 13,9 - 9,01875 x_1 + 9,22708 x_1^2 - 9,85625 x_2 + 15,175 x_1 x_2 + \\
 & + 22,9771 x_2^2 + 0,1 x_3 + 0,05 x_1 x_3 - 3,1 x_2 x_3 + 5,26875 x_3^2 - 3,2625 x_4 + \\
 & + 15,15 x_1 x_4 + 38,6 x_2 x_4 - 3,1 x_3 x_4 + 37,4687 x_4^2 - 8,85 x_5 + \\
 & + 7,10543 \cdot 10^{-15} x_1 x_5 + 8,32667 \cdot 10^{-15} x_2 x_5 - 1,06581 \cdot 10^{-14} x_3 x_5 +
 \end{aligned} \tag{4.56}$$

$$+ 2,4869 \cdot 10^{-14} x_4 x_5 + 13,9021 x_5^2.$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (4.56) зведена в таблиці Т.4.

Аналіз таблиці Т.4 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (4.56) і представити його у вигляді:

$$\begin{aligned} \theta = & 13,9 - 9,01875 x_1 + 9,22708 x_1^2 - 9,85625 x_2 + 15,175 x_1 x_2 + \\ & + 22,9771 x_2^2 + 0,1 x_3 - 3,1 x_2 x_3 + 5,26875 x_3^2 - 3,2625 x_4 + \\ & + 15,15 x_1 x_4 + 38,6 x_2 x_4 - 3,1 x_3 x_4 + 37,4687 x_4^2 - 8,85 x_5 + 13,9021 x_5^2. \end{aligned} \quad (4.57)$$

Після перетворення рівняння (4.57) у розкодований вигляд остаточно маємо

$$\begin{aligned} \theta = & 803,784 - 1,50833 n + 0,21075 n^2 - 1,70708 Q + 0,00256308 Q^2 - \\ & - 3,92507 \Delta t - 0,0103333 n \Delta t + 0,00420833 Q \Delta t - 0,010408 \Delta t^2 - \\ & - 5,30823 \lambda + 0,0347552 \lambda^2 - 86,2992 \psi - 0,248 n \psi + \\ & + 0,101167 Q \psi + 0,257333 \Delta t \psi + 3,67633 \psi^2. \end{aligned} \quad (4.58)$$

З використанням програмного пакету Mathematica визначено раціональні значення факторів досліджень з умови забезпечення мінімальної сумарної концентрації насіння:

$$\begin{aligned} \theta (Q = 117 \text{ кг/год}, \psi = 7,9 \text{ с}^{-1}, n = 10,0 \text{ об/хв}, \\ \Delta t = 71 \text{ мс}, \lambda = 76,3 \%) = 9,76 \% \end{aligned} \quad (4.59)$$

Приймаючи отримані раціональні значення факторів досліджень (4.59) побудовані двомірні поверхні (рисунок 4.27)

Аналізуючи рисунок 4.27, можна стверджувати, що на сумарну концентрацію насіння θ впливають всі вищезгадані фактори, які мають оптимум у найменшій точці у заданому інтервалі. Наявність оптимуму пояснюється тим, що найліпша якість процесу сепарації досягається за певних співвідношень значень подачі насіння, частоти коливаний вібротка і частоти обертання барабана. Також прецизійне налаштування часової затримки спрацьовування форсунки Δt і чутливості фотодатчика λ дають найвищу якість процесу сепарації.

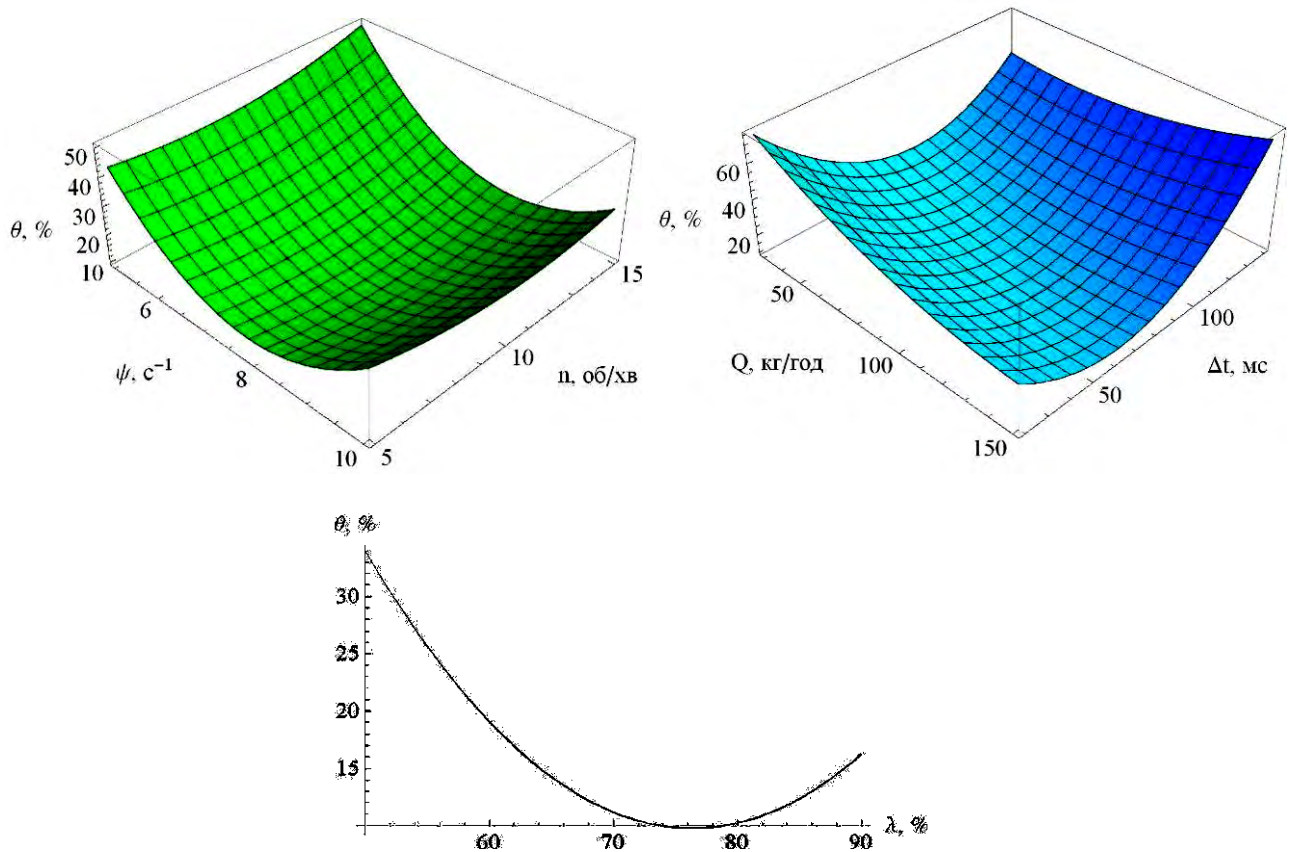


Рисунок 4.27 – Залежність сумарної концентрації насіння θ від факторів досліджень при відповідних оптимальних значеннях (4.59)

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на продуктивність фотоелектронного сепаратора мала вигляд:

$$\begin{aligned}
 q = & 73,6667 + 27,0625 x_1 - 25,7708 x_1^2 + 35,125 x_2 + 21,75 x_1 x_2 + \\
 & + 13,9792 x_2^2 + 1,875 x_3 - 0,75 x_1 x_3 + 4 x_2 x_3 - 4,1875 x_3^2 - \\
 & - 0,1875 x_4 - 1 x_1 x_4 - 0,25 x_2 x_4 + 2 x_3 x_4 - 0,9375 x_4^2 + 0,375 x_5 + \\
 & + 0,75 x_1 x_5 + 1,5 x_2 x_5 - 1,25 x_3 x_5 - 2 x_4 x_5 + 0,8125 x_5^2.
 \end{aligned} \tag{4.60}$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (4.60) зведена в таблицю Т.5.

Аналіз таблиці Т.5 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (4.60) і представити його у вигляді:

$$\begin{aligned}
 q = & 73,6667 + 27,0625 x_1 - 25,7708 x_1^2 + 35,125 x_2 + 21,75 x_1 x_2 + \\
 & + 13,9792 x_2^2 + 1,875 x_3 + 4 x_2 x_3 - 4,1875 x_3^2 - 0,1875 x_4 +
 \end{aligned} \tag{4.61}$$

$$+2 x_3 x_4 + 1,5 x_2 x_5 - 1,25 x_3 x_5 - 2 x_4 x_5.$$

Після перетворення рівняння (4.61) у розкодований вигляд остаточно маємо

$$\begin{aligned} q = & 99,3576 + 1,67222 n - 0,167778 n^2 + 0,652431 Q - \\ & - 0,00716049 Q^2 + 0,046875 \Delta t + 0,00666667 n \Delta t + 0,0458333 \lambda - \\ & - 0,0125 n \lambda - 0,00166667 \Delta t \lambda - 37,775 \psi + 0,32 n \psi + \\ & + 0,145 Q \psi + 0,0283333 \lambda \psi + 2,24 \psi^2. \end{aligned} \quad (4.62)$$

З використанням програмного пакету Mathematica визначено раціональні значення факторів досліджень з умови забезпечення максимальної продуктивності фотоелектронного сепаратора:

$$\begin{aligned} q (Q = 146 \text{ кг/год}, \psi = 10,0 \text{ с}^{-1}, n = 11,6 \text{ об/хв}, \\ \Delta t = 20 \text{ мс}, \lambda = 90,0 \%) = 149 \text{ кг/год} \end{aligned} \quad (4.63)$$

Приймаючи отримані раціональні значення факторів досліджень (4.63) побудовані двомірні поверхні (рисунок 4.28)

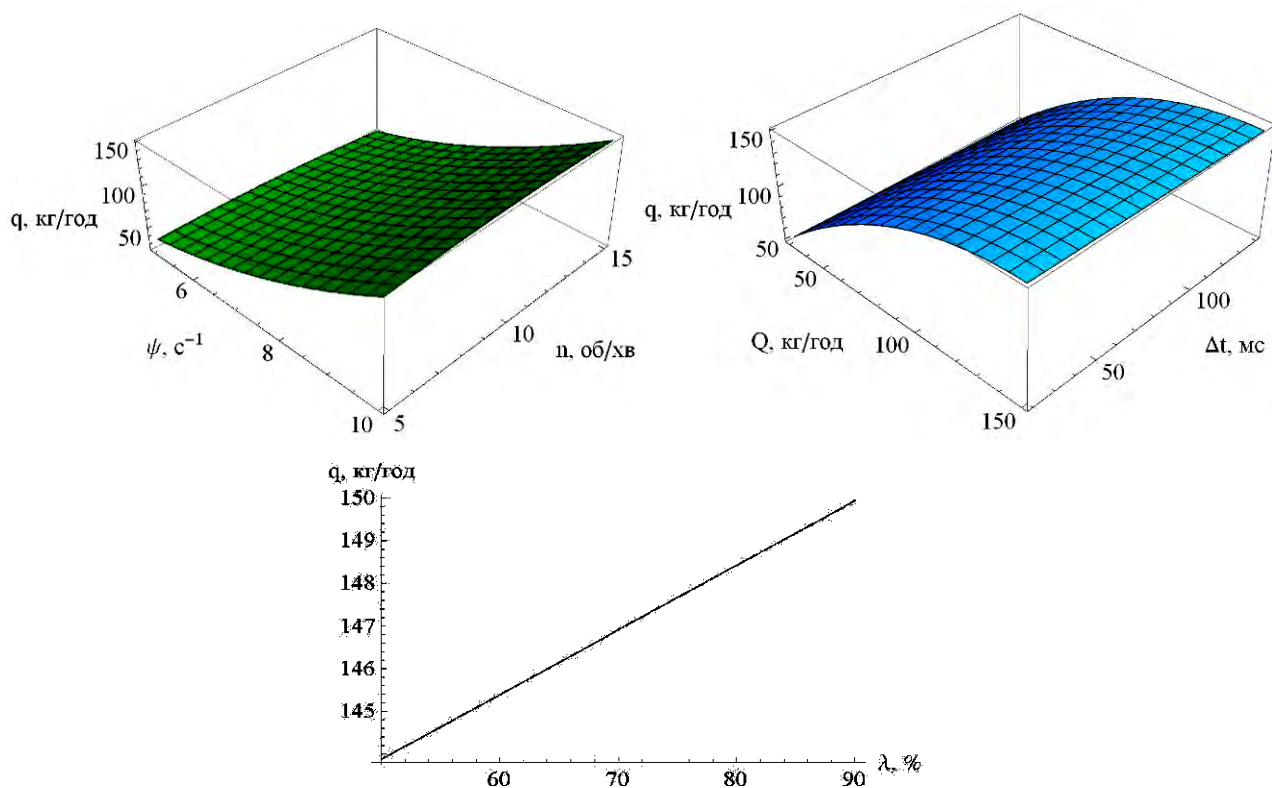


Рисунок 4.28 – Залежність продуктивності фотоелектронного сепаратора q від факторів досліджень при відповідних оптимальних значеннях (4.63)

Аналізуючи рисунок 4.28, можна стверджувати, що на продуктивність фотоелектронного сепаратора впливають всі вищезгадані фактори. При цьому зі збільшенням частоти коливань вібрототка, подачі насіння і чутливості фотодатчика λ збільшується і продуктивність фотоелектронного сепаратора. Це абсолютно адекватно і логічно описує процес сепарації. А для частоти обертання барабана $n = 11,6$ об/хв спостерігається оптимум, наявність якого пов'язано з тим, що при нижчій частоті обертання до вібрототка надходить менша кількість насінин, а при більшій – утворюється скупчення насінин, що затримує їх подальший рух. Часова затримка спрацьовування форсунки Δt практично не впливає на продуктивність фотоелектронного сепаратора q , так як вона визначається за сумарною продуктивністю ліквідної і не ліквідної фракцій.

Математична модель впливу досліджуваних факторів на потужність, що споживається фотоелектронним сепаратором мала вигляд:

$$\begin{aligned}
 P = & 227,667 + 48,9375 x_1 + 1,08333 x_1^2 + 18 x_2 - 5 x_1 x_2 - 2,33333 x_2^2 + \\
 & + 40,875 x_3 + 1,75 x_1 x_3 - 6,5 x_2 x_3 + 6,5 x_3^2 - 0,1875 x_4 - 1 x_1 x_4 - \\
 & - 0,5 x_2 x_4 + 2,25 x_3 x_4 - 0,916667 x_4^2 + 0,375 x_5 + 1 x_1 x_5 + 1,5 x_2 x_5 - \\
 & - 1,5 x_3 x_5 - 2 x_4 x_5 + x_5^2.
 \end{aligned} \tag{4.64}$$

Проведена статистична обробка отриманого рівняння (4.64) зведена в таблицю Т.6.

Аналіз таблиці Т.6 дозволяє скоротити незначущі коефіцієнти в рівнянні (4.64) і представити його у вигляді:

$$\begin{aligned}
 P = & 227,667 + 48,9375 x_1 + 18 x_2 - 5 x_1 x_2 + 40,875 x_3 - \\
 & - 6,5 x_2 x_3 + 6,5 x_3^2.
 \end{aligned} \tag{4.65}$$

Після перетворення рівняння (4.65) у розкодований вигляд остаточно маємо

$$\begin{aligned}
 P = & - 16,9896 + 6,875 n + 0,26 n^2 + 1,06563 Q + 15,4 \psi - \\
 & - 0,52 n \psi - 0,0333333 Q \psi.
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

З використанням програмного пакету Mathematica визначено раціональні значення факторів досліджень з умови забезпечення мінімальної потужності, що споживається фотоелектронним сепаратором:

$$P(Q = 30 \text{ кг/год}, \psi = 5 \text{ с}^{-1}, n = 5 \text{ об/хв}) = 114 \text{ Вт} \quad (4.67)$$

Приймаючи отримані раціональні значення факторів досліджень (4.67) побудовані двомірні поверхні (рисунок 4.29)

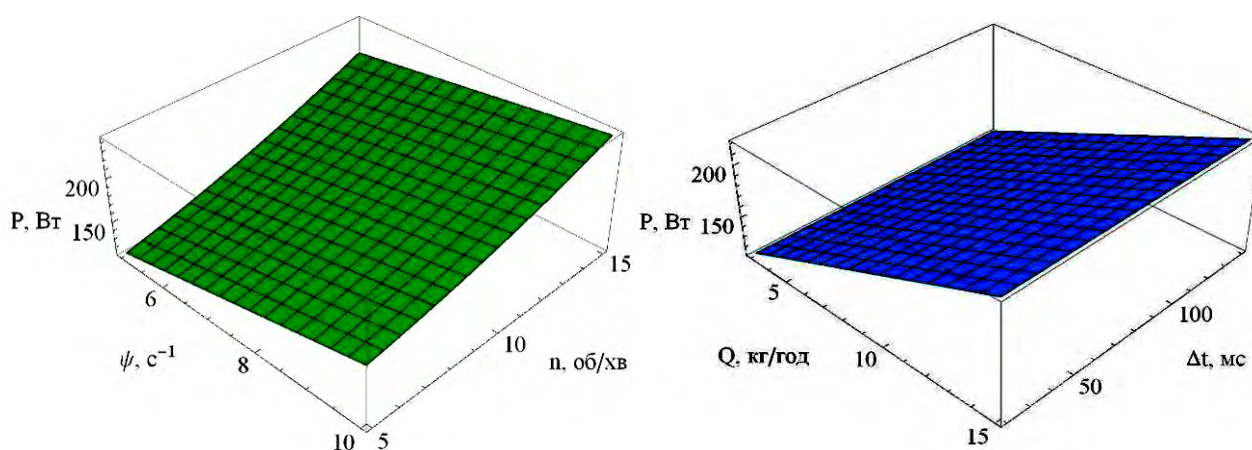


Рисунок 4.29 – Залежність потужності P , що споживається фотоелектронним сепаратором від факторів досліджень при відповідних оптимальних значеннях (4.67)

Аналізуючи рисунок 4.29, можна стверджувати, що на потужність, що фотоелектронним сепаратором впливає тільки подача насіння Q , частота коливань вібралотка ψ і частота обертання барабана n . При цьому із їх збільшенням, збільшується і потужність. Це пояснюється тим фактом, що збільшення подачі насіння збільшує навантаження на вібралоток і барабан. А збільшення частоти обертання барабана і частоти коливань вібралотка призводить до збільшення споживаної потужності їх приводів.

Завданням вирішення компромісної задачі була мінімізація сумарної концентрації насіння і потужності, що споживається фотоелектронним сепаратором, при максимальному значенні його продуктивності, яка порівняна із значенням подачі насіння, тобто:

$$\begin{cases} \theta(Q, \psi, n, \Delta t, \lambda) \rightarrow \min, \\ P(Q, \psi, n, \Delta t, \lambda) \rightarrow \min \\ q(Q, \psi, n, \Delta t, \lambda) = Q \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.68)$$

Вирішення задачі (4.68) за допомогою програмного пакету «Mathematica» призвели до раціональних параметрів і режимів роботи фотоелектронного сепаратора:

$$\begin{aligned} Q = q = 97 \text{ кг/год}; \psi = 8,6 \text{ с}^{-1}; n = 9,7 \text{ об/хв}; \Delta t = 66 \text{ мс}; \\ \lambda = 76,4 \%; P = 239 \text{ Вт}; \theta = 11,0 \%. \end{aligned} \quad (4.69)$$

4.6 Результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння

В результаті досліджень встановлені значення геометричних розмірів насіння соняшнику (довжини L і ширини B), які визначені з використанням експериментального пристрою для автоматичного фенотипування насіння і мікрометра. Графічна інтерпретація представлена на рисунку 4.30.

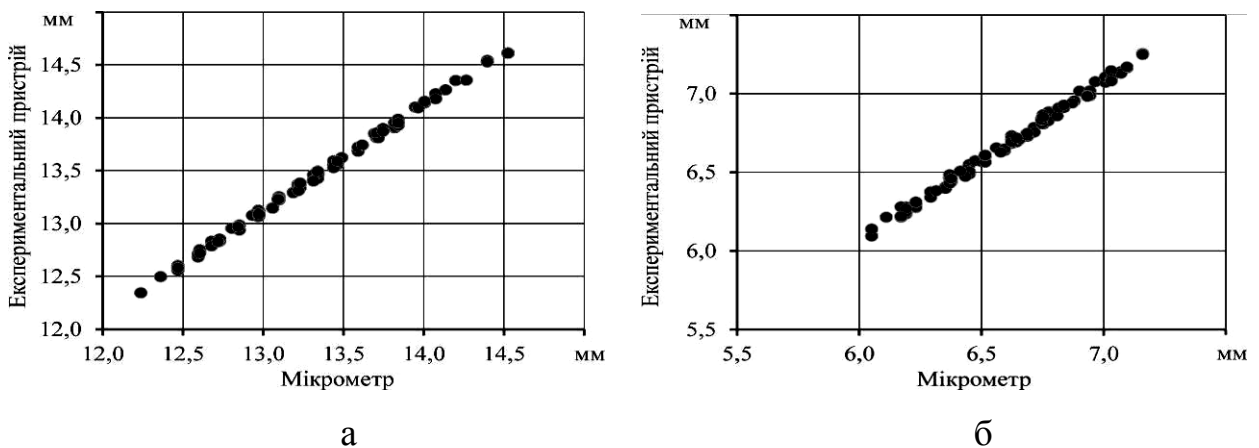


Рисунок 4.30 – Порівняння значень геометричних розмірів насіння соняшнику (довжини L – а і ширини B – б), які визначені з використанням експериментального пристрою для автоматичного фенотипування насіння і мікрометра

При цьому середня похибка вимірювань складає 0,06 мм. За розрахованим критерієм Пірсона (χ^2) нормальність розподілу похибок

вимірювань складає 2,21, більше за табличне значення $\chi^2(0,95;5) = 1,15$. Поведена перевірка гіпотези про однорідність значень за допомогою критерію Кохрена $G = 0,14 < G_{0,05}(1;100) = 0,33$. Розрахунок коефіцієнтів калібрувальної характеристики вимірювання геометричних розмірів з використанням експериментального пристрою для автоматичного фенотипування в припущенні, що ця залежність є лінійною було перевірено з використанням критерію Фішера $F = 1,15 < F_{0,05}(91, 100) = 1,39$.

Гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB при різному освітленні представлені в додатку У та рисунках 4.31–4.33.

В результаті аналізу отриманих гістограм розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB встановлено, що у випадку однорідності кольору найбільш виразно видно дискретність каналів при червоному освітленні. При цьому гістограма має по одному максимуму для кожного каналу, який зміщується в залежності від забарвлення насіння. Так для чорного забарвлення $R = 182-189$, $G = 194-202$, $B = 211-218$, а для білого $R = 112-118$, $G = 124-129$, $B = 133-139$. Узагальнення отриманих результатів приведено в таблиці Ф.1.

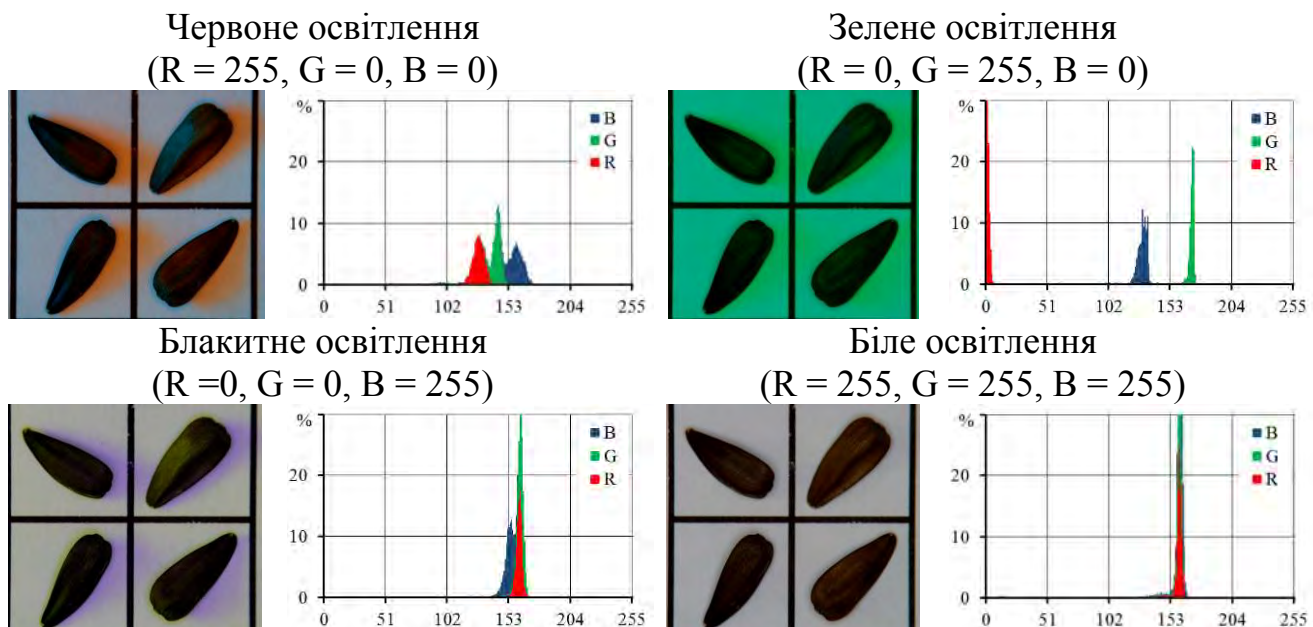


Рисунок 4.31 – Гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику сортозразка RHA273 в колірному просторі RGB

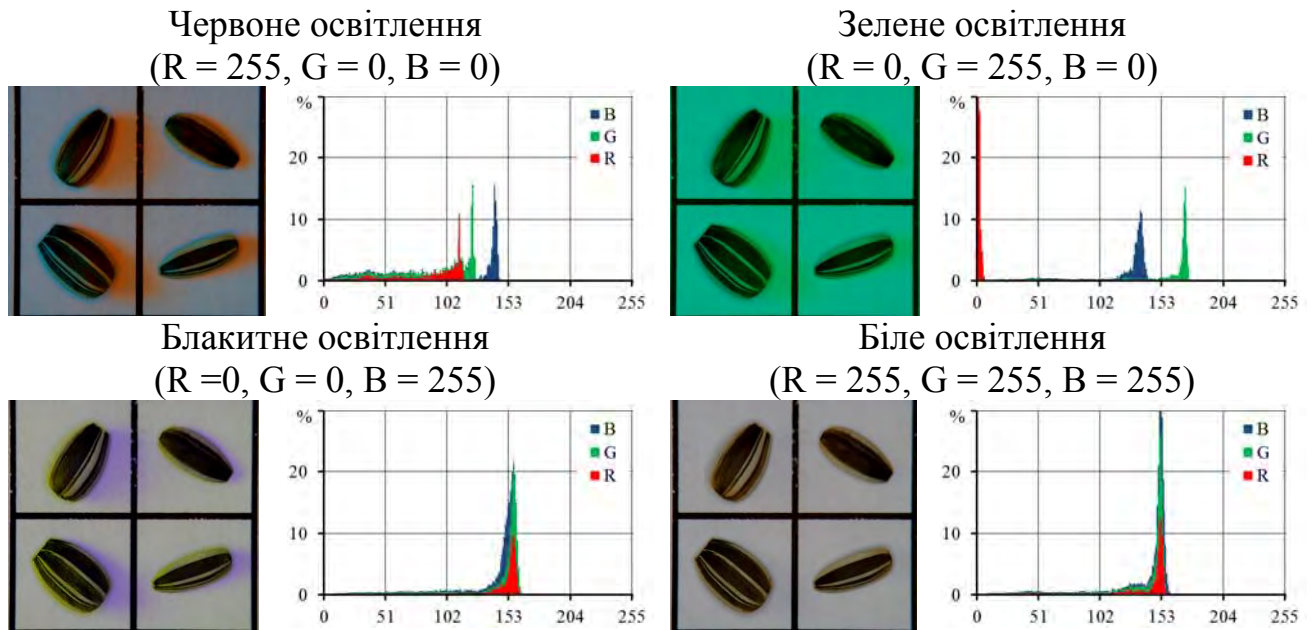


Рисунок 4.32 – Гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику сортозразка I2K20031 в колірному просторі RGB

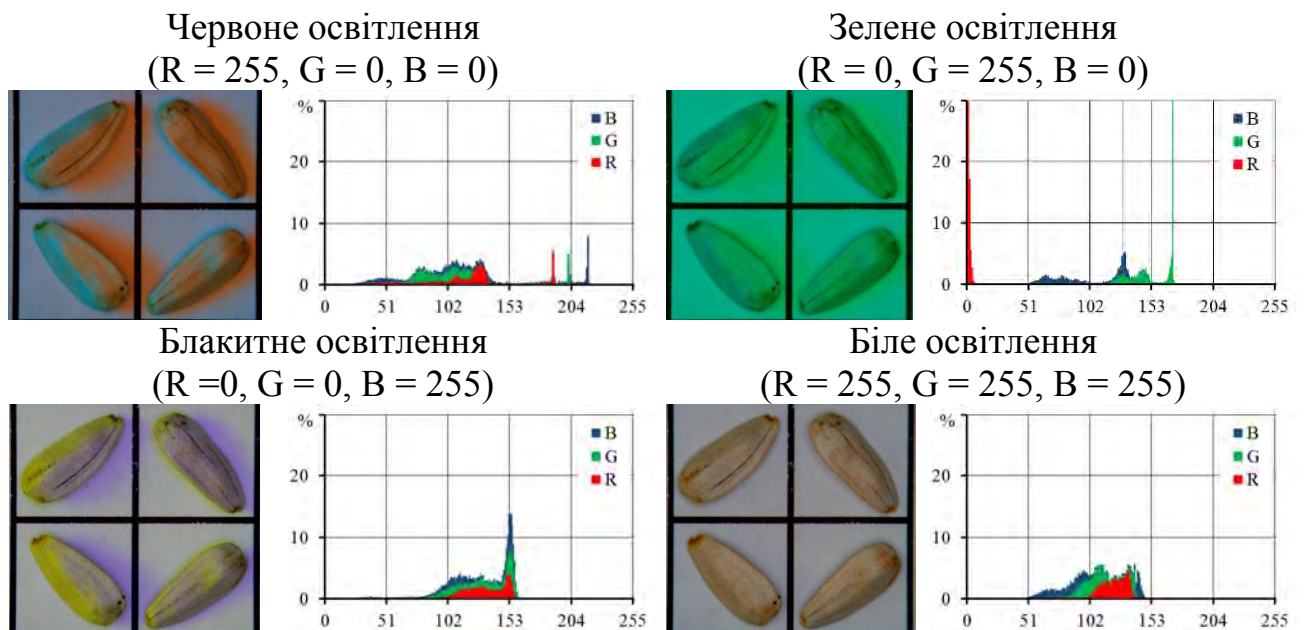


Рисунок 4.33 – Гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику сортозразка In18917 в колірному просторі RGB

Також виявлено, що у випадку двокольорового забарвлення насіння соняшнику на гістограмах додатку У та рисунках 4.31–4.33 спостерігається два максимуми, кожен з яких відповідає одному з кольорів. Частоти цих максимумів відповідають інтенсивності кожного з кольорів. Враховуючи вищесказане можна

визначити показник забарвлення насіння C , як матрицю частот f відповідних максимумів (\max) в колірному просторі RGB при червоному освітлені насіння:

$$C = \begin{pmatrix} R_{1\max} & f_{R1\max} & R_{2\max} & f_{R2\max} \\ G_{1\max} & f_{G1\max} & G_{2\max} & f_{G2\max} \\ B_{1\max} & f_{B1\max} & B_{2\max} & f_{B2\max} \end{pmatrix}. \quad (4.70)$$

Гістограма значень максимумів каналів в колірному просторі RGB при червоному освітлені сортозразків соняшнику представлено на рисунку 4.34.

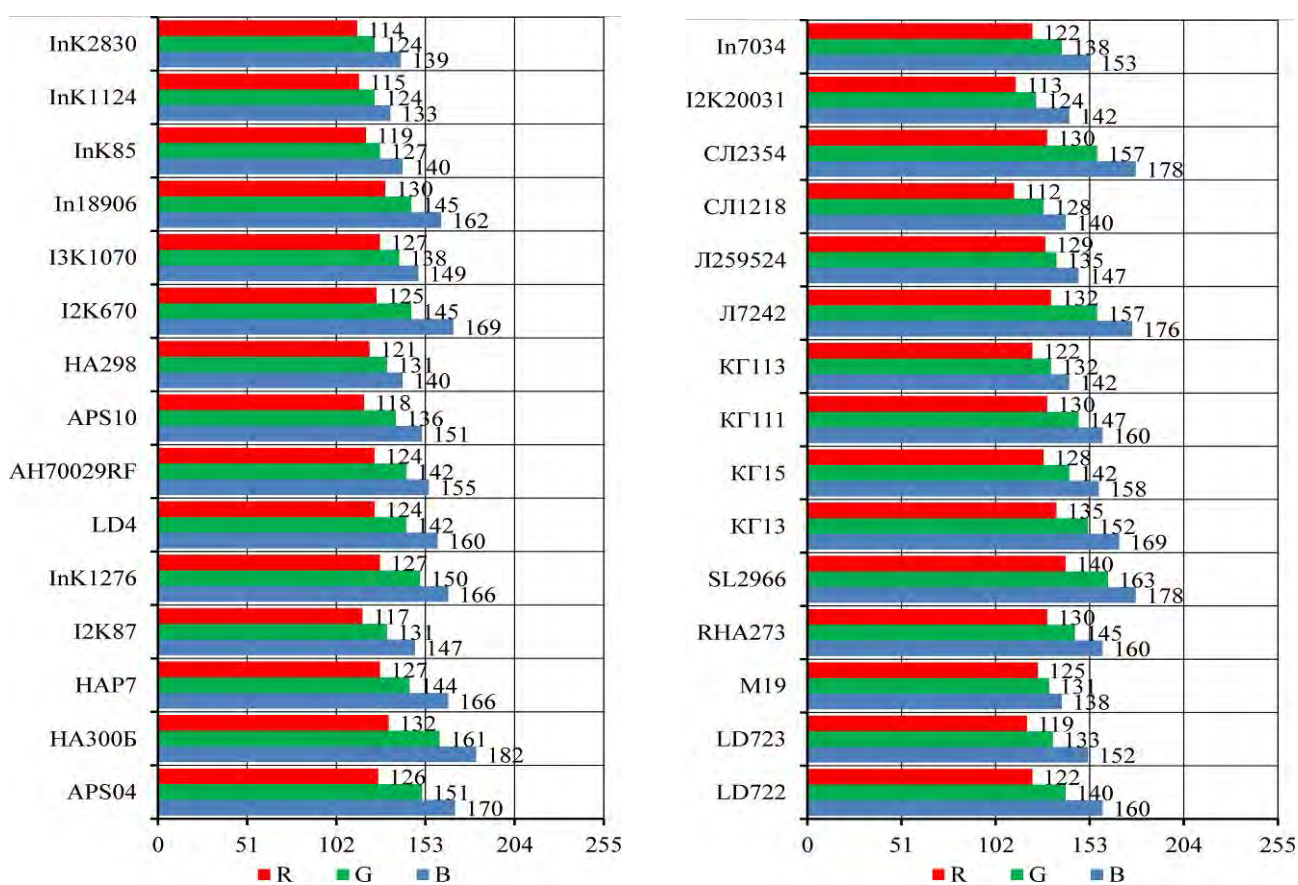


Рисунок 4.34 – Гістограма значень максимумів каналів в колірному просторі RGB при червоному освітлені сортозразків соняшнику

4.7 Висновки з розділу

1. В результаті досліджень отримані залежності впливу вологості W_b насіння соняшнику сортозразків Інституту олійних культур НААН на ефективний діаметр D_p , масу 1000 насінин M_{1000} , об'ємної маси ρ , кут природного ухилу ϕ , коефіцієнт тертя f . В результаті досліджень аеродинаміки

насіння соняшнику в повітряному потоці для різних фракцій попередньо розділеного за розмірами матеріалу отримані залежності швидкостей витання V_a від геометричних параметрів насіння.

2. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) перевірено адекватність теоретичних залежностей зміни об'ємних мас важких ρ_n (2.41) і легких ρ_l (2.42) компонентів за критерієм Фішера, який складає $F = 2,21 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$ для рівняння (2.41) і $F = 2,16 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$ для рівняння (2.42) і коефіцієнтом кореляції, який становить $R = 0,953$ для рівняння (2.41) і $R = 0,948$ для рівняння (2.42).

3. В результаті експериментальних досліджень механіко-технологічного процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала коефіцієнт розподілу δ (залежність (4.19)) і споживану потужність P (залежність (4.21)) від подачі насіння Q і швидкості повітря V . Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (2.77) і експериментальною (4.19) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,86. В процесі досліджень була вирішена компромісна задача, а саме мінімізація потужності P , що споживається експериментальною установкою, при максимальному значенні коефіцієнта розподілу δ і подачі насіння Q : $Q = 1,49$ кг/с, $V = 5,49$ м/с, $\delta = 66,9$ %, $P = 0,72$ кВт.

4. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами під дією вібруючих решіт різних видів (пробивні, пруткові, точні) отримані залежності зміни сумарної концентрації θ (4.28)-(4.30), продуктивності q (4.25)-(4.27) і потужності P (4.31)-(4.33), що споживається калібрувальною машиною, від подачі насіння Q , кута нахилу α і частоти коливань ψ решета. За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією вібруючого

решета необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння Q (пробивні – 1116 кг/год, пруткові – 1518 кг/год, точні – 1781 кг/год), при цьому сумарна концентрація насіння θ (пробивні – 14,54 %, пруткові – 12,45 %, точні – 10,41 %) і потужність P (пробивні – 0,24 кВт, пруткові – 0,30 кВт, точні – 0,35 кВт), що споживається калібрувальною машиною, повинні бути мінімальними, а $\alpha = 4,5\text{--}6,2^\circ$, $\psi = 5,5\text{--}5,9\text{ с}^{-1}$. Точні решета (виготовлені шляхом лазерної різки) мають найліпші показники за продуктивністю ($q = 1781$ кг/год) і якістю ($\theta = 10,41$ %). При цьому частота їх коливань повинна складати $\psi = 5,9$ Гц, а кут їх нахилу $\alpha = 5^\circ$. Порівнюючи отримані експериментальні моделі (4.28)–(4.30) із моделлю чисельного моделювання (2.129) можна стверджувати їх взаємну кореляцію, що підтверджується відповідними коефіцієнтами кореляції $R(4.28) = 0,79$, $R(4.29) = 0,78$, $R(4.30) = 0,81$.

5. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою під дією віброуючої поверхні отримані залежності зміни коефіцієнта розподілу δ (4.36), продуктивності q (4.39) і потужності P (4.41), що споживається пневмовібросепаратором, від подачі насіння Q , швидкості повітряного потоку V , частоти коливань деки ψ , кутів нахилу деки α і β . За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією віброуючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність q була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння $q = Q = 1029$ кг/год, при цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 80,8$ % повинен бути найбільшим, а потужність $P = 1,94$ кВт, що споживається пневмовібросепаратором – найменшою. Відповідно до вищезазначеного $\alpha = 3,8^\circ$, $\beta = 4,0^\circ$, $\psi = 5$ Гц, $V = 4$ м/с. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (2.176) і експериментальною (4.36) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,92.

6. В результаті експериментальних досліджень блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора q (4.49), його споживаєму потужність P (4.51) і середній інтервал часу між падаючим насінням t (4.47) від подачі насіння Q , частоти коливань вібрототка ψ і частоти обертання барабана n . В процесі досліджень була вирішена компромісна задача, а саме максимізація середнього інтервалу часу між падаючим насінням t і мінімізація потужності P , що споживається блоком подачі насіння, при максимальному значенні його продуктивності q , яка порівняна із значенням подачі насіння Q . В зв'язку з тим, що при експериментальних дослідженнях оптимальні параметри визначалися на основі більш розширеної компромісної задачі (введена функція залежності потужності), то дійсними раціональними конструктивно-технологічними параметрами блока подачі насіння є: $Q = q = 150$ кг/год, $\psi = 9,9$ с⁻¹, $n = 6,6$ об/хв, $t = 0,058$ с.

7. В результаті експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора встановлено експоненціальну залежність зміни ймовірність реагування газової форсунки p (4.55) від інтервал часу між двома падаючими насінинами t .

8. В результаті експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала сумарну концентрація насіння θ (залежність (4.58)), продуктивність фотоелектронного сепаратора q (залежність (4.62)) і його споживаєму потужність P (залежність (4.64)) від подачі насіння Q , частоти коливань вібрототка ψ , частоти обертання барабана n , часової затримки спрацьовування форсунки Δt , чутливість фотодатчика λ . В процесі досліджень була вирішена компромісна задача, а саме мінімізація сумарної концентрації насіння θ і потужності P , що споживається фотоелектронним сепаратором, при максимальному значенні його продуктивності q , яка порівняна із значенням подачі насіння Q . В результаті

дійсними раціональними конструктивно-технологічними параметрами фотоелектронного сепаратора ϵ : $Q = q = 97$ кг/год; $\psi = 8,6$ с⁻¹; $n = 9,7$ об/хв; $\Delta t = 66$ мс; $\lambda = 76,4$ %; $P = 239$ Вт; $\theta = 11,0$ %.

9. Результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння різних сортозразків соняшнику дали змогу встановити середню похибку визначення геометричних розмірів насіння соняшнику (довжини L і ширини B) – 0,06 мм. Розрахунок коефіцієнтів калібрувальної характеристики вимірювання геометричних розмірів з використанням експериментального пристрою для автоматичного фенотипування в припущенні, що ця залежність є лінійною було перевірено з використанням критерію Фішера $F = 1,15 < F_{0,05}(91, 100) = 1,39$.

10. Встановлені гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB при різному освітлені. В результаті аналізу отриманих гістограм розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB встановлено, що у випадку однорідності кольору найбільш виразно видно дискретність каналів при червоному освітлені. При цьому гістограма має по одному максимуму для кожного каналу, який зміщується в залежності від забарвлення насіння. Так для чорного забарвлення $R = 182-189$, $G = 194-202$, $B = 211-218$, а для білого $R = 112-118$, $G = 124-129$, $B = 133-139$. Також виявлено, що у випадку двокольорового забарвлення насіння соняшнику на гістограмах спостерігається два максимуми, кожен з яких відповідає одному з кольорів. Частоти цих максимумів відповідають інтенсивності кожного з кольорів. Враховуючи вищесказане можна визначити показник забарвлення насіння S , як матрицю частот f відповідних максимумів (\max) в колірному просторі RGB при червоному освітлені насіння (4.70).

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [388, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432].

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Адаптивний аеродинамічний сепаратор насіння соняшнику

5.1.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Адаптивний аеродинамічний сепаратор (рисунок 5.1) містить раму 1, на якій встановлено бункер 2 із заслінкою 3. До заслінки 3 приєднано вал крокового електродвигуна 4. На рамі 1 під бункером 2 розміщена сепараційна камера 5. На вході сепараційної камери 5 вертикально розташовано каскад заслінок 6, до яких приєднані вали крокових електродвигунів 7. Вхід сепараційної камери 5 приєднано до виходу відцентрового вентилятора 8, який приводиться в дію асинхронним електродвигуном 9. В середині сепараційної камери 5 вертикально розміщено датчики швидкості повітряного потоку 10, кількість яких співпадає з кількістю заслінок 6. Під сепараційною камерою 5 розташовані збірники фракцій 11 (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII). Навпроти каскаду заслінок 6 в верхній частині сепараційної камери 5 розміщено вікно збірника пилу 12 (IX). Фронтальна стінка сепараційної камери 5 виконана з прозорого матеріалу (на схемі не відмічено), наприклад поліметилметакрилату. На рамі 1 перед фронтальною стінкою сепараційної камери 5 встановлено фотокамеру 13. Крокові електродвигуни 4 і 7 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока керування заслінками 14. Асинхронний електродвигун 9 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднаний до частотного перетворювача 15. Датчики швидкості повітряного потоку 10 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока обробки даних 16. Фотокамера 13, блок керування заслінками 14, частотний перетворювач 15, блок обробки даних 16 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені напівжирною лінією)

приєднані до персонального комп'ютера 17, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення, алгоритм якого представлено на рисунку 5.2.

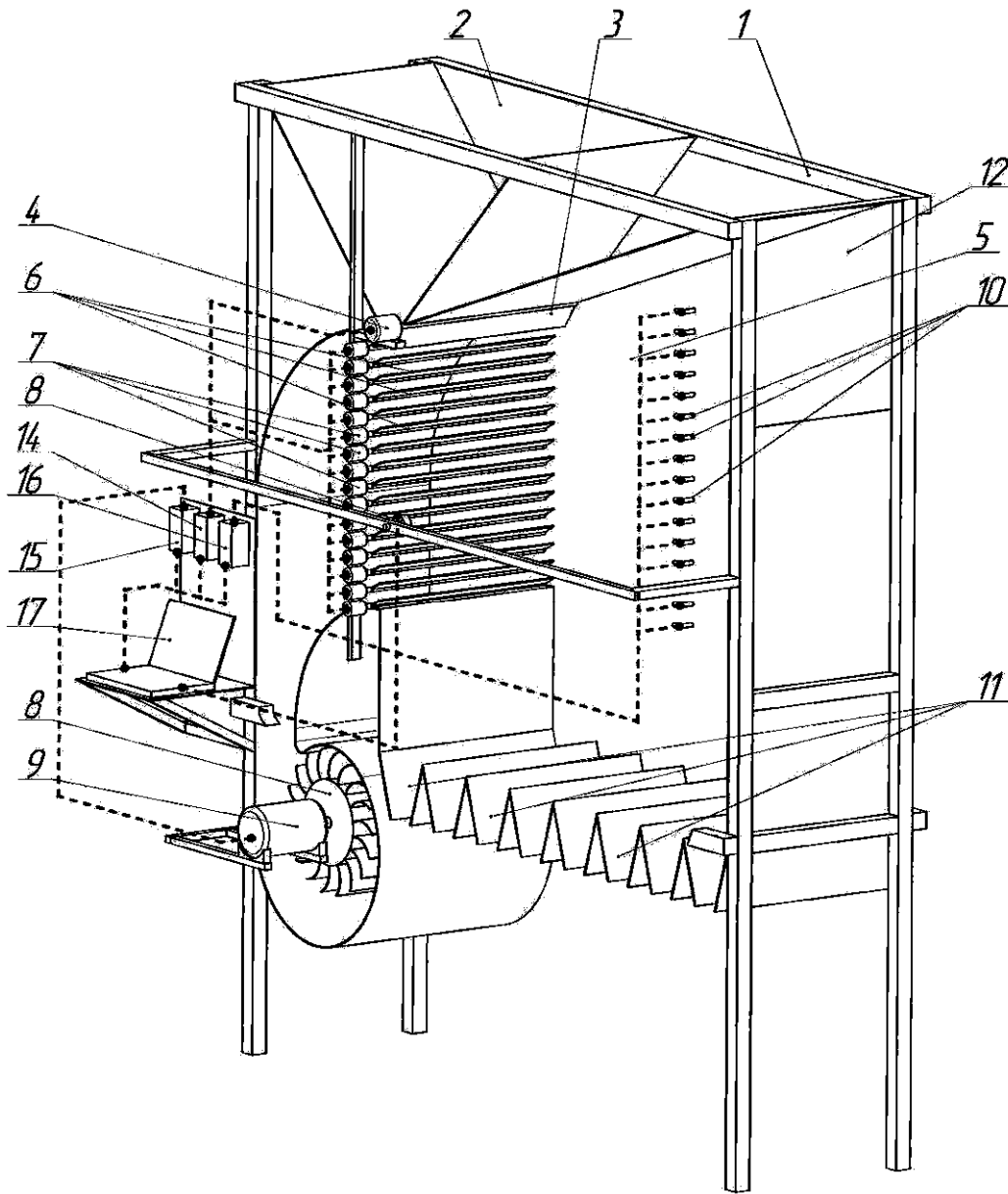
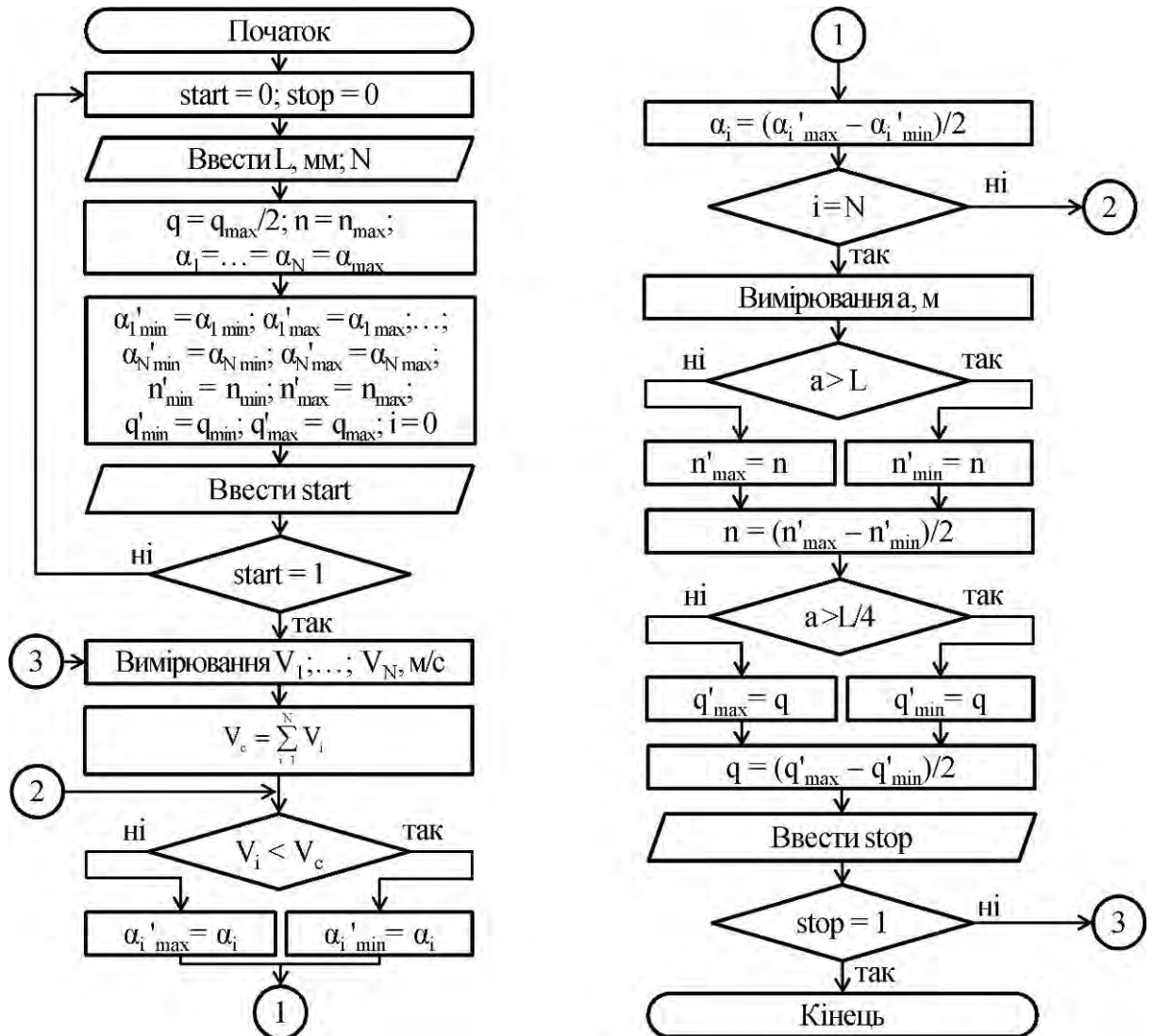


Рисунок 5.1 – Конструктивно-технологічна схема адаптивного аеродинамічного сепаратора

Процес сепарації на адаптивному аеродинамічному сепараторі відбувається в такий спосіб. Вихідний зерновий або насіннєвий матеріал надходить у бункер 2, який закріплено на рамі 1. Далі програмним забезпеченням персонального комп'ютера 17 здійснюється запуск процесу сепарації (start = 1). В початковий момент часу заслінка 3 встановлена таким

чином, що забезпечує середнє значення подачі зернового або насіннєвого матеріалу ($q = q_{\max}/2$).



start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму; q – подача зернового або насіннєвого матеріалу, кг/год; n – частота обертання ротора асинхронного електродвигуна 9, об/хв; α_i – кут закриття заслінки б, °; i – порядковий номер датчика швидкості повітряного потоку 10;

N – кількість датчиків швидкості повітряного потоку 10; V_i – значення швидкості повітряного потоку, яка виміряна i-датчиком швидкості повітряного потоку 10; L – довжина сепараційної камери 5, мм; a – максимальна відстань польоту зернового або насіннєвого матеріалу, мм;

«'» – позначає тимчасові змінні; «min» – позначає мінімальне значення змінної; «max» – позначає максимальне значення змінної

Рисунок 5.2 – Алгоритм програмного забезпечення

Також в початковий момент часу частота обертання ротора асинхронного електродвигуна 9 дорівнює максимальному значенню ($n = n_{\max}$), відповідно до цього продуктивність відцентрового вентилятора 8 є найбільшою. При цьому заслінки 6 повністю відкриті ($\alpha_i = \alpha_{\max}$), що забезпечує максимальний повітряний потік в сепараційній камері 5. Окрім цього в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 17 вводяться значення довжин сепараційної камери 5 (L , мм) і кількості датчиків швидкості повітряного потоку 10 (N).

Зміна подачі зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення персонального комп'ютера 17 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування заслінками 14, де він перетворюється і подається до крокового електродвигуна 4, який встановлює заслінку 3 у певне відкаліброване положення.

Зміна швидкості повітряного потоку в сепараційній камері 5 (V , м/с) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення персонального комп'ютера 17 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до частотного перетворювача 15, який змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна 9 (n , об/хв) і як наслідок – лопатей відцентрового вентилятора 8. Частота електромережі прямо пропорційна частоті обертання лопатей відцентрового вентилятора 8 і відповідно його продуктивності та швидкості повітряного потоку в сепараційній камері 5.

Забезпечення рівномірності повітряного потоку в сепараційній камері 5 здійснюється наступним чином. Датчики швидкості повітряного потоку 10 реєструють його значення на відповідній висоті (V_1, V_2, \dots, V_N , де N – кількість датчиків). Аналогові сигнали з датчиків швидкості повітряного потоку 10 за допомогою електричних проводів передаються до блока обробки даних 16, де

вони узагальнюються і оцифровуються. Узагальнений цифровий сигнал з блока обробки даних 16 за допомогою електричних проводів передається до персонального комп'ютера 17. Програмне забезпечення персонального комп'ютера 17 усереднює значення швидкості

$$V_c = \sum_{i=1}^N V_i, \quad (5.1)$$

де i – порядковий номер датчика швидкості повітряного потоку 10.

Якщо швидкість потоку повітря на відповідній висоті (V_i) більше (менше) за середнє значення (V_c), то персональний комп'ютер 17 за допомогою електричних проводів подає цифровий сигнал до блока керування заслінками 14, який приводить в дію відповідний кроковий електродвигун 7. У цьому випадку відповідна заслінка 6 закривається (відкривається) на певний відкалібрований кут (α_i). В результаті чого швидкість повітряного потоку в сепараційній камері 5 на відповідній висоті зменшується (збільшується).

Далі зерновий або насінневий матеріал через заслінку 3 під дією гравітації починає вільно падати в сепараційну камеру 5. В свою чергу потік повітря генерується відцентровим вентилятором 8 і через відкриті заслінки 6 поступає на вхід сепараційної камери 5. В сепараційній камері 5 зерновий або насінневий матеріал зустрічається з повітряним потоком, в результаті чого розділюється на окремі фракції, які потрапляють у відповідні збірники фракцій 11 (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII) і вікно збірника пилу 12 (IX).

Фотокамера 13 через прозору фронтальну стінку сепараційної камери 5 фіксує зображення процесу розділення зернового або насінневого матеріалу (рисунок 5.3). Фотокамера 13 за допомогою електричних проводів передає отримане зображення до персонального комп'ютера 17. Програмне забезпечення персонального комп'ютера 17 визначає траєкторії руху зернового або насінневого матеріалу і максимальну відстань його польоту (a , мм).

Якщо максимальна відстань польоту зернового або насінневого матеріалу (a) більше (менше) за довжину сепараційної камери 5 (L), то персональний комп'ютер 17 за допомогою електричних проводів подає цифровий сигнал до

частотного перетворювача 15 збільшуючи (зменшуючи) частоту електромережі. При цьому збільшується (зменшується) частота обертання ротора асинхронного електродвигуна 9 (n) і як наслідок лопатей відцентрового вентилятора 8. Збільшення (зменшення) частоти обертання лопатей відцентрового вентилятора 8 призводить до збільшення (зменшення) швидкості повітряного потоку в сепараційній камері 5 (V). В результаті чого максимальна відстань польоту зернового або насінневого матеріалу (a) збільшується (зменшується).

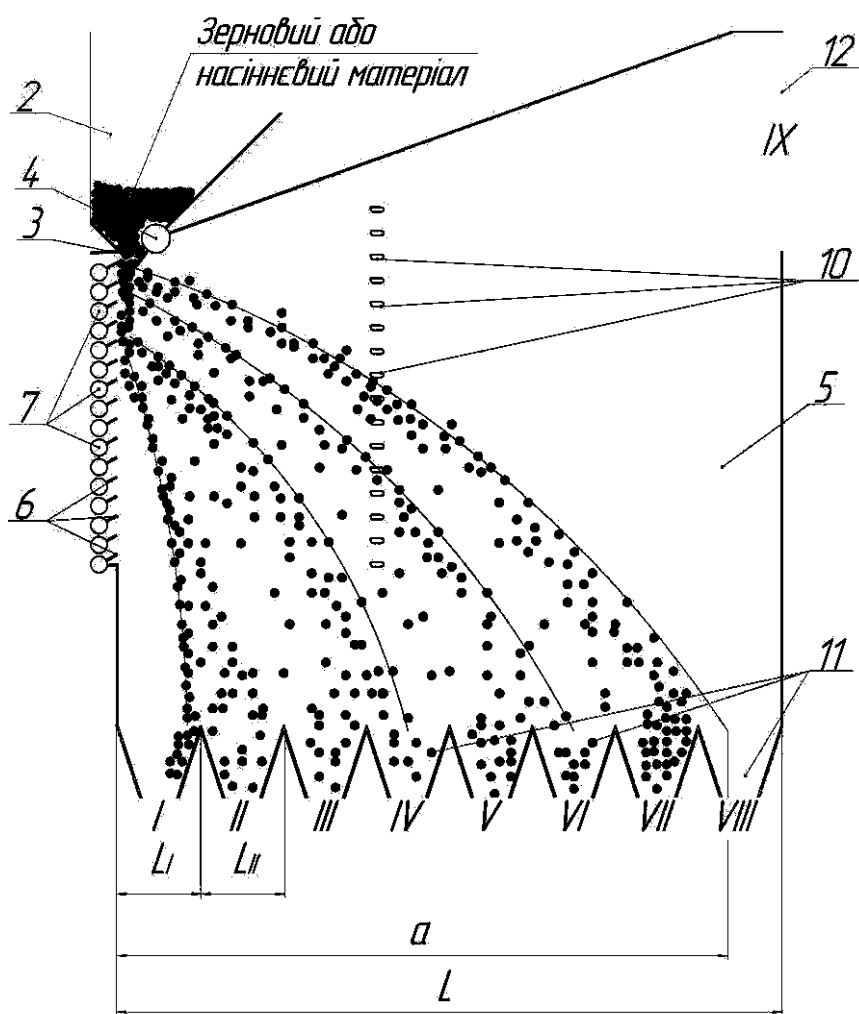


Рисунок 5.3 – Процес розділення зернового або насінневого матеріалу

Якщо максимальна відстань польоту зернового або насінневого матеріалу (a) менше (більше) за сумарну довжину збірників фракцій 11 I і II ($L_I + L_{II}$), то персональний комп'ютер 17 за допомогою електричних проводів подає

цифровий сигнал до блока керування заслінками 14, де він перетворюється і подається до крокового електродвигуна 4, який встановлює заслінку 3 у певне відкаліброване положення, зменшуючи (збільшуючи) подачу зернового або насіннєвого матеріалу (q).

Використання адаптивного аеродинамічного сепаратора, в якому за рахунок встановлених крокових електродвигунів, датчиків швидкості повітряного потоку, фотокамери, блока керування заслінками, частотного перетворювача, блока обробки даних, персонального комп'ютера із програмним забезпеченням на основі розробленого алгоритму, дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових або насіннєвих сумішей за аеродинамічними властивостями з більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

5.1.2 Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря

Як відомо, генератори повітряного потоку (вентилятори різних типів, турбіни, каскади форсунок) на виході мають нерівномірний розподіл швидкості. Для забезпечення якісної роботи аеродинамічного сепаратора необхідно, щоб потік повітря був рівномірний. Це можна досягти шляхом встановлення на виході повітряного потоку каскаду заслінок, які з використанням автоматизованої системи керування відкриваються або закриваються. Це забезпечує пропускання або затримання потоку повітря на певній висоті.

Для обґрунтування даної системи вирівнювання потоку повітря за його швидкістю і визначенню алгоритму роботи каскаду заслінок проведемо чисельне моделювання. Для цього в програмному пакеті STAR-CCM+ створимо модель сепараційної камери аеродинамічного сепаратора із каскадом заслінок. На вході будемо створювати потоки повітря, які мають різноманітні градієнти швидкості по висоті, що наближені до реальних типів генераторів повітряного

потіку. Після каскаду заслінок на відстані 0,05-0,4 м будемо визначати розподіли швидкостей перетвореного потоку повітря. В якості критеріїв вирівнювання потоку повітря приймемо середнє значення швидкості V_m і його середньоквадратичне відхилення V_σ .

З початку розглянемо ідеальний випадок, коли на виході генератора створений рівномірний повітряний потік із швидкістю 15 м/с. В результаті у випадку коли всі заслінки відкриті швидкість створеного потоку практично не змінюється на будь якій відстані від каскаду заслінок (рисунок 5.4).

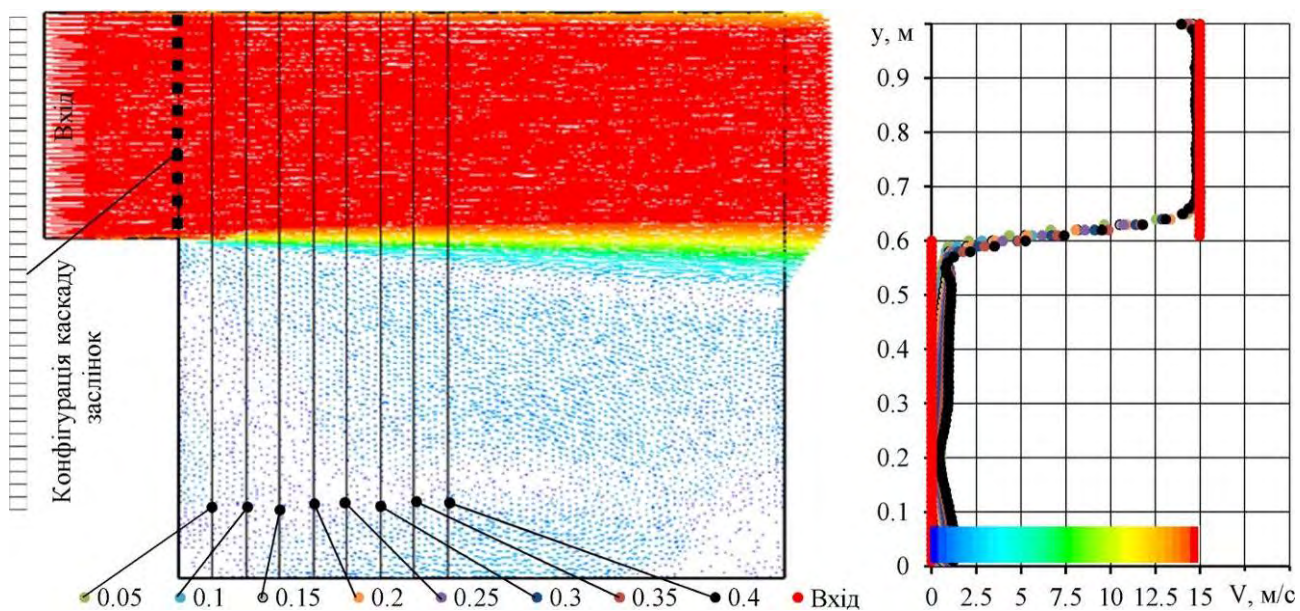


Рисунок 5.4 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із відкритими заслінками при ідеальному вхідному потоці

Розглянемо випадок коли на виході генератора створений повітряний потік характеризується швидкістю, яка розподіляється за параболічним законом ($V \sim y^4$). При всіх відкритих заслінках швидкість створеного потоку практично не змінюється на будь якій відстані від каскаду заслінок (рисунок 5.5). Швидкість при цьому змінюється від 10 до 15 м/с, її середнє значення складає 13,8 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 1,5 м/с.

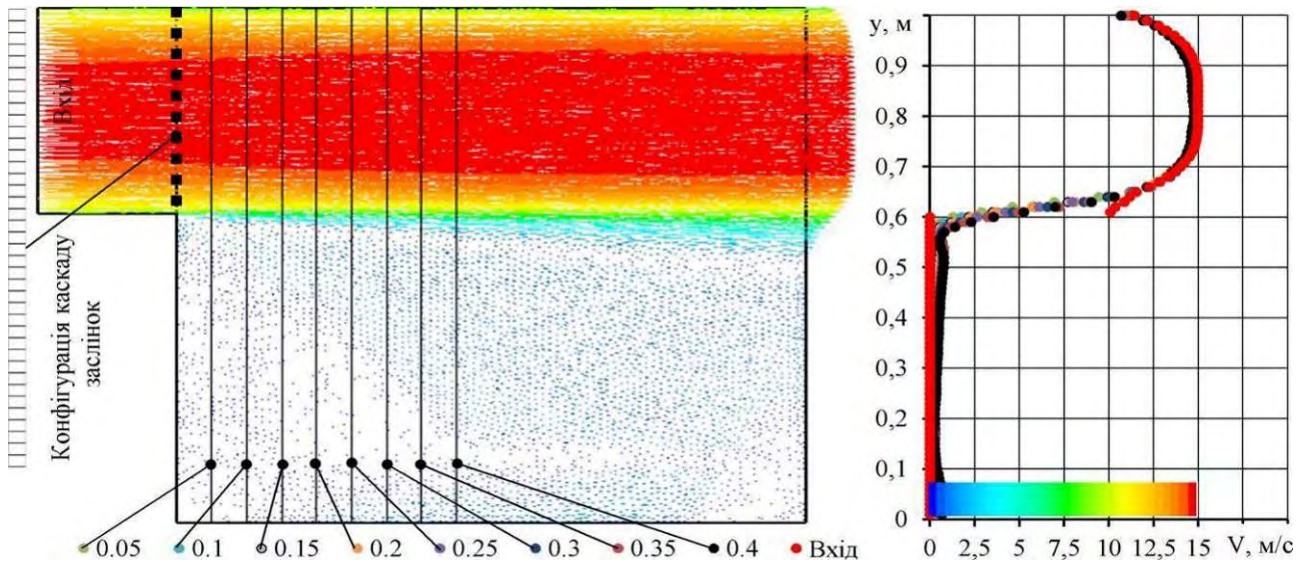


Рисунок 5.5 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із відкритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується параболічному закону ($V \sim y^4$)

Для вирівнювання швидкості потоку повітря необхідно закрити каскад заслінок у певній конфігурації (рисунок 5.6). В результаті створений повітряний потік є вирівняний. Швидкість при цьому змінюється від 14,4 до 15 м/с, її середнє значення складає 14,8 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 0,2 м/с.

Розглянемо ще один випадок коли на виході генератора створений повітряний потік характеризується швидкістю, яка розподіляється за параболічним законом ($V \sim y^5$). При всіх відкритих заслінках швидкість створеного потоку практично не змінюється на будь якій відстані від каскаду заслінок (рисунок 5.7). Швидкість при цьому змінюється від 10 до 15 м/с, її середнє значення складає 13,6 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 1,4 м/с.

Для вирівнювання швидкості потоку повітря необхідно закрити каскад заслінок у певній конфігурації (рисунок 5.8). В результаті створений повітряний потік є вирівняний. Швидкість при цьому змінюється від 14,1 до 14,8 м/с, її середнє значення складає 14,5 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 0,3 м/с.

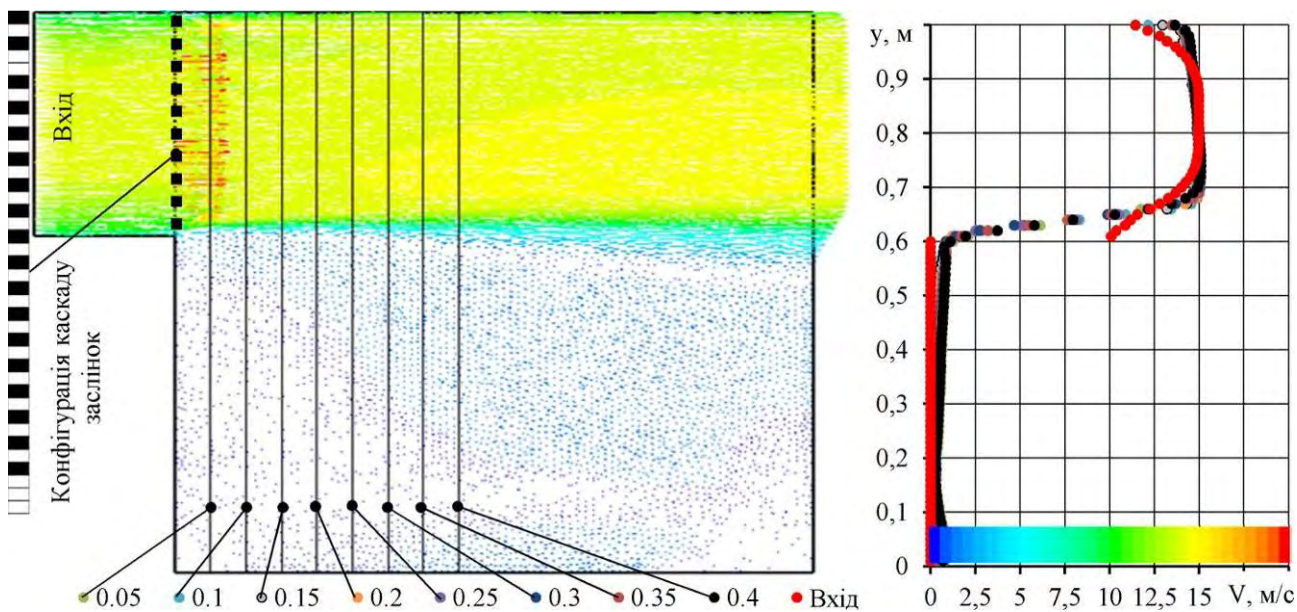


Рисунок 5.6 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із закритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується параболічному закону ($V \sim y^4$)

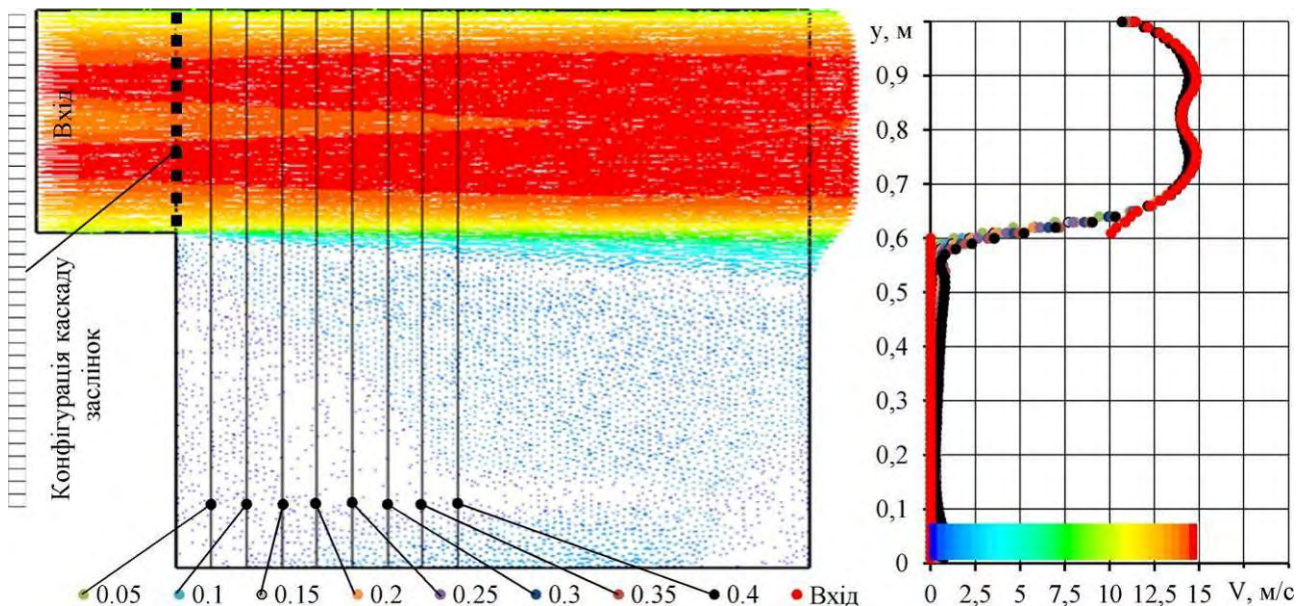


Рисунок 5.7 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із відкритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується параболічному закону ($V \sim y^5$)

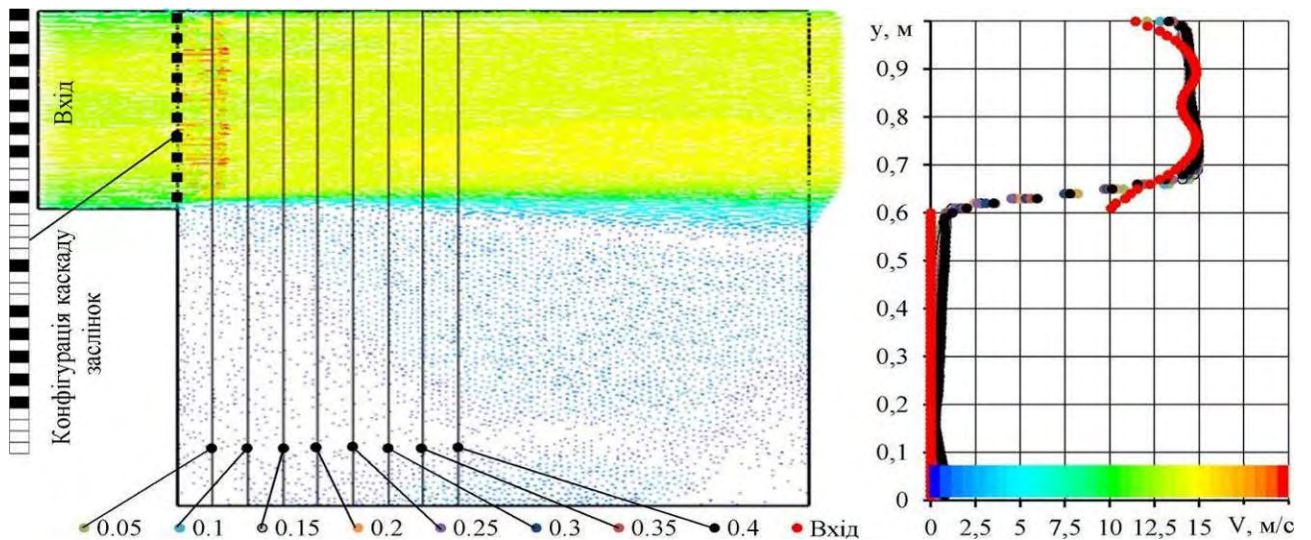


Рисунок 5.8 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із закритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується параболічному закону ($V \sim y^4$)

Розглянемо випадок коли на виході генератора створений несиметричний повітряний потік характеризується швидкістю, яка розподіляється за лінійним законом ($V \sim y$). При всіх відкритих заслінках швидкість створеного потоку практично не змінюється на будь якій відстані від каскаду заслінок (рисунок 5.9). Швидкість при цьому змінюється від 11 до 15 м/с, її середнє значення складає 13,1 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 1,8 м/с.

Для вирівнювання швидкості потоку повітря необхідно закрити каскад заслінок у певній конфігурації (рисунок 5.10). В результаті створений повітряний потік є вирівняний. Швидкість при цьому змінюється від 12,7 до 13,8 м/с, її середнє значення складає 13,0 м/с, а середнє квадратичне відхилення – 0,4 м/с.

Спираючись на отримані дані чисельного моделювання можна зробити висновок, що з використанням автоматизованого каскаду заслінок можна досягти вирівнювання швидкості повітряного потоку ($\pm 0,2-0,4$ м/с) в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора, до складу якого може входити будь-який генератор потоку.

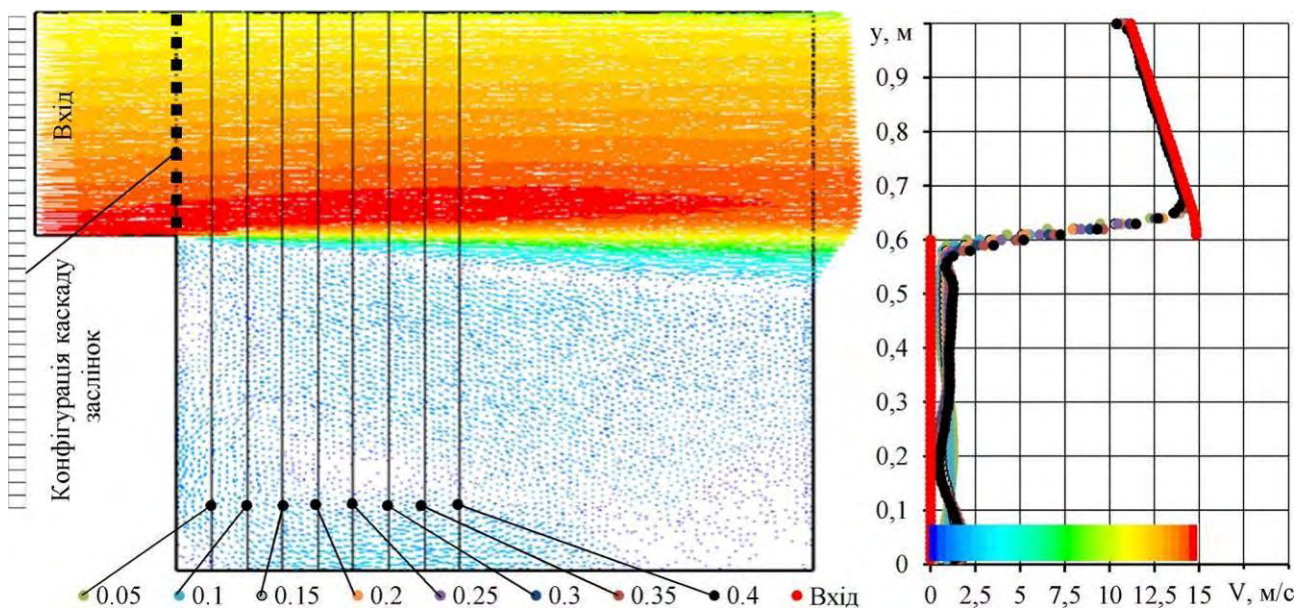


Рисунок 5.9 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із відкритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується лінійному закону ($V \sim y$)

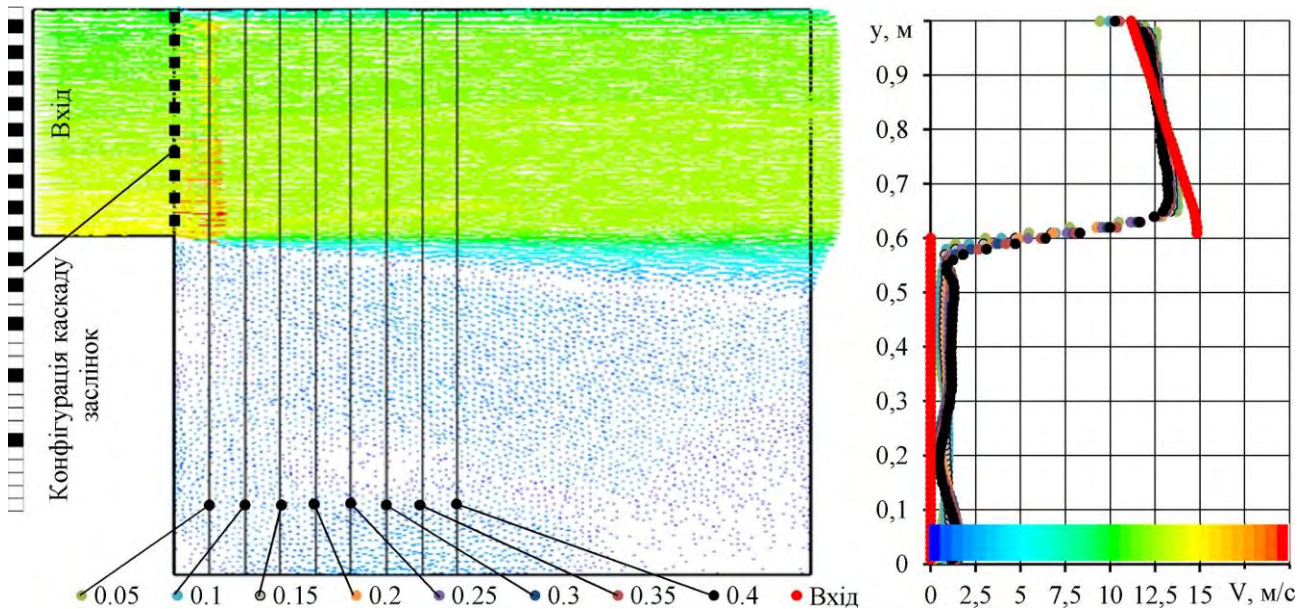


Рисунок 5.10 – Розподіл швидкостей потоку повітря в сепараційній камері аеродинамічного сепаратора із закритими заслінками при швидкості вихідного потоці, яка підпорядковується лінійному закону ($V \sim y$)

Однак при цьому відбувається втрата номінальної швидкості на 5-15 %. Підвищення її може бути здійснено за рахунок збільшення продуктивності генератора повітряного потоку (наприклад, за рахунок збільшення частоти обертання лопатей вентилятора), що приводить до збільшення енерговитрат на 5-15 %. Але враховуючи пріоритетність якості виконання технологічного процесу сепарації на аеродинамічному сепараторі даними втратами можна знехтувати.

5.1.3 Експериментальна перевірка зразка обладнання

Для експериментальної перевірки конструктивно-технологічної схеми адаптивного аеродинамічного сепаратора створено його експериментальний зразок із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q і швидкість повітря V) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму. Загальний вигляд експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора представлено на рисунку 5.11. Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора приведена на рисунку 5.12.

Експериментальна перевірка включала два етапи. Перший був реалізований при раціональних параметрах аеродинамічного сепаратора відповідно до (4.24). Другий із застосування автоматизованої системи керування режимними параметрами аеродинамічного сепаратора відповідно до алгоритму, який представлений на рисунку 5.2. Кожен етап був проведений із 10 разовою повторністю на насінневих сумішах, які мають різний компонентний склад (виповнені; неповністю виповнені і пусті; голе ядро і уражене грибковими хворобами; органічні рослинні домішки) гібриду Пріоритет селекції Інституту олійних культур НААН. Критерієм оцінки якості виконання процесу сепарації насінневої суміші є коефіцієнт розподілу δ і продуктивність q .

Результати експериментальної перевірки адаптивного аеродинамічного сепаратора представлені в таблиці 5.1. Застосування розробленого алгоритму при дворазовій сепарації насінневої суміші на адаптивному аеродинамічному сепараторі дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневої суміші соняшнику за аеродинамічними властивостями із продуктивністю $q = 114 \pm 9$ кг/год і коефіцієнтом розподілу $\delta = 96,3 \pm 2,6$ %.



Рисунок 5.11 – Загальний вигляд експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора

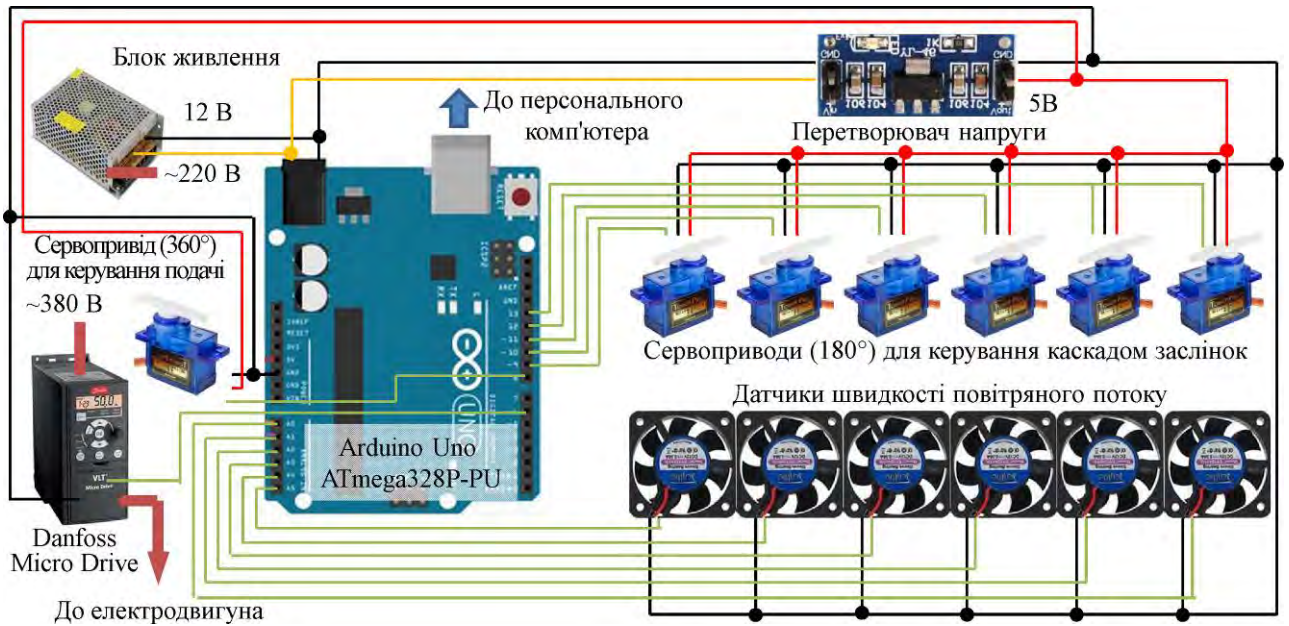


Рисунок 5.12 – Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора

Таблиця 5.1 – Результати експериментальної перевірки адаптивного аеродинамічного сепаратора

№ повторності	Перший етап сепарації				Другий етап сепарації			
	Раціональні параметри		Розроблений алгоритм		Раціональні параметри		Розроблений алгоритм	
	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %
1	278	66	304	77,76	109	84,36	108	94,26
2	287	66,78	318	78	107	84,3	110	94,5
3	288	67,08	314	77,76	109	83,76	110	94,26
4	310	71,64	306	83,4	92	90,6	126	99,9
5	319	71,34	300	82,56	94	90,06	126	99,06
6	294	65,76	300	77,52	111	84,12	106	94,02
7	290	64,56	320	78,48	105	86,28	106	94,98
8	303	70,5	314	81,72	95	89,22	124	98,22
9	300	70,56	316	83,4	92	90	122	99,9
10	299	64,92	304	77,76	110	84,96	105	94,26
Середнє	297	67,9	310	79,8	102	86,8	114	96,3
Середнє квадратичне відхилення	12	2,8	8	2,6	8	2,9	9	2,6

5.2 Адаптивний віброрешітний сепаратор насіння соняшнику

5.2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Адаптивний віброрешітний сепаратор (рисунок 5.13) містить станину 1, до якої за допомогою двох передніх пневмоподушок 2 і двох задніх пневмоподушок 3 кріпиться кузов 4 з решітною рамкою 5 із необхідним розміром отворів, яка утворює область сходу і проходу. В кінці решітної рамки 5 на відстані 150-200 мм від краю отворів немає. На станині 1 над решітною рамкою 5 закріплений приймальний пристрій 6, що складається з бункера 7 і заслінки 8, до якої приєднано вал ротора крокового електродвигуна 9. Кузов 4 містить вивантажувальне вікно для сходу 10 і вивантажувальне вікно для проходу 11. Кузов 4 по боках оснащений двома електровібраторами 12, які встановлені під однаковим кутом до площини решітної рамки 5. Дві передні пневмоподушки 2 за допомогою трубопроводів (на схемі відмічені жирною лінією) приєднані до переднього електроклапана високого тиску 13, переднього електроклапана атмосферного тиску 14 і переднього електронного датчика тиску 15. Аналогічно дві задні пневмоподушки 3 за допомогою трубопроводів (на схемі відмічені жирною лінією) приєднані до заднього електроклапана високого тиску 16, заднього електроклапана атмосферного тиску 17 і заднього електронного датчика тиску 18. Передній електроклапан високого тиску 13 і задній електроклапан високого тиску 16 за допомогою трубопроводів (на схемі відмічені жирною лінією) приєднані до повітряного ресивера 19, який підключено до компресора 20. Передній електроклапан атмосферного тиску 14 і задній електроклапан атмосферного тиску 17 сполучаються з навколишнім повітрям через два повітряні фільтри 21. На станині 1 над закінченням решітної рамки 5 (над областю без отворів) встановлена фотокамера 22. Кроковий електродвигун 9 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднаний до блока керування кроковим електродвигуном 23. Два електровібратори 12 за допомогою електричних

проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока керування електродвигунами 24. Передній електроклапан високого тиску 13, передній електроклапан атмосферного тиску 14, передній електронний датчик тиску 15, задній електроклапан високого тиску 16, задній електроклапан атмосферного тиску 17 і задній електронний датчик тиску 18 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока керування пневмоподушками 25.

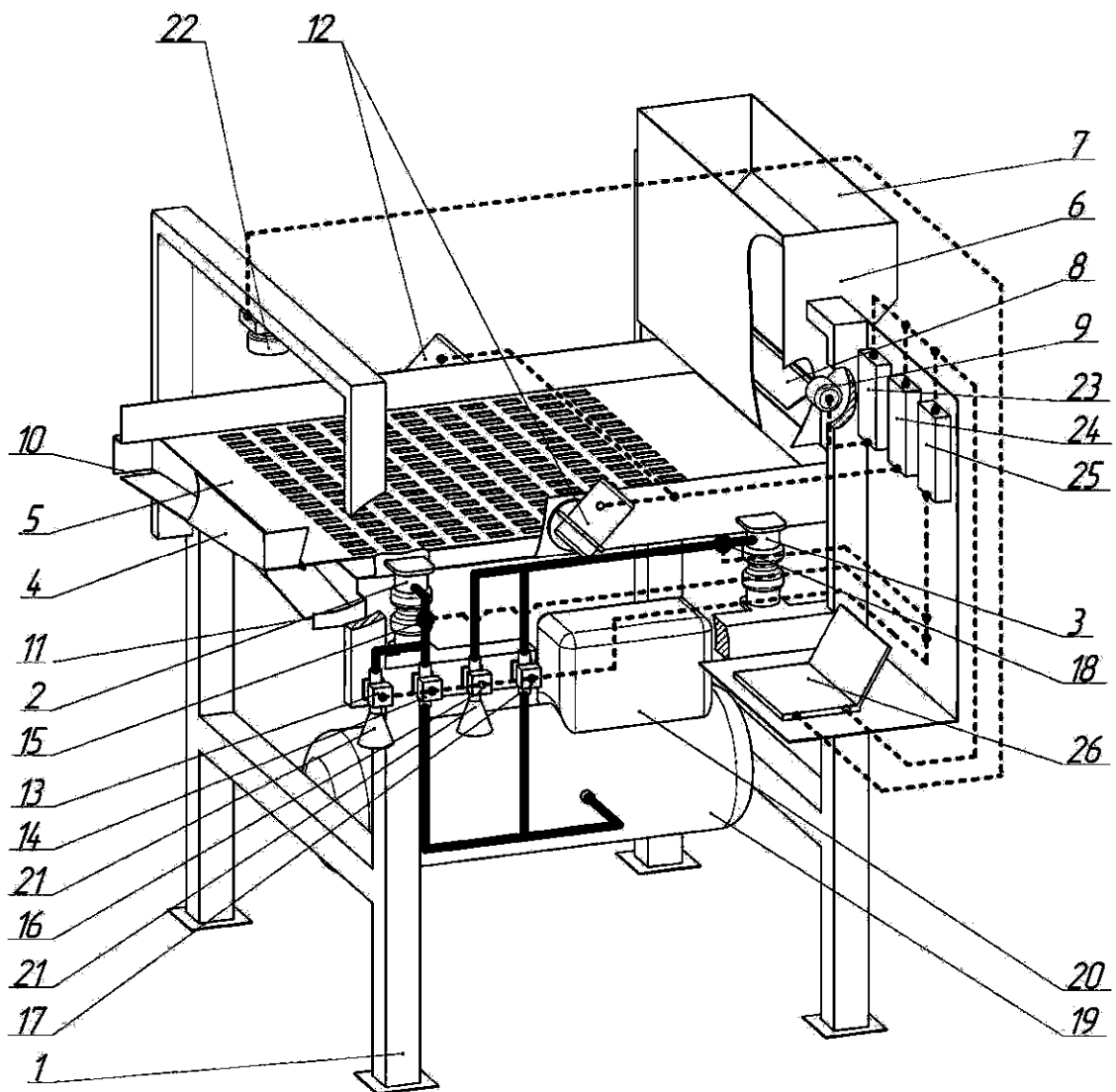
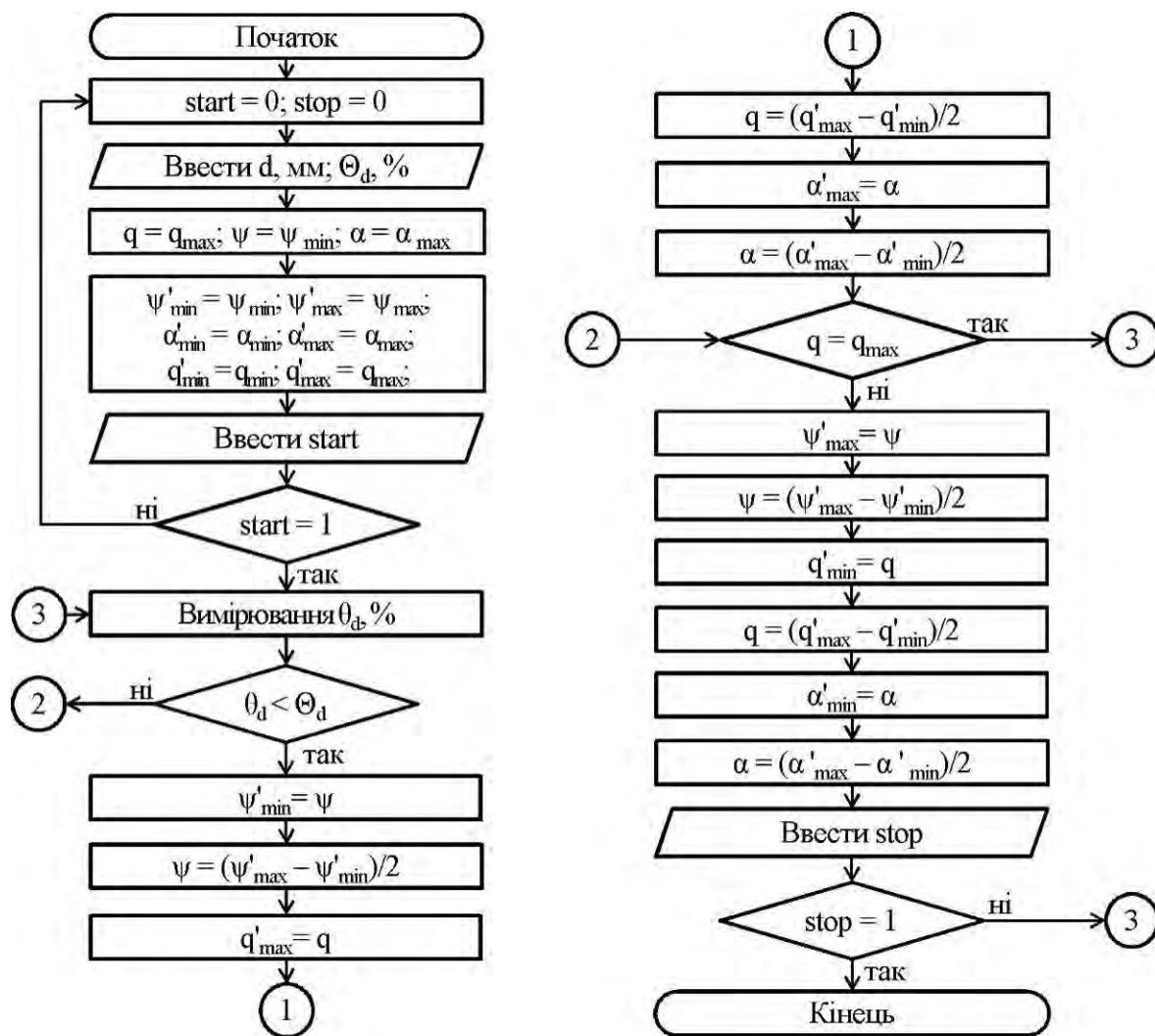


Рисунок 5.13 – Конструктивно-технологічна схема адаптивного віброрешітного сепаратора

Блок керування кроковим електродвигуном 23, блок керування електродвигунами 24, блок керування пневмоподушками 25, фотокамера 22 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені напівжирною лінією) приєднані до персонального комп'ютера 26, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення, алгоритм якого представлено на рисунку 5.14.



start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму; d – значення найменшого розміру отворів решітної рамки 5, мм; Θ_d – необхідна концентрація насіння за сходом, %; q – подача зернового або насінневого матеріалу, кг/год; ψ – частота вібрації решітної рамки 5, Гц; α – кут нахилу решітної рамки 5, °; θ_d – виміряна сумарна концентрація фракції зернової або насінневої суміші, %; «'» – позначає тимчасові змінні; «min» – позначає мінімальне значення змінної; «max» – позначає максимальне значення змінної

Рисунок 5.14 – Алгоритм програмного забезпечення

Процес сепарації на адаптивному віброрешітному сепараторі відбувається в такий спосіб. Вихідний зерновий або насінний матеріал надходить у бункер 7 приймального пристрою 6. Далі в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 26 відбувається запуск процесу сепарації ($start = 1$). В початковий момент часу заслінка 8 встановлена таким чином, що забезпечує максимальну подачу зернового або насінневого матеріалу ($q = q_{max}$).

При цьому дві передні і дві задні пневмоподушки 2 і 3 відповідно встановлені таким чином, що забезпечують максимальний кут нахилу решітної рамки 5 ($\alpha = \alpha_{max}$). Також в початковий момент часу частоти обертання роторів електровібраторів 12 дорівнюють мінімальному значенню, відповідно до цього частота вібрації решітної рамки 5 є найбільшою ($\psi = \psi_{min}$). Окрім цього в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 26 вводяться значення найменшого розміру отворів решітної рамки 5 (d , мм) і необхідної концентрації насіння за сходом (Θ_d , %), розмір яких більший за найменший розмір отворів решітної рамки 5.

Зміна подачі зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення персонального комп'ютера 26 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування кроковим електродвигуном 23, де він перетворюється і подається до крокового електродвигуна 9, який встановлює заслінку 8 у певне положення.

Зміна частоти вібрації решітної рамки 5 (ψ , Гц) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення персонального комп'ютера 26 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування електродвигунами 24. У разі використання в якості електровібраторів 12 асинхронного електродвигуна блок керування електродвигунами 24 змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. В іншому випадку, у разі використання в якості електровібраторів 12 електродвигунів постійного

струму блок керування електродвигунами 24 змінює напругу електромережі в діапазоні від 0 В до номінального значення, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. Обертання ротора електровібраторів 12 призводить до прямо пропорційної зміни частоти вібрації решітної рамки 5.

Зміна кута нахилу решітної рамки 5 (α , °) здійснюється наступним чином. Персональний комп'ютер 26 за допомогою електричних проводів передає значення кута нахилу у вигляді цифрового сигналу до блока керування пневмоподушками 25. Також блок керування пневмоподушками 25 за допомогою електричних проводів постійно зчитує значення тисків з переднього і заднього електронних датчиків тиску 15 і 18 відповідно. Для підтримання постійного тиску у двох передніх пневмоподушках 2 в межах 2-2,2 атм блок керування пневмоподушками 25 за допомогою електричних проводів передає сигнал до переднього електроклапана високого тиску 13 і переднього електроклапана атмосферного тиску 14. Після подачі сигналу на передній електроклапан високого тиску 13 відбувається його відкриття і за допомогою трубопроводів дві передні пневмоподушки 2 сполучаються з повітряним ресивером 19, при цьому збільшуючи тиск в них. Після подачі сигналу на передній електроклапан атмосферного тиску 14 відбувається його відкриття і через повітряні фільтри 21 дві передні пневмоподушки 2 сполучаються з атмосферним тиском, при цьому зменшуючи тиск в них. Попередне відкаліброване значення тиску у двох задніх пневмоподушках 3 відповідає значенню кута нахилу решітної рамки 5. У випадку збільшення (або зменшення) кута нахилу решітної рамки 5 блок керування пневмоподушками 25 за допомогою електричних проводів передає сигнал до заднього електроклапана високого тиску 16 (або заднього електроклапана атмосферного тиску 17). Після подачі сигналу на задній електроклапан високого тиску 16 відбувається його відкриття і за допомогою трубопроводів дві задні пневмоподушки 3 сполучаються з повітряним ресивером 19, при цьому збільшуючи тиск в них. Після подачі сигналу на задній електроклапан

атмосферного тиску 17 відбувається його відкриття і через повітряні фільтри 21 дві задні пневмоподушки 3 сполучаються з атмосферним тиском, при цьому зменшуючи тиск в них. Компресор 20 при зниженні тиску у ресивері 19 включається і закачує повітря в нього, збільшуючи при цьому значення тиску до заданого.

Далі зерновий або насінневий матеріал потрапляє на площину решітної рамки 5 кузова 4, де він піддається вібрації за рахунок коливання двох електровібраторів 12. Під час проходження зернового або насінневого матеріалу по площині решітної рамки 5 відбувається його розділення за найменшим геометричним розміром на дві фракції: «прохід» і «схід». До фракції «прохід» входять насінини, найменший геометричний розмір яких менший за значення найменшого розміру отворів решітної рамки 5. А до фракції «схід» можуть входити насінини з різним найменшим геометричним розміром. Це пов'язано з тим, що під час переміщення насінин по площині решітної рамки 5 ймовірність їх проходження залежить від їх орієнтації відносно отворів. Фракція «прохід» переміщується по області проходження решітною рамкою 5 і потрапляє до вивантажувального вікна для проходження 11. А фракція «схід» рухається по області сходу решітною рамкою 5 і потрапляє до вивантажувального вікна для сходу 10.

В момент, коли фракція «схід» зернового або насінневого матеріалу знаходиться під фотокамерою 22, відбувається процес фотозйомки з періодичністю не більше 10 с. Отримані при цьому зображення розподілу фракції «схід» зернового або насінневого матеріалу по області без отворів решітної рамки 5 передаються до персонального комп'ютера 26. Далі в персональному комп'ютері 26, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення, проводиться обробка отриманих зображень за алгоритмом, який наведено в розділі 5.2.2.

Далі програмне забезпечення персонального комп'ютера 26, спираючись на введені значення найменшого розміру отворів решітної рамки 5 (d , мм),

необхідної концентрації насіння за сходом (Θ_d , %) і отримані значення концентрації фракції «схід» зернової або насінневої суміші (θ_d , %), виконує запропонований алгоритм і змінює подачу зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год), частоту вібрації решітної рамки S (ψ , Гц) і кут її нахилу (α , °).

Використання адаптивного віброрешітного сепаратора, в якому за рахунок встановлених двох передніх і двох задніх пневмоподушок, крокового електродвигуна, переднього і заднього електроклапанів високого та атмосферного тиску, переднього і заднього електронних датчиків тиску, повітряного ресивера, компресора, двох повітряних фільтрів, фотокамери, блоків керування кроковим електродвигуном, електродвигунами та пневмоподушками, персонального комп'ютера із програмним забезпеченням на основі розробленого алгоритму, дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових і насінневих сумішей за геометричними розмірами з більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

5.2.2 Алгоритм і програмне забезпечення визначення фракційного складу насіння соняшнику за фотозображенням

Сутність визначення фракційного складу соняшнику полягала у отриманні зображення насінневої суміші на поверхні та подальша його обробка за наступним алгоритмом. Даний алгоритм використовує новий метод аналізу зображень, за допомогою якого можна зменшити час, необхідний для підготовки насіння та зйомку зображень. Контури насіння автоматично розпізнаються з цифрових зображень, і обчислюються кілька параметрів форми, такі як довжина L , ширина B , площа S та довжина периметра P насіння.

Спочатку на зображенні вибирається прямокутна область фракції «схід» зернового або насінневого матеріалу. За результатами сканування зазначеної області проводяться морфологічні перетворення, метою яких є позбавлення зображень випадкових краплень, шумів і об'єднання зон, розділених тінню.

Алгоритм і реалізоване відповідне програмне забезпечення на базі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV аналізує всі зображення, що отримані з фотокамери. В результаті аналізу автоматично ідентифікуються насіння шляхом взяття послідовних точок по периметру насіння та максимізації або мінімізації значень у наступній послідовності:

- завантаження зображення;
- перетворення в 1-бітове зображення (чорне насіння на білому фоні);
- аналіз морфології для видалення шумів і пропусків;
- визначення контурів, позначивши всі насіння на зображенні та обчисливши довжину L , ширину B , площу S та довжину периметра P насіння.

Зображення обробляється в три етапи (рисунок 5.15).

По-перше, зображення обраної прямокутної області фракції зернового або насінневого матеріалу перетворюється з 24-розрядного (повнокольорового) в 1-бітове (чорно-біле) за допомогою методу сегментації, щоб отримати чорні насінини на білому [433]. Цей спосіб стабільний до рівня освітлення.

По-друге, будь-який шум або пропуск видаляється. Програмне забезпечення використовує функції OpenCV Erode та Dilate на основі морфологічних операцій [434].

По-третє, з використанням детектора границь Кенні та перетворення Хафа функція OpenCV FindContour [435] автоматично визначає контур кожного насіння в 1-бітному зображенні, який набуває набір координат (рисунок 5.16)

$$P_i = (x_i, y_i). \quad (5.2)$$

Положення початкової точки системи координат $O(0, 0)$ за всіх P_i визначається як лівий верхній кут на зображенні. З набору координат контуру функція OpenCV ContourArea обчислює його площу, а ArcLength [436] обчислює периметр. Використовуючи ці функції, обчислюються координати центра мас насіння, як

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i \right). \quad (5.3)$$

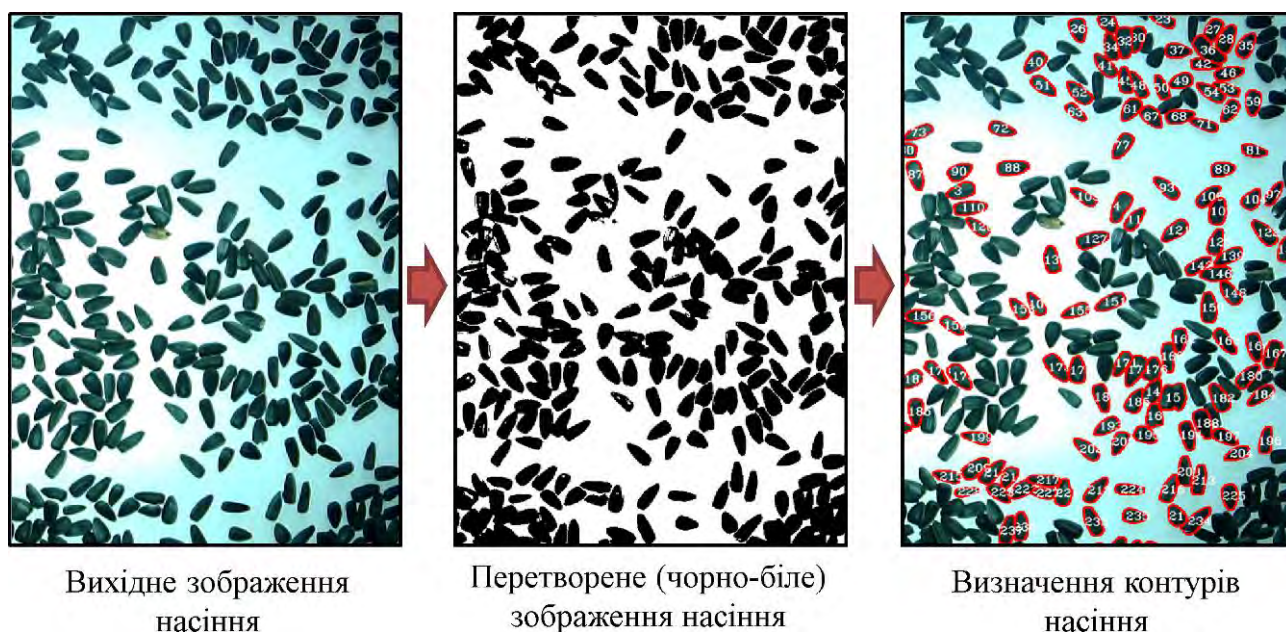


Рисунок 5.15 – Етапи обробки зображення

Для вимірювання довжини L алгоритм виявляє максимальну відстань між точками по периметру шляхом обчислення всіх відстаней сегмента $hl_{i,j}$ між усіма парами точок конуру (рисунок 5.16):

$$hl_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (5.4)$$

Найдовший сегмент L визначається шляхом:

$$L = hl_{\max} = \max_{i,j}(hl_{i,j}), P_{h_0}(x_{h_0}, y_{h_0}), P_{h_1}(x_{h_1}, y_{h_1}). \quad (5.5)$$

Для вимірювання ширини B алгоритм виявляє найдовший сегмент, який перпендикулярний довжині L (рисунок 5.16):

$$wl_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \left(\text{if } \frac{(y_{h_1} - y_{h_0})(y_i - y_j)}{(x_{h_1} - x_{h_0})(x_i - x_j)} = -1 \right), \quad (5.6)$$

$$B = wl_{\max} = \max_{i,j}(wl_{i,j}), P_{w_0}(x_{w_0}, y_{w_0}), P_{w_1}(x_{w_1}, y_{w_1}). \quad (5.7)$$

Далі використовуючи властивість нормального розподілу, проводиться процедура поетапного виділення складових, що входять до інтегральної кривої розподілу щільності ймовірності (функція Гаусса):

$$P(x) = A \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\delta^2}\right] \quad (5.8)$$

де $P(x)$ – щільність ймовірності ознаки x (геометричний розмір насінини);

A – амплітуда розподілу Гаусса;

\bar{x} – середнє значення ознаки;

δ – середньоквадратичне відхилення ознаки x від середнього \bar{x} .

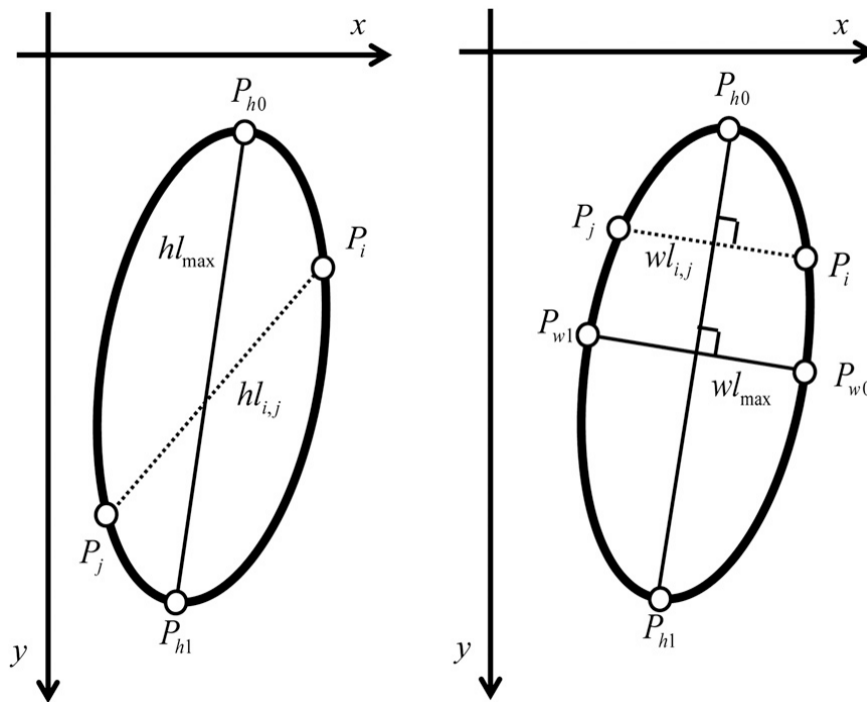


Рисунок 5.16 – Схема визначення параметрів насіння

Використовуючи квадратичну регресію до логарифму попередньої залежності,

$$\ln P(x) = -\frac{x^2}{2\delta^2} + \frac{\bar{x}}{\delta^2}x + \left[\ln A - \frac{\bar{x}^2}{2\delta^2} \right], \quad (5.9)$$

де коефіцієнт при змінній другого порядку $-1/2\delta^2$; при змінній першого порядку \bar{x}/δ^2 ; вільний член $-(\ln A - \bar{x}^2/2\delta^2)$, визначаються всі параметри нормального розподілу граничної ділянки інтегральної кривої. Послідовне вилучення виділених Гауссіан дозволяє відновити всі складові. Кожна компонента має свій максимум, що відповідає середньому значенню

геометричного розміру насінини і площі нормованої до одиниці, яка в процентному вираженні відображає сумарну концентрацію тієї чи іншої фракції зернової або насінневої суміші (θ_d , %).

Для відпрацювання зазначеної методики було складено спеціалізований штатив із фотокамерою ELP-USBFHD01M-BFV і джерелом світла, загальний вигляд яких представлено на рисунку 5.17.



Рисунок 5.17 – Загальний вигляд спеціалізованого штатива із фотокамерою ELP-USBFHD01M-BFV і джерелом світла

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень була насіннева суміш соняшнику, до складу якої входили наступні сортозразки соняшнику селекції Інституту олійних культур НААН: Сл2613, 14RNA274, ВК419-2, ІnK22, ІnK404, І2K2218, ВІР130, КГ9. Калібрування за геометричними розмірами проводилося за допомогою комплекту лабораторних решіт на лабораторному розсіві РЛУ-3.

В результаті фотозйомки отримано набір зображень насінин соняшнику різних фракцій «проходу» \varnothing 5 мм – \varnothing 10 мм (рисунок 5.18).

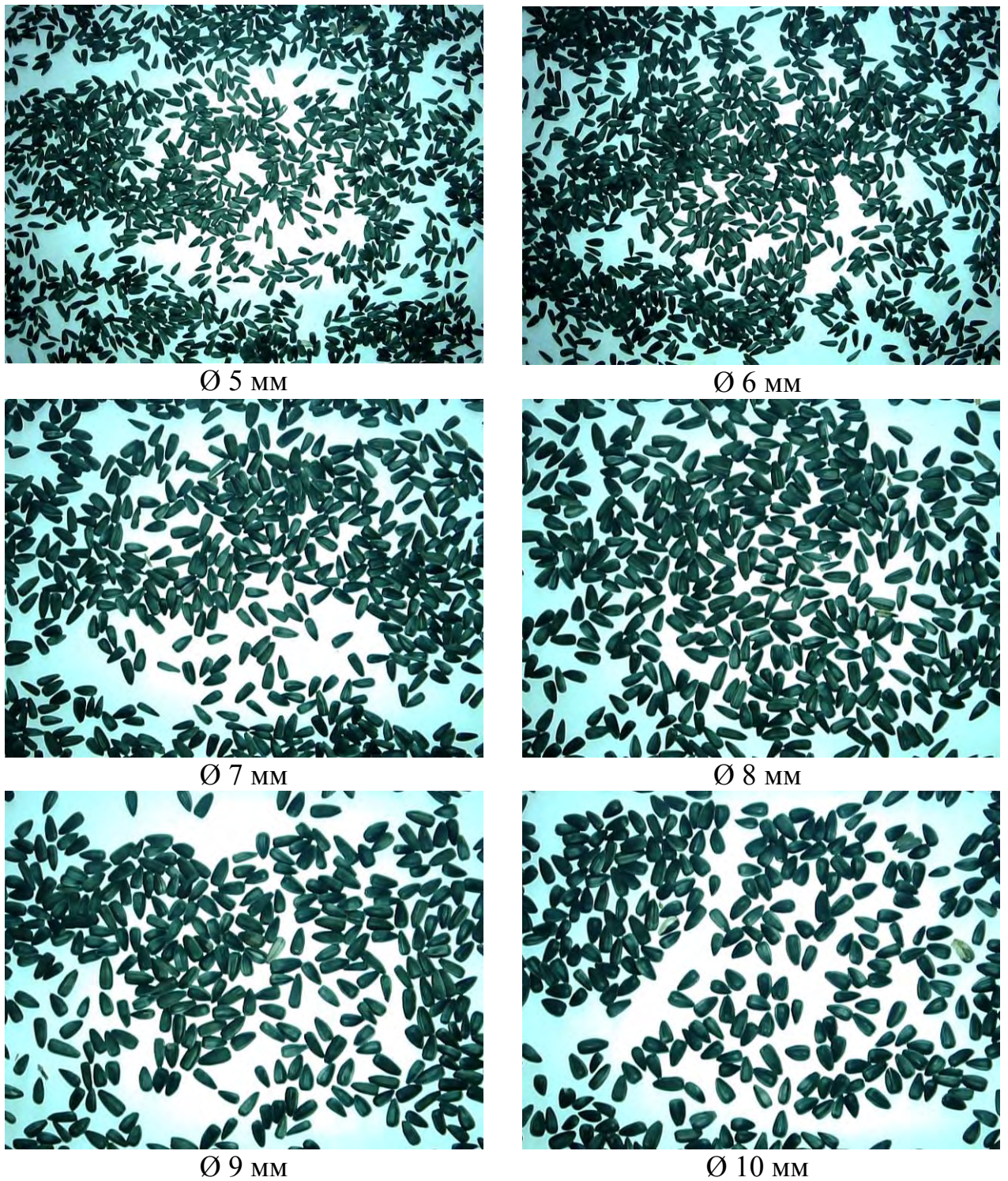


Рисунок 5.18 – Зображення насінин соняшнику різних фракцій

В результаті обробки зображень насінин соняшнику різних фракцій на розробленому програмному забезпеченні отримано розподіл насіння за їх шириною, що відповідає проведеному калібруванню на комплекті лабораторних решіт (рисунок 5.19).

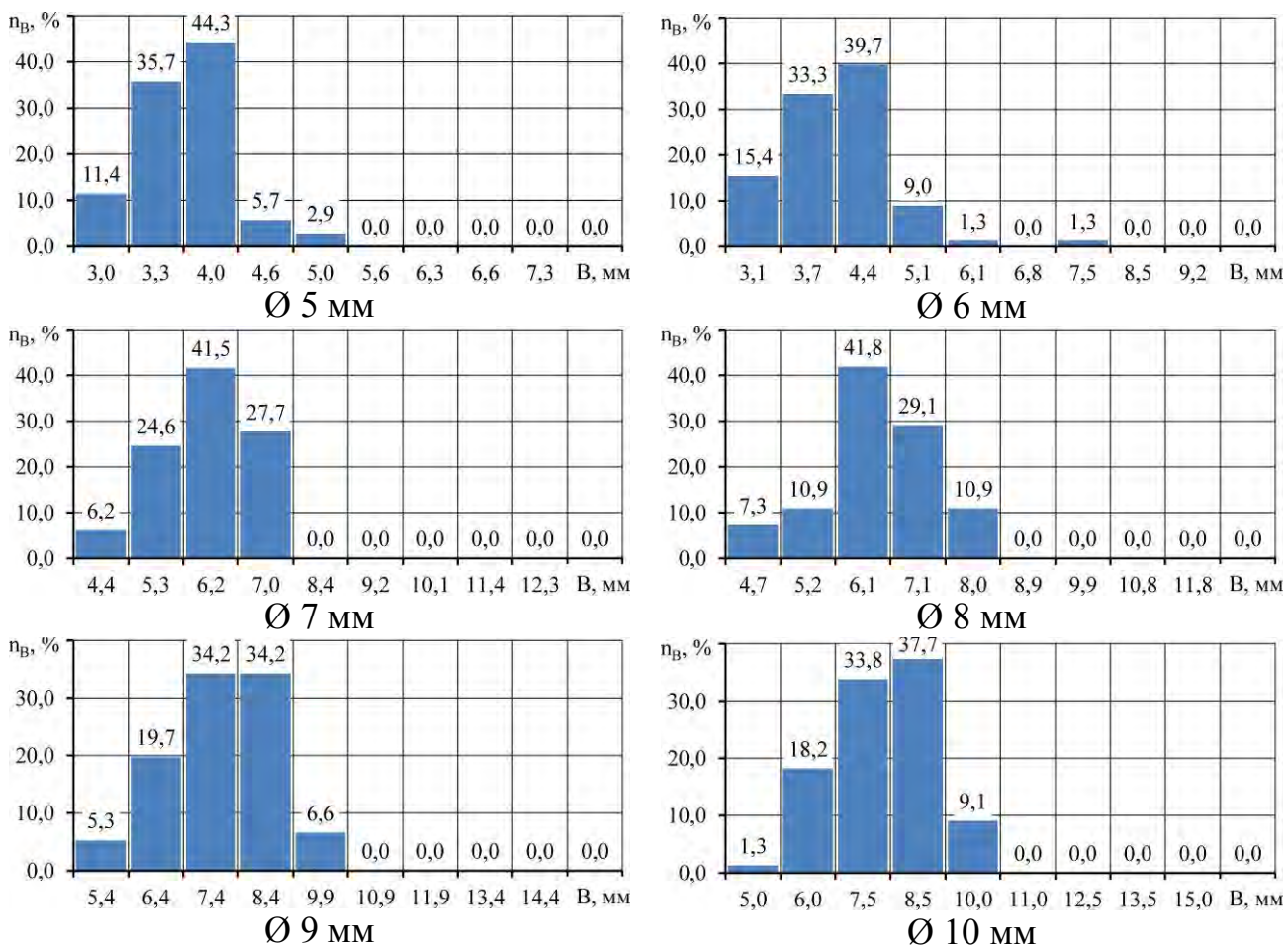


Рисунок 5.19 – Розподіл насіння за їх шириною при проведенному калібруванню на комплекті лабораторних решіт

5.2.3 Експериментальної перевірка зразка обладнання

Для експериментальної перевірки конструктивно-технологічної схеми адаптивного віброрешітного сепаратора на калібрувальній машині Cimbria Unigrain змонтовано фотокамеру ELP-USBFHD01M-BFV і джерело світла. Загальний вигляд представлено на рисунку 5.20. Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного віброрешітного сепаратора приведена на рисунку 5.21.

Експериментальна перевірка включала два етапи. Перший був реалізований при раціональних параметрах віброрешітного сепаратора відповідно до таблиці 4.2. Другий із застосування автоматизованої системи

керування режимними параметрами віброрешітного сепаратора відповідно до алгоритму, який представлений на рисунку 5.14. Кожен етап був проведений із 10 разовою повторністю на насінневих сумішах, які мають різний фракційний склад гібриду Пріоритет селекції Інституту олійних культур НААН. Критерієм оцінки якості виконання процесу сепарації насінневої суміші є сумарна концентрація насіння θ і продуктивність q .

Результати експериментальної перевірки адаптивного віброрешітного сепаратора представлені в таблиці 5.2. Застосування розробленого алгоритму при дворазовій сепарації насінневої суміші на адаптивному віброрешітному сепараторі дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневої суміші соняшнику за геометричними розмірами із продуктивністю $q = 189 \pm 13$ кг/год і сумарною концентрацією насіння $\theta = 3,4 \pm 1,3$ %.



Рисунок 5.20 – Загальний вигляд експериментального адаптивного віброрешітного сепаратора

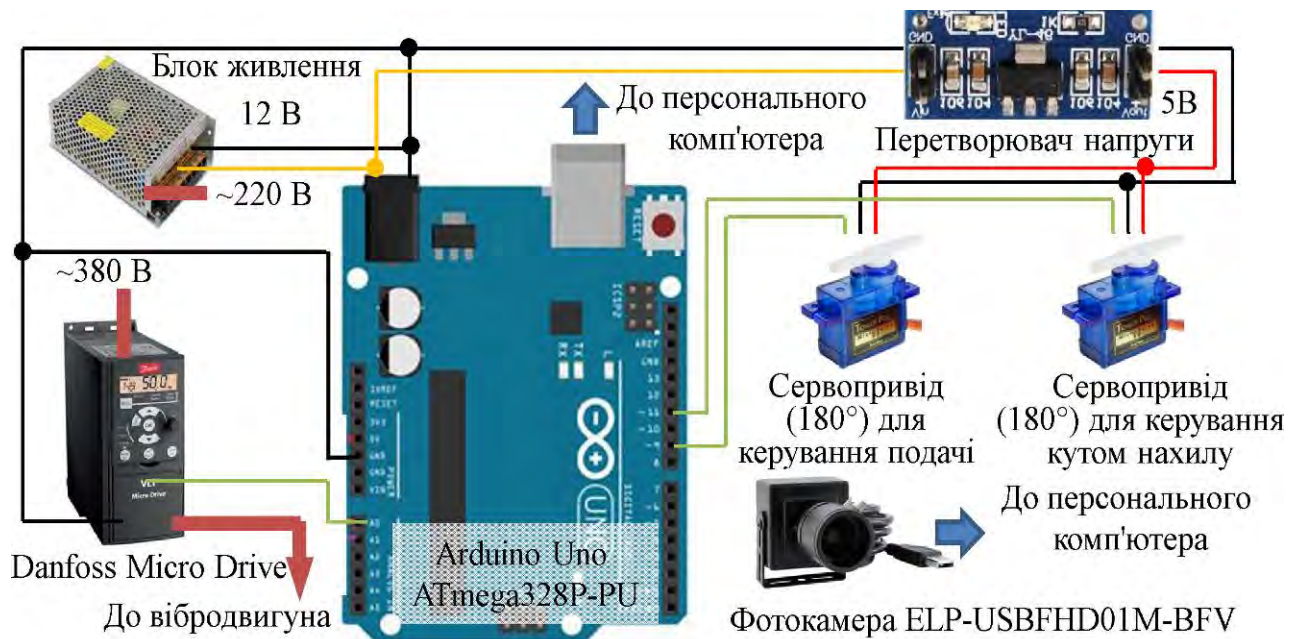


Рисунок 5.21 – Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного віброрешітного сепаратора

Таблиця 5.2 – Результати експериментальної перевірки адаптивного віброрешітного сепаратора

№ повторності	Перший етап сепарації				Другий етап сепарації			
	Раціональні параметри		Розроблений алгоритм		Раціональні параметри		Розроблений алгоритм	
	q, кг/год	θ , %	q, кг/год	θ , %	q, кг/год	θ , %	q, кг/год	θ , %
1	330	9,1	375	7,3	178	8,0	180	2,9
2	340	9,5	375	7,3	177	7,9	184	2,9
3	348	9,9	364	6,7	183	7,2	185	2,3
4	332	9,1	368	6,9	182	7,5	180	2,5
5	391	12,0	422	9,5	156	10,1	209	5,1
6	378	11,4	427	9,8	152	10,3	200	5,4
7	326	8,8	375	7,3	178	8,0	178	2,9
8	331	9,1	372	7,1	180	7,7	180	2,7
9	395	12,2	416	9,3	159	9,9	211	4,9
10	334	9,2	360	6,5	187	7,0	180	2,1
Середнє	351	10,0	385	7,8	173	8,4	189	3,4
Середнє квадратичне відхилення	27	1,3	26	1,3	13	1,3	13	1,3

5.3 Адаптивний вібропневматичний сепаратор насіння соняшнику

5.3.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Адаптивний вібропневматичний сепаратор (рисунок 5.22) містить раму 1, на якій закріплено деку 2 за допомогою пружин 3 і регулювальних гвинтів 4 та 5, що забезпечують її подовжній і поперечний нахили. До регулювальних гвинтів 4 і 5 закріплені вали роторів крокових електродвигунів 6 і 7 відповідно. Дека 2 оснащена повітропроникною робочою поверхнею 8. На рамі 1 закріплені вивантажувальні вікна 9. Під повітропроникною робочою поверхнею 8 на рамі 1 встановлено вентилятор 10 із електродвигуном 11. Дека 2 шарнірно приєднана до кривошипно-шатунного механізму 12, який встановлений на рамі 1 і приводиться в дію за допомогою електродвигуна 13. Над декою 2 в кутку закріплено на рамі 1 блок подачі насіння 14, який складається із горловини 15 і заслінки 16. До заслінки 16 приєднано вал ротора крокового електродвигуна 17. Електродвигуни 11 і 13 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені пунктирною лінією) приєднані до блоків керування електродвигунами 18 і 19 відповідно. Крокові електродвигуни 6, 7 і 17 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені пунктирною лінією) приєднані до блока керування кроковими електродвигунами 20. До кожного вивантажувального вікна 9 приєднано блок вимірювання об'ємної маси 21 за допомогою тензометричних датчиків розтягування 22. Блок вимірювання об'ємної маси 21 (рисунок 5.23) складається з полого циліндру 23, до нижньої частини якого приєднано заслінку 24, яка вільно рухається по кронштейну 25. До заслінки 24 по центру приєднано шток штовхаючого електромагніту (соленоїда) 26, з по краям дві пружини розтягування 27. Корпус штовхаючого електромагніту (соленоїда) 26 жорстко закріплено на кронштейні 25. На верхній частині полого циліндру 23 закріплено інфрачервоний діод 28, а з протилежного боку інфрачервоний фотоприймач 29. Тензометричні датчики розтягування 22, штовхаючий електромагніт (соленоїд) 26, інфрачервоний діод 28 і інфрачервоний

фотоприймач 29 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені пунктирною лінією) приєднані до блока керування вимірюваннями 30. Блоки керування вимірюваннями 30 кожного блока вимірювання об'ємної маси 21 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені пунктирною лінією) приєднані до загального блока вимірювання 31. Блоки керування електродвигунами 18, 19, блок керування кроковими електродвигунами 20, загальний блок вимірювання 31 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені пунктирною лінією) приєднані до персонального комп'ютера 32, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення.

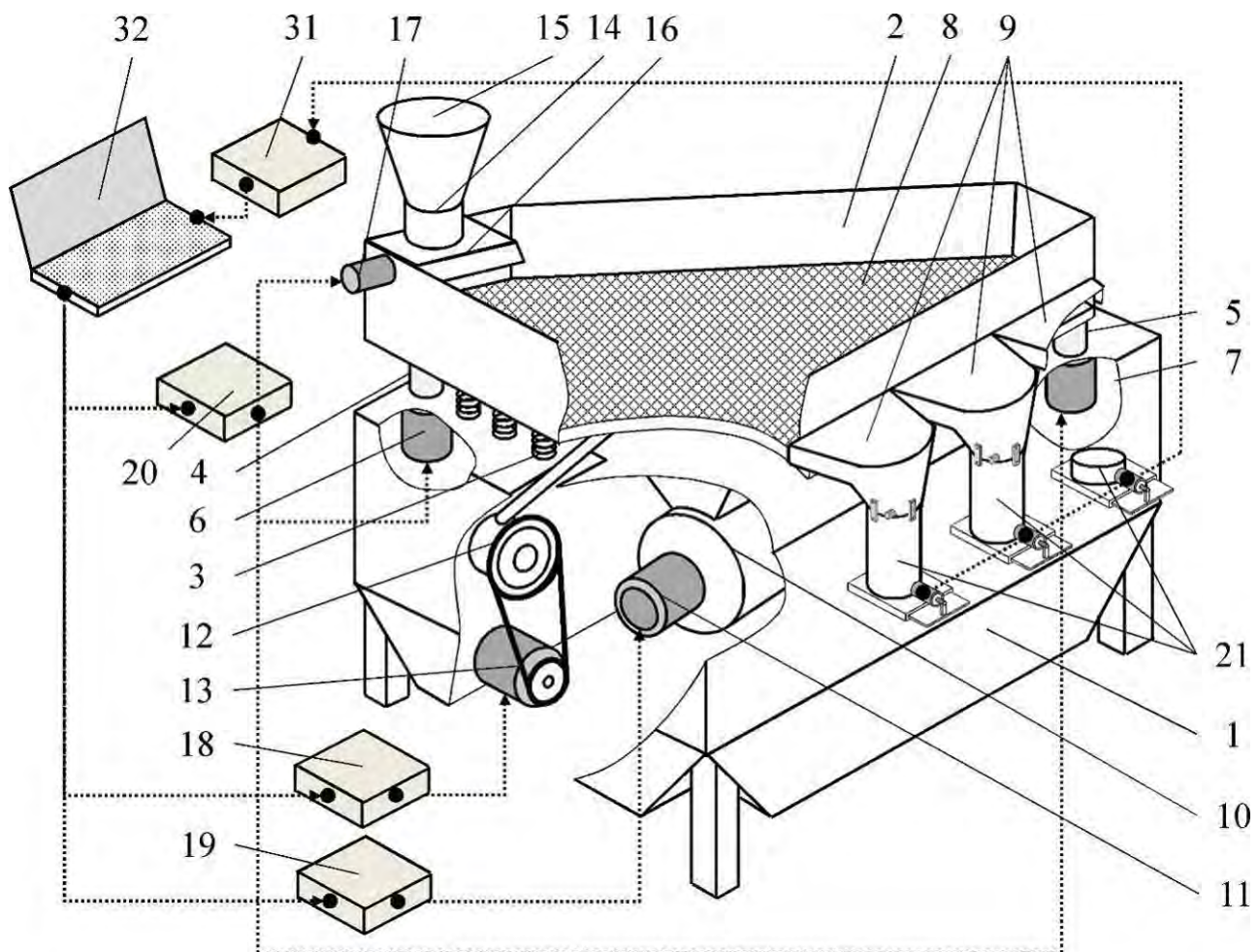


Рисунок 5.22 – Конструктивно-технологічна схема адаптивного вібропневматичного сепаратора

Процес сепарації на адаптивному вібропневматичному сепараторі відбувається в такий спосіб. Вихідний зерновий або насінний матеріал надходить у горловину 15 блока подачі насіння 14. Значення подачі (q , кг/год) зернового або насінневого матеріалу встановлюється в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 32, алгоритм якого представлено на рисунку 5.24. Цифровий сигнал з персонального комп'ютера 32 за допомогою електричних проводів надходить до блока керування кроковими електродвигунів 20, перетворюється і подається до крокового електродвигуна 17, який встановлює заслінку 16 у певне положення. Окрім цього в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 32 встановлюються значення найменшої (ρ_{\min} , кг/м³) і найбільшої (ρ_{\max} , кг/м³) необхідної об'ємної маси зернового або насінного матеріалу, які необхідно отримати на виході з адаптивного вібропневматичного сепаратора.

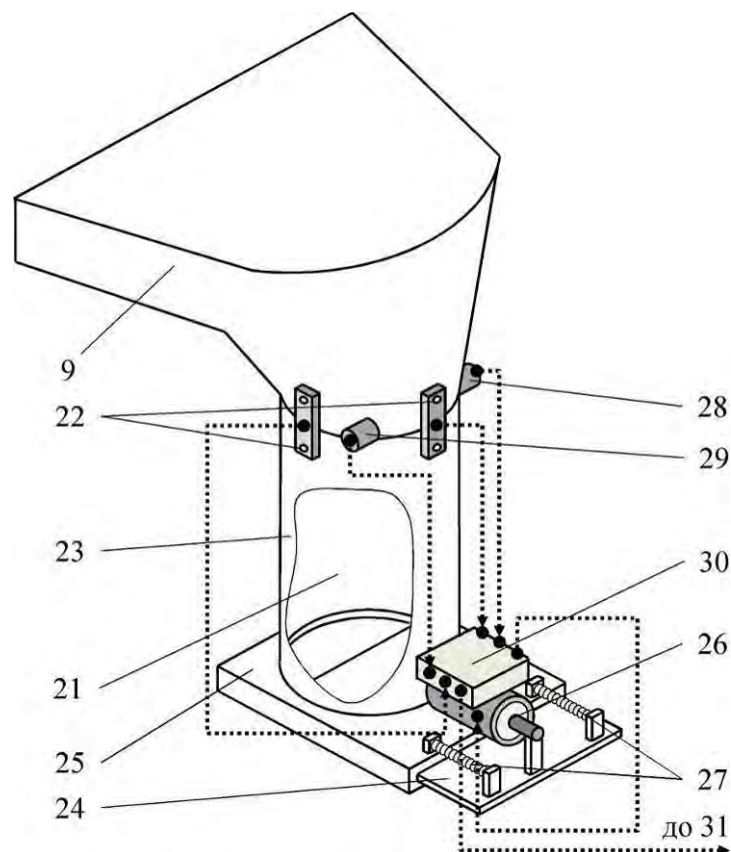


Рисунок 5.23 – Конструктивно-технологічна схема блока вимірювання об'ємної маси насінневого матеріалу

Далі в програмному забезпеченні персонального комп'ютера 32 відбувається запуск процесу сепарації ($start = 1$) і вихідний зерновий або насінний матеріал поступає на повітропроникну робочу поверхню 8 деки 2. При цьому в початковий момент часу регулювальні гвинти 4 і 5 встановлені таким чином, що забезпечують максимальний подовжній і поперечний нахили деки 2 ($\beta = \beta_{max}$ і $\alpha = \alpha_{max}$, відповідно). Також в початковий момент часу частоти обертання роторів електродвигунів 11 і 13 дорівнюють максимальному значенню, відповідно до цього частота вібрації деки 2 і швидкість потоку повітря з вентилятора 10 є найбільшими ($\psi = \psi_{max}$ і $V = V_{max}$, відповідно).

Зміна частоти вібрації деки 2 (ψ) відбувається наступним чином. За необхідністю програмне забезпечення персонального комп'ютера 32 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування електродвигуном 18. У разі використання в якості електродвигуна 13 асинхронного електродвигуна блок керування електродвигуном 18 змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. В іншому випадку, у разі використання в якості електродвигуна 13 електродвигуна постійного струму блок керування електродвигуном 18 змінює напругу електромережі в діапазоні від 0 В до номінального значення, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. Обертання ротора електродвигуна 18 призводить в дію кривошипно-шатунний механізм 12, що в свою чергу забезпечує коливання деки 2. Частота вібрації деки 2 прямо пропорційна частоті обертання ротора електродвигуна 13.

Зміна швидкості потоку повітря (V) з вентилятора 10 відбувається наступним чином. За необхідністю програмне забезпечення персонального комп'ютера 32 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування електродвигуном 19. У разі використання в якості електродвигуна 11 асинхронного електродвигуна блок керування електродвигуном 19 змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. В іншому випадку, у

разі використання в якості електродвигуна 11 електродвигуна постійного струму блок керування електродвигуном 19 змінює напругу електромережі в діапазоні від 0 В до номінального значення, що забезпечує зміну частоти обертання його ротора. Обертання ротора електродвигуна 19 забезпечує обертання лопатей вентилятора 10 і створення необхідно повітряного потоку, який проходить крізь повітропроникну робочу поверхню 8 деки 2. Швидкість повітряного потоку прямо пропорційна частоті обертання ротора електродвигуна 11.

Зміна подовжнього і поперечного кута нахилу деки 2 (β і α , відповідно) здійснюється наступним чином. Персональний комп'ютер 32 за допомогою електричних проводів передає цифровий сигнал до блока керування кроковими електродвигунами 20, який в свою чергу передає сигнал за допомогою електричних проводів до крокових електродвигунів 6 і 7. Крокові електродвигуни 6 і 7 приводяться в дію і обертають регулювальні гвинти 4 і 5 відповідно, змінюючи при цьому подовжній і поперечний нахили деки 2 відносно абсолютно горизонтального положення.

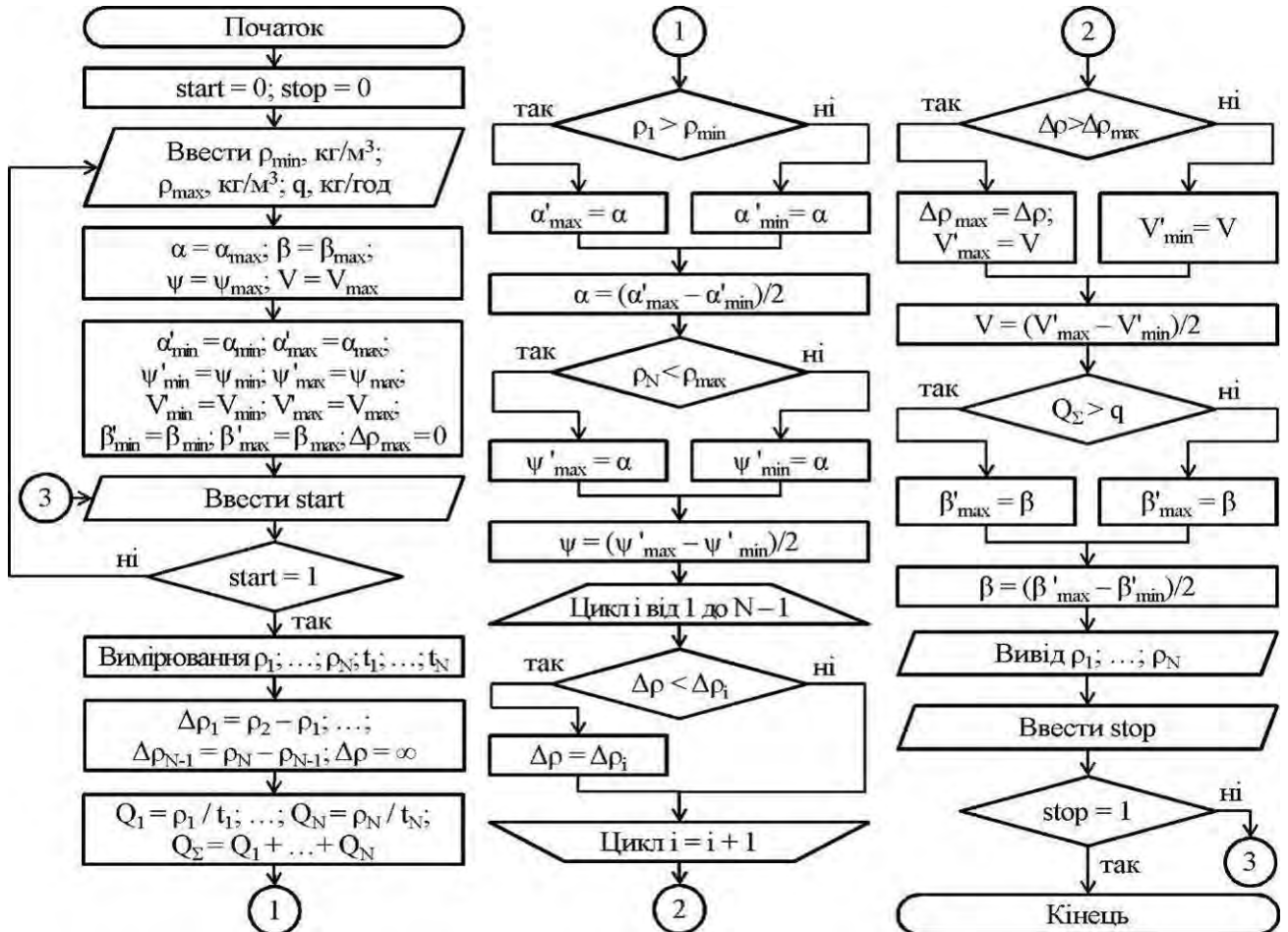
Зерновий або насінневий матеріал потрапляє на повітропроникну робочу поверхню 8, де він піддається вібрації за рахунок коливання кривошипно-шатунного механізму 12 і продувається повітряним потоком, що виникає внаслідок обертання лопатей вентилятора 10. Над повітропроникною робочою поверхнею 8 утворюються псевдорозріджені шари зернового або насінневого матеріалу, які розділяються в процесі їх руху до вивантажувальних вікон 9 за об'ємною масою. В результаті чого до кожна вивантажувального вікна 9 потрапляє фракція зернового або насінневого матеріалу із певною об'ємною масою.

З вивантажувального вікна 9 фракція зернового або насінневого матеріалу потрапляє до блока вимірювання об'ємної маси 21. Заслінка 24 блока вимірювання об'ємної маси 21 закриває полий циліндр 23 знизу, що забезпечує можливість наповнення її фракцією зернового або насінневого матеріалу. Після

того, як зерновий або насінневий матеріал досягає інфрачервоний діод 28, закриваючи потік інфрачервоного випромінювання до інфрачервоного фотоприймача 29, сигнал з інфрачервоного фотоприймача 29 потрапляє за допомогою електричних проводів до блока керування вимірюваннями 30. Блок керування вимірювання 30 фіксує значення сигналу з тензOMETричних датчиків розтягування 22, розраховує їх середнє значення і перераховує його у значення маси. За отриманим значенням маси і відомим об'ємом полого циліндру 23 розраховується об'ємна маса фракції зернового або насінневого матеріалу (ρ_1, \dots, ρ_N , де N – номер блока вимірювання об'ємної маси 21), як їх відношення. Також блок керування вимірювання 30 фіксує значення часу (t_1, \dots, t_N , де N – номер блока вимірювання об'ємної маси 21), за який відбулося наповнення полого циліндру 23. Після чого блок керування вимірювання 30 подає сигнал за допомогою електричних проводів до штовхаючого електромагніту (соленоїда) 26, що приводить в дію шток під впливом електромагнітного поля, який відкриває заслінку 24, і фракція зернового або насінневого матеріалу залишає полий циліндр 23. Далі дія сигналу припиняється і шток штовхаючого електромагніту (соленоїда) 26 звільняється від діє електромагнітного поля. Пружини розтягування 27, прагнучи зайняти початкове положення, стискаються і повертають заслінку 24 у початкове положення, закриваючи полий циліндр 23 знизу. Кожен блок керування вимірюваннями 30 за допомогою електричних проводів передає отримані значення об'ємної маса фракції зернового або насінневого матеріалу (ρ_1, \dots, ρ_N) і часу наповнення полого циліндру 23 (t_1, \dots, t_N) до загального блока вимірювання 31, який в свою чергу узагальнює дані і передає до персонального комп'ютера 32.

Програмне забезпечення персонального комп'ютера 32, спираючись на введені значення подачі (q , кг/год), найменшої (ρ_{\min} , кг/м³) і найбільшої (ρ_{\max} , кг/м³) необхідної об'ємної маси зернового або насінного матеріалу і отримані значення об'ємної маса фракцій зернового або насінневого матеріалу (ρ_1, \dots, ρ_N) і часу наповнення полого циліндру 23 (t_1, \dots, t_N), виконує

запропонований алгоритм (рисунк 5.24) і змінює подовжній і поперечний кути нахилу деки 2 (β і α відповідно), частоту її вібрація (ψ) і швидкість потоку повітря з вентилятора 10 (V).



start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму; q – подача зернового або насінного матеріалу, кг/год; ρ – об’ємна маса зернового або насінного матеріалу, кг/м³; β і α – подовжній і поперечний кути нахилу деки, °; ψ – частота вібрація деки, Гц; V – швидкість потоку повітря з вентилятора, м/с; t – час наповнення полого циліндру, с; N – кількість блоків вимірювання об’ємної ваги; «'» – позначає тимчасові змінні; «min» – позначає мінімальне значення змінної; «max» – позначає максимальне значення змінної

Рисунк 5.24 – Алгоритм програмного забезпечення

Використання адаптивного вібропневматичного сепаратора, в якому за рахунок встановлених блоків вимірювання об’ємної маси насіння, які приєднано до кожного вивантажувального вікна, блоків керування електродвигунами приводів вентилятора та кривошипно-шатунного механізму віброколювання повітропроникної деки і блоків керування кроковими

електродвигунами приводів регулювання подовжнього й поперечного нахилу деки та приводу заслінки блока подачі насіння та персонального комп'ютера із програмним забезпеченням на основі розробленого алгоритму, дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових і насінневих сумішей за щільністю або об'ємною масою із більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

5.3.2 Калібрування блока вимірювання об'ємної маси

Для реалізації розробленої конструктивно-технологічної схеми вібропневматичного сепаратора розроблено блок вимірювання об'ємної маси, загальний вигляд якого у складі експериментального стенду представлено на рисунку 5.25. В якості тензодатчика із підсилювачем використано Weight sensor NH711. Керування заслінкою і обробку інформації з тензодатчика здійснює апаратно-програмний засіб Arduino Uno ATmega328P-PU у комплексі із реле і актуатором. Електрична схема блока вимірювання об'ємної маси представлена на рисунку 5.26. Для забезпечення точності роботи блока було проведено його калібрування у відповідності із традиційним методом вимірювання об'ємної маси за допомогою пурки згідно ДСТУ 4694:2006 [437].

В результаті статичного калібрування з використанням набору лабораторних гир (відхилення від номіналу 0,1 г) встановлено рівняння перерахунку напруги у значення маси:

$$M = 416,6(U - U_0), \quad (5.10)$$

де M – маса, г;

U – вимірювана напруга, В;

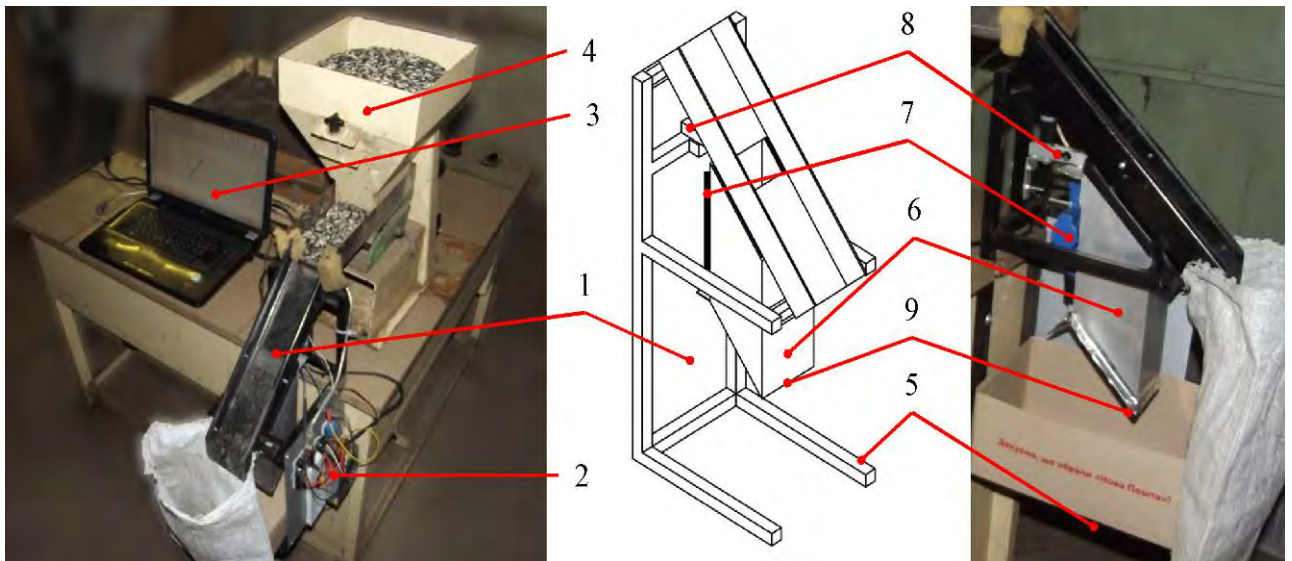
U_0 – початкова напруга, яка встановлюється без навантаження, В.

Коефіцієнт кореляції складає $R = 0,98$.

Так як об'єм ємності блока вимірювання складає $v = 1,03968$ л, то об'ємна маса розраховується за формулою

$$\rho = M/v = 400,7(U - U_0), \quad (5.11)$$

де ρ – об'ємна маса, г/л.



1 – блок вимірювання об'ємної маси; 2 – загальний блок вимірювання;
3 – персональний комп'ютер; 4 – блок подачі насінневої суміші; 5 – рама;
6 – ємність; 7 – актуатор; 8 – тензодатчик; 8 – заслінка

Рисунок 5.25 – Загальний вигляд блока вимірювання об'ємної маси



Рисунок 5.26 – Електрична схема керування блока вимірювання об'ємної маси

Динамічне калібрування було проведено на експериментальному стенді при подачі насінневої суміші соняшнику різних сортотипів і різних фракцій. При цьому дослідження проводили для різних значень подач насінневої суміші соняшнику, які встановлювалися положенням заслінки і часотою коливань лотка блока подачі насінневої суміші. Графічна інтерпретація отриманих результатів представлена на рисунку 5.27. Як видно з рисунку спочатку спостерігається ріст об'ємної маси, що є логічним для процесу заповнення ємності блока вимірювання. Далі відбувається стабілізація значення об'ємної маси, що підтверджує факт повного заповнення ємності блока вимірювання. Час стабілізації значення, середнє значення остаточної об'ємної маси і її середньоквадратичне відхилення представлено в таблиці 5.3.

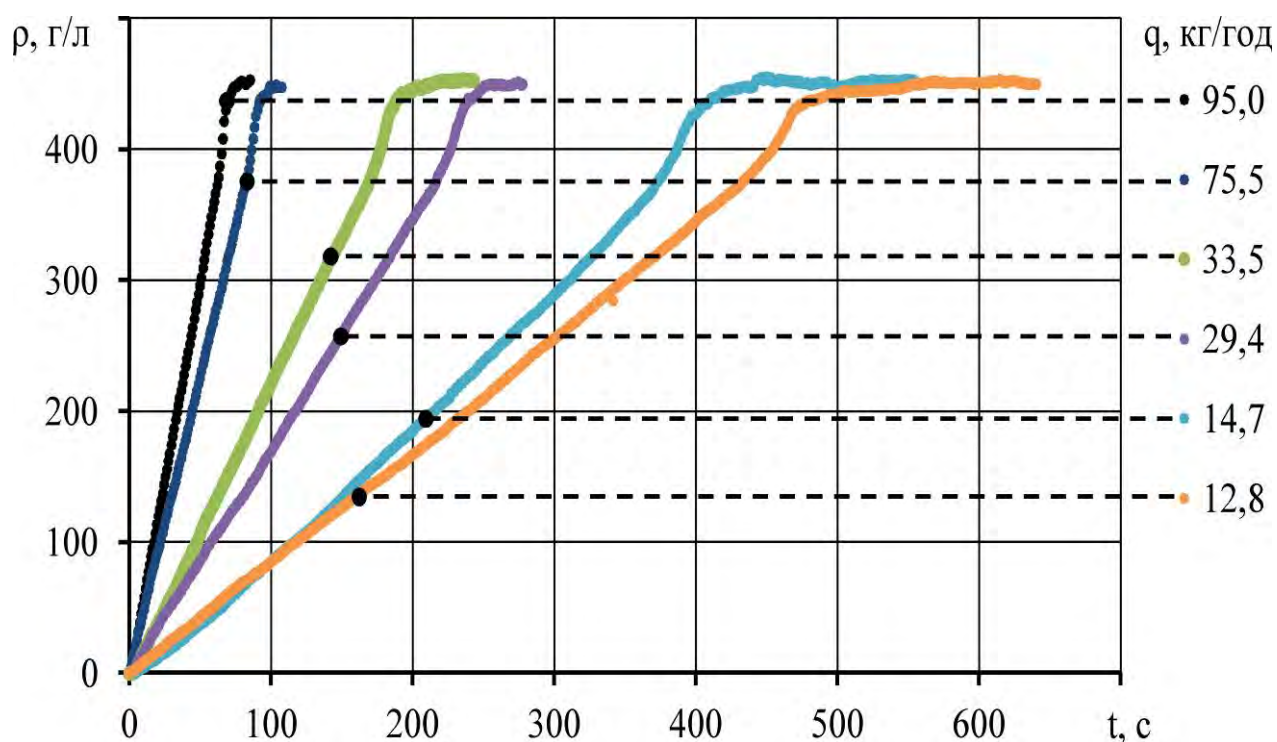


Рисунок 5.27 – Динамічна залежність вимірної об'ємної маси для різних значень подач насінневої суміші соняшнику

В результаті порівняння отриманих значень із традиційним методом вимірювання об'ємної маси за розрахованим критерієм Пірсона (χ^2) нормальність розподілу похибок вимірювань складає 2,13, більше за табличне

значення $\chi^2(0,95;5) = 1,15$. Поведена перевірка гіпотези про однорідність значень за допомогою критерію Кохрена $G = 0,39 < G_{0,05}(1;20) = 0,48$.

Таблиця 5.3 – Результати динамічного калібрування блока вимірювання об'ємної маси

Подача, кг/год	14,7	12,8	29,4	33,5	75,5	95,0
Час стабілізації значення, с	440,6	556,1	259,3	215,7	99,2	73,9
Середнє значення об'ємної маси, г/л	453	450	450	453	448	451
Відхилення об'ємної маси, г/л	0,13	0,20	0,83	0,32	0,86	1,27

5.3.3 Експериментальна перевірка зразка обладнання

Для експериментальної перевірки конструктивно-технологічної схеми адаптивного вібропневматичного сепаратора на пневмовібростолі типу ПВС змонтовано 3 блока вимірювання об'ємної маси. Загальний вигляд представлено на рисунку 5.28. Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного вібропневматичного сепаратора представлена на рисунку 5.29.

Експериментальна перевірка включала два етапи. Перший був реалізований при раціональних параметрах вібропневматичного сепаратора відповідно до (4.45). Другий із застосування автоматизованої системи керування режимними параметрами вібропневматичного сепаратора відповідно до алгоритму, який представлений на рисунку 5.24. Кожен етап був проведений із 10 разовою повторністю на насінневих сумішах, які мають різний компонентний склад (виповнені; неповністю виповнені, пусті і органічні (рослинні) домішки; голе ядро і уражене грибковими хворобами) гібриду Пріоритет селекції Інституту олійних культур НААН. Критерієм оцінки якості виконання процесу сепарації насінневої суміші є коефіцієнт розподілу δ і продуктивність q .



Рисунок 5.28 – Загальний вигляд експериментального адаптивного вібропневматичного сепаратора

Результати експериментальної перевірки адаптивного вібропневматичного сепаратора представлені в таблиці 5.4.

Застосування розробленого алгоритму при дворазовій сепарації насінневої суміші на адаптивному вібропневматичному сепараторі дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневої суміші соняшнику за об'ємною масою із продуктивністю $q = 131 \pm 6$ кг/год і коефіцієнтом розподілу $\delta = 95,5 \pm 1,5$ %.

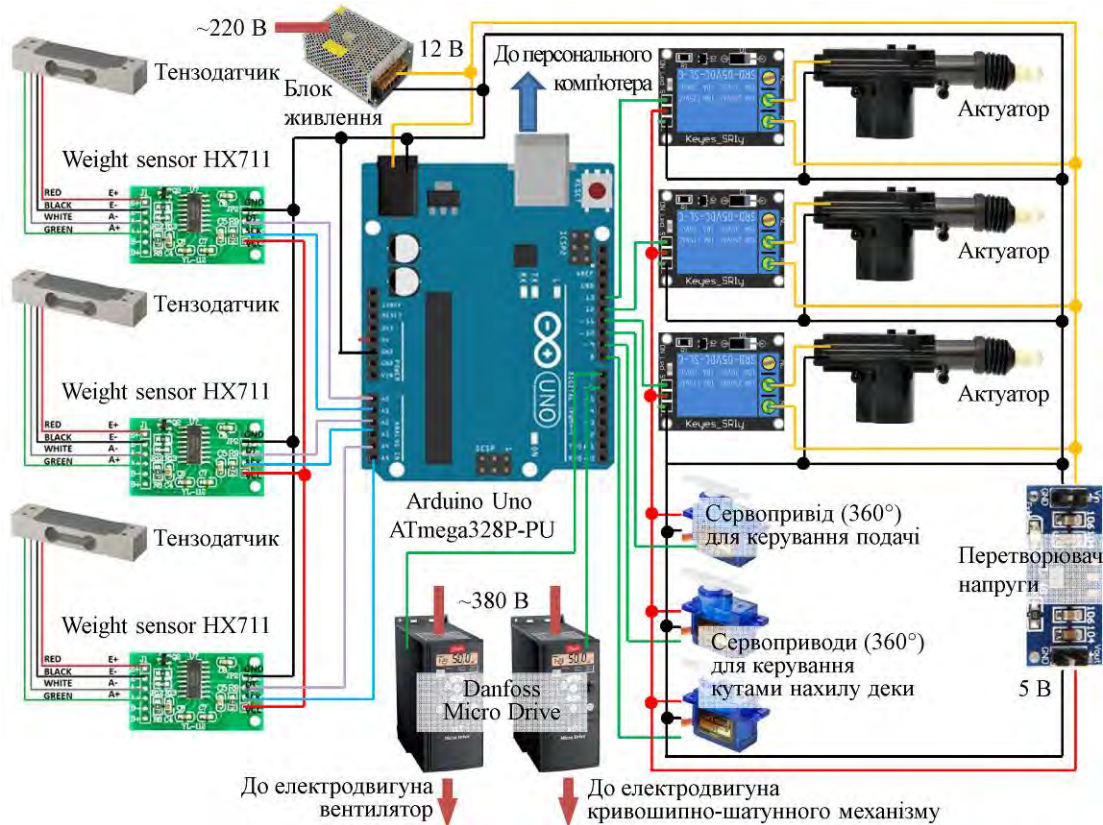


Рисунок 5.29 – Електрична схема з'єднання елементів експериментального зразка адаптивного вібропневматичного сепаратора

Таблиця 5.4 – Результати експериментальної перевірки адаптивного вібропневматичного сепаратора

№ повторності	Перший етап сепарації				Другий етап сепарації			
	Раціональні параметри		Розроблений алгоритм		Раціональні параметри		Розроблений алгоритм	
	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %	q, кг/год	δ , %
1	334	80,2	320	85,7	144	83,5	139	95,5
2	344	80,4	330	86,2	148	82,8	131	97,4
3	364	82,6	346	88,6	158	84,0	137	93,0
4	377	84,2	358	90,9	164	83,5	137	96,9
5	364	82,6	346	88,6	158	82,0	132	95,0
6	346	80,9	335	86,3	149	83,2	127	95,2
7	341	79,9	326	85,1	147	82,4	128	94,8
8	354	81,5	338	87,4	153	82,9	133	95,7
9	372	83,2	349	90,7	162	83,7	118	97,7
10	367	83,1	350	88,7	159	84,4	132	93,6
Середнє	356	81,9	340	87,8	154	83,2	131	95,5
Середнє квадратичне відхилення	15	1,5	12	2,0	7	2,0	6	1,5

5.4 Фотоелектронний сепаратор насіння соняшнику

5.4.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Фотоелектронний сепаратор (рисунок 5.30) містить раму 1, на якій жорстко закріплено блок подачі матеріалу 2. Блок подачі матеріалу 2 містить бункер 3, в якому над вихідним отвором розміщено заслінку 4. До заслінки 4 прикріплено кривошипно-шатуний механізм 5, який приєднано до валу крокового електродвигуна 6. До складу блока подачі матеріалу 2 входять барабан із радіальними лопатями 7, який приєднано до валу асинхронного електродвигуна 8, і вібралоток 9 із закріпленим на ньому вібродвигуном 10. Вібралоток 9 виконаний у вигляді набору жолобів. Вібралоток 9 закріплений жорсткими пружинами 11 до рами 1. На раму 1 після блока подачі матеріалу 2 встановлено блок реєстрації насіння 12 (рисунок 5.31), що містить патрубки 13 із отворами, до яких закріплено освітлювач 14, реєструючі і контролюючі фотоприймачі 15 і 16 відповідно. На рамі 1 після блока реєстрації насіння 12 встановлено блок виходу насіння 17 (рисунок 5.31), який містить газові форсунки 18, що приєднані за допомогою трубопроводів (на схемі відмічені жирною лінією) до повітряного ресивера 19, який підключено до компресора 20. До складу блока виходу насіння 17 входять забірники ліквідних і неліквідних насінин 21 і 22 відповідно. Кроковий електродвигун 6 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднаний до блока керування кроковим електродвигуном 23. Асинхронний електродвигун 8 і вібродвигун 10 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до частотного перетворювача 24. Газові форсунки 18 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока реле 25. Реєструючі і контролюючі фотоприймачі 15 і 16 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до блока обробки інформації 26. Блок обробки інформації 26 і блок реле 25

з'єднані між собою електричними проводами (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією). Блок керування кроковим електродвигуном 23, частотний перетворювач 24 і блок обробки інформації 26 за допомогою електричних проводів (на схемі відмічені штрих-пунктирною лінією) приєднані до загального блока керування 27, на якому встановлено відповідне програмне забезпечення на основі розробленого алгоритму (рисунок 5.32).

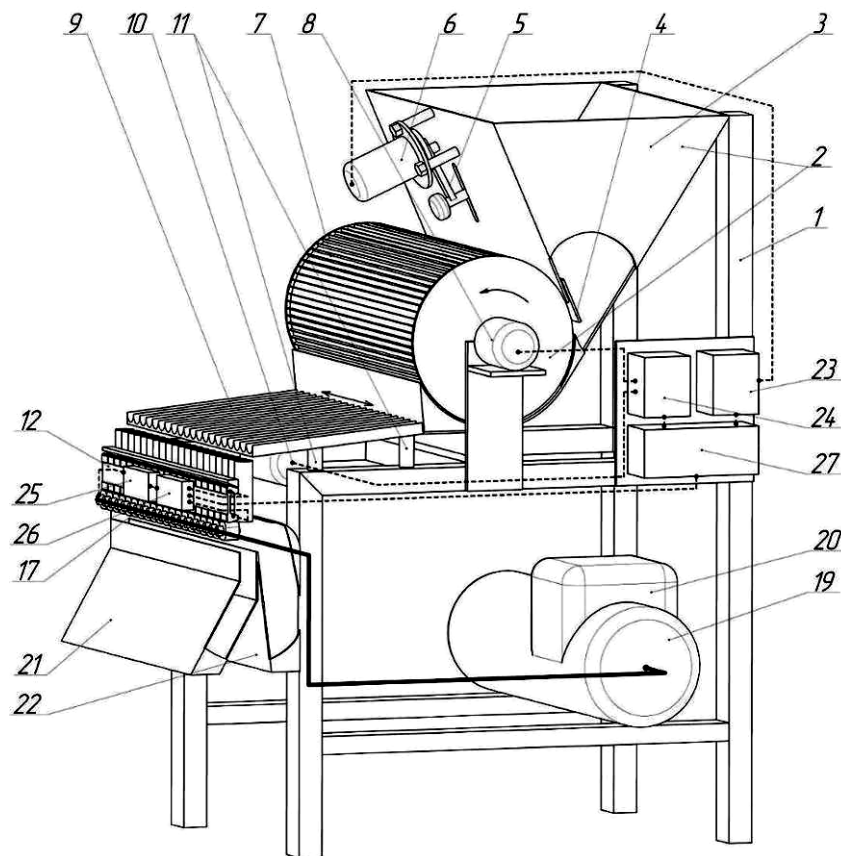


Рисунок 5.30 – Конструктивно-технологічна схема фотоелектронного сепаратора

Процес сепарації на фотоелектронному сепараторі відбувається в такий спосіб. Вихідний зерновий або насінневий матеріал надходить у бункер 3 блока подачі матеріалу 2. Значення необхідного забарвлення насіння, яке потрібно виділити з зернового або насінневого матеріалу, в кольоровому просторі HSV (H_{\min} , S_{\min} , V_{\min} , H_{\max} , S_{\max} , V_{\max}) встановлюється оператором в загальному блоці керування 27, алгоритм якого представлено на рисунку 5.32. Сформований

цифровий сигнал з загального блока керування 27 за допомогою електричних проводів надходить до блока обробки інформації 26. Освітлювач 14 постійно ввімкнений.

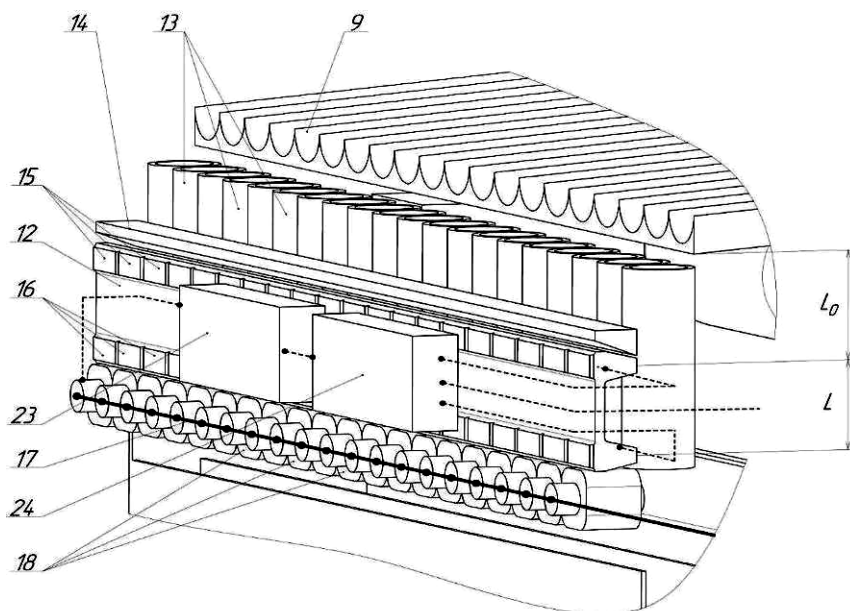
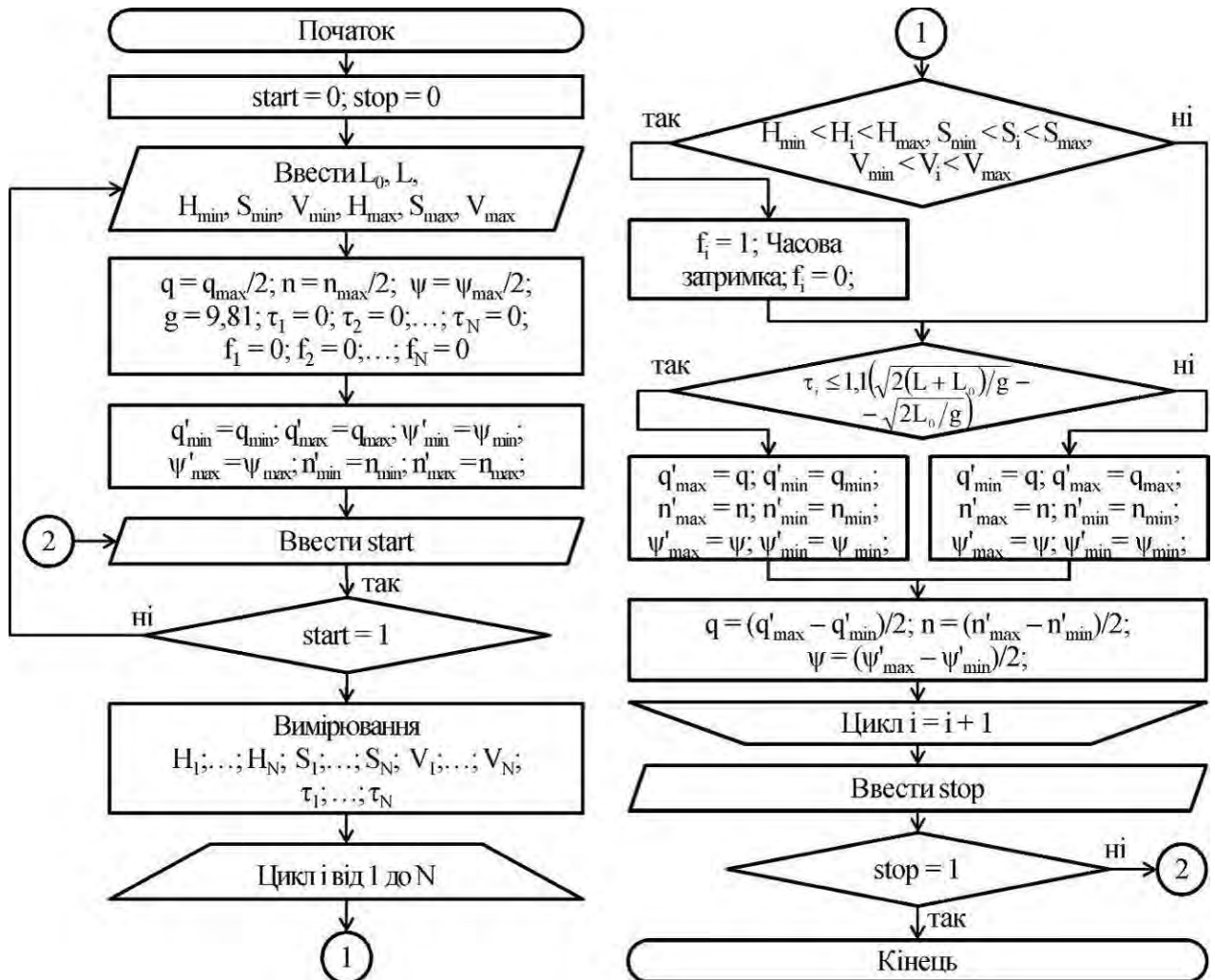


Рисунок 5.31 – Конструктивно-технологічна схема блока реєстрації насіння та блока виходу насіння

Далі в програмному забезпеченні загального блока керування 27 відбувається запуск процесу сепарації ($start = 1$). В початковий момент часу подача зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год), частота обертання барабана із радіальними лопатями 7 (n , об/хв.) і частота коливань вібралотка 9 (ψ , s^{-1}) складають половину від максимально можливих – $q_{max}/2$, $n_{max}/2$, $\psi_{max}/2$ відповідно.

Зміна подачі зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення загального блока керування 27 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до блока керування кроковим електродвигуном 23, де він перетворюється і подається до крокового електродвигуна 6, який приводить в дію кривошипно-

шатуний механізм 5, що встановлює заслінку 4 у певне відкаліброване положення.



start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму; H, S, V – числові значення забарвлення насіння в кольоровому просторі HSV; q – подача зернового або насіннєвого матеріалу, кг/год; n – частота обертання барабана із радіальними лопатями 7, об/хв; ψ – частота коливань вібротка 9, с^{-1} ; L_0 – вертикальна відстань між кінцем вібротка 9 і реєструючим фотоприймачем 15, м (рисунок 5.31); L – вертикальна відстань між реєструючим і контролюючим фотоприймачами 15 і 16 відповідно, м (рисунок 5.31); g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; i – порядковий номер патрубків 13 і відповідних реєструючих і контролюючих фотоприймачів 15 і 16; N – загальна кількість патрубків 13; τ – час між реєстраціями насіння, с; f – стан газової форсунки 18 (1 – відкрита, 0 – закрыта); «'» – позначає тимчасові змінні; «min» – позначає мінімальне значення змінної; «max» – позначає максимальне значення змінної

Рисунок 5.32 – Алгоритм програмного забезпечення

Зміна частоти обертання барабана із радіальними лопатями 7 (n, об/хв.) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення

загального блока керування 27 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до частотного перетворювача 24. Далі частотний перетворювач 24 змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна 8. Обертання ротора асинхронного електродвигуна 8 призводить до обертання барабана із радіальними лопатями 7.

Зміна частоти коливань вібрототка 9 (ψ , с^{-1}) відбувається наступним чином. У разі потреби програмне забезпечення загального блока керування 27 передає цифровий сигнал за допомогою електричних проводів до частотного перетворювача 24. Далі частотний перетворювач 24 змінює частоту електромережі в діапазоні від 0 Гц до 50 Гц, що забезпечує зміну частоти обертання ротора вібрототка 10, який викликає вібрацію вібрототока 9. Частота вібрації вібрототока 9 прямо пропорційна частоті обертання ротора вібрототка 10.

Зерновий або насінневий матеріал з бункера 3 через заслінку 4 потрапляє на барабан із радіальними лопатями 7, який обертається проти годинникової стрілки. Далі зерновий або насінневий матеріал потрапляє на вібрототок 9, де через горизонтальні вібрації він рівномірно розподіляється по жолобам. В кінці вібрототка 9 зерновий або насінневий матеріал починає вільне падіння з жолобів до патрубків 13 блока реєстрації насіння 12. Через отвори в патрубках 13 освітлювач 14 просвічує зерновий або насінневий матеріал. Відбите світло від зернового або насінневого матеріалу формує його забарвлення і фіксується в реєструючому фотоприймачі 15 і через певний час в контролюючому фотоприймачі 16. Далі цифровий сигнал з реєструючого і контролюючого фотоприймачів 15 і 16 відповідно передається до блока обробки інформації 26, де він обробляється. В блоці обробки інформації 26 визначається забарвлення насіння в кольоровому просторі HSV і порівнюється з заданими оператором даними. У разі виконання умови

$$H_{\min} < H < H_{\max}, S_{\min} < S < S_{\max}, V_{\min} < V < V_{\max}, \quad (5.12)$$

у певному патрубку 13, блок обробки інформації 26 передає цифровий сигнал до блока реле 25, що в свою чергу включає відповідну газову форсунку 18. Стисле повітря з повітряного ресивера 19 по трубопроводу проходить крізь відкриту газову форсунку 18 і відштовхує ліквідну насінину до забірника ліквідних насінин 21. Насінини, забарвлення яких не відповідає умові (1) рухаються вниз і потрапляють до забірника неліквідних насінин 22.

У разі падіння тиску стислого повітря у повітряному ресивері 19 автоматично вмикається компресор 20.

В блоці обробки інформації 26 визначається час між реєстраціями насіння у реєструючому і контролюючому фотоприймачі 15 і 16 відповідно та передається його значення до загального блока керування 27. Умовою для часу між реєстраціями насіння є

$$\tau \leq 1,1 \cdot \left(\sqrt{\frac{2(L + L_0)}{g}} - \sqrt{\frac{2L_0}{g}} \right), \quad (5.13)$$

де τ – час між реєстраціями насіння, с; L_0 – вертикальна відстань між кінцем вібрлотка 9 і реєструючим фотоприймачем 15, м (рисунок 5.31); L – вертикальна відстань між реєструючим і контролюючим фотоприймачами 15 і 16 відповідно, м (рисунок 5.31); g – прискорення вільного падіння, м/с².

Якщо час між реєстраціями насіння не відповідає умові (2), то загальний блок керування 27 передає цифровий сигнал до частотного перетворювача 24 і блока керування кроковим електродвигуном 23, які в свою чергу змінюють подачу зернового або насінневого матеріалу (q , кг/год), частоту обертання барабана із радіальними лопатями 7 (n , об/хв.) і частоту коливань вібрлотка 9 (ψ , с⁻¹) згідно з алгоритмом, який представлено на рисунку 5.32.

Використання фотоелектронного сепаратора із можливостями керування режимними параметрами блока подачі зернового або насінневого матеріалу дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових або насінневих сумішей за забарвленням поверхні сім'янок із більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

5.4.2 Експериментальна перевірка зразка обладнання

На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.199), (2.201), (4.58), (4.62), (4.64) розроблено фотоелектронний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , частота коливань вібролотка ψ , частота обертання барабана n , часова затримка спрацьовування форсунки Δt , чутливість фотодатчика λ) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.32).

Експериментальна перевірка фотоелектронного сепаратора із автоматизованою системою керування режимними параметрами блока подачі насіннєвого матеріалу була проведена на експериментальному стенді, загальний вид якого представлено на рисунку 5.33.



Рисунок 5.33 – Загальний вигляд експериментального стенду фотоелектронного сепаратора із автоматизованою системою керування режимних параметрів блока подачі насіннєвого матеріалу

Експериментальна перевірка включала два етапи. Перший був реалізований при раціональних параметрах фотоелектронного сепаратора відповідно до (4.69). Другий із застосування автоматизованої системи керування режимними параметрами блока подачі насінневого матеріалу відповідно до алгоритму, який представлений на рисунку 5.32.

Кожен етап був проведений із 10 разовою повторністю на насінневих сумішах, які мають різні співвідношення насінини сортів соняшнику селекції Інституту олійних культур НААН із чорним (Сл2613, 14RNA274, ВК419-2, InK225) і наявним білим (InK404, I2K2218, ВІР130, КГ9) забарвленнями (рисунок 5.34).



Рисунок 5.34 – Загальний вигляд вхідної насінневої суміші

Критерієм оцінки якості виконання процесу сепарації насінневої суміші є сумарна концентрацію насіння θ , % і продуктивність q , кг/год. Результати експериментальної перевірки фотоелектронного сепаратора представлені в таблиці 5.5.

Застосування розробленого алгоритму при дворазовій сепарації насінневої суміші на фотоелектронному сепараторі дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за забарвленням поверхні сім'янок із продуктивністю $q = 38 \pm 3$ кг/год і сумарною концентрацією насіння $\theta = 1,2 \pm 0,1$ %.

Таблиця 5.5 – Результати експериментальної перевірки фотоелектронного сепаратора

№ повторності	Перший етап сепарації				Другий етап сепарації			
	Раціональні параметри		Розроблений алгоритм		Раціональні параметри		Розроблений алгоритм	
	q, кг/год	θ, %	q, кг/год	θ, %	q, кг/год	θ, %	q, кг/год	θ, %
1	102	11,2	105	8,1	33	2,7	36	1,3
2	95	12,1	113	7,5	32	2,2	41	1,2
3	97	9,2	131	7,7	32	1,9	38	1,2
4	92	10,2	98	7,9	33	2,5	37	1,2
5	105	12,3	124	7,3	34	2,2	39	1,2
6	99	9,0	108	8,0	34	2,0	34	1,2
7	103	11,3	93	7,2	33	2,4	36	1,1
8	97	10,5	125	7,6	32	2,2	40	1,1
9	94	10,3	116	7,4	35	1,9	41	1,1
10	94	9,4	119	7,5	34	2,0	41	1,1
Середнє	98	10,6	113	7,6	33	2,2	38	1,2
Середнє квадратичне відхилення	4	1,2	12	0,3	1	0,3	3	0,1

5.5 Пристрій для автоматичного фенотипування насіння соняшнику

5.5.1 Спосіб автоматичного фенотипування насіння

Спосіб автоматичного фенотипування насіння (рисунок 5.35) включає наступні етапи:

1. Партію насіння розміщують в область під фотокамерою, яка ізольована від зовнішнього освітлення.

2. Почергово на дану область електромагнітними випромінюваннями, довжина хвилі яких складає 465-470 нм (червоний спектр – R), 515-520 нм (зелений спектр – G), 620-625 нм (голубий спектр – B).

3. За допомогою фотокамери та програмного забезпечення, яке ґрунтується на бібліотеці алгоритмів комп'ютерного зору OpenCV [438], з використанням модуля HighGui отримують цифрові зображення розміщеної партії насіння в кожному з трьох опромінь.

4. З використанням модулів `cvtColor` і `inRange` бібліотеці `OpenCV` [438] отримані зображення обробляють в колірному просторі HSV (Hue – основний тон, Saturation – насиченість кольору, Value – кількість світла) і перетворюють в чорно-біле зображення.

5. З використанням модулів `getStructuringElement` і `erode` бібліотеці `OpenCV` [438] проводять морфологічні перетворення отриманих зображень, метою яких є позбавлення зображень випадкових краплень, шумів і об'єднання областей, розділених тінню.

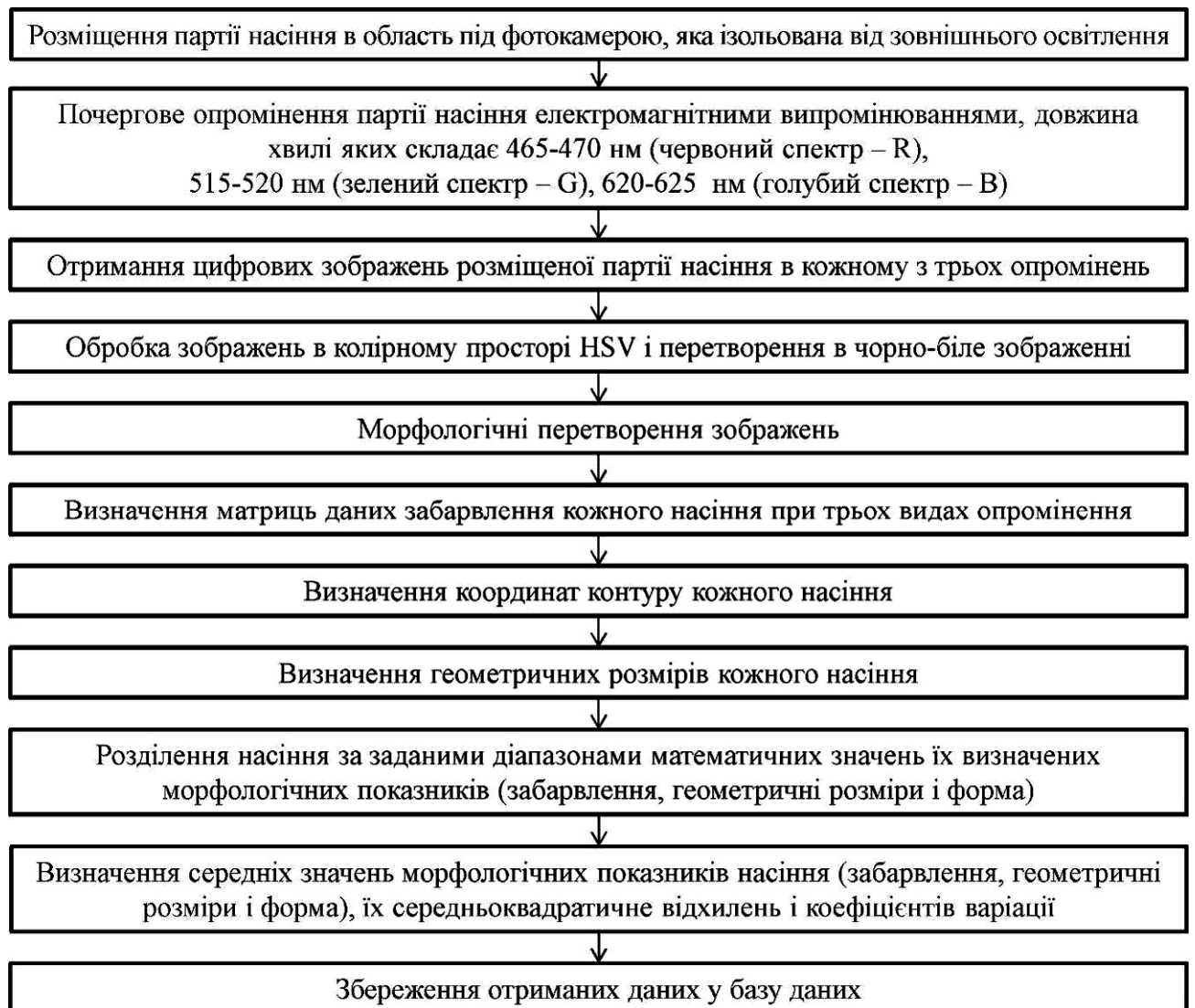


Рисунок 5.35 – Етапи способу автоматичного фенотипування насіння

6. З отриманих зображень для кожної насінини з партії визначається відповідна матриця даних їх забарвлення при трьох видах опромінення:

$$\begin{pmatrix} H_R & H_G & H_B \\ S_R & S_G & S_B \\ V_R & V_G & V_B \end{pmatrix}, \quad (5.14)$$

де H – основний тон;

S – насиченість кольору;

V – кількість світла; індекси R , G , B відповідають довжині хвилі електромагнітного випромінювання (освітлення), що діє на область під фотокамерою.

7. З отриманих зображень, перетворених у чорно-білий кольоровий простір з використанням детектора границь Кенні (модуль `cvCanny` бібліотеки `OpenCV`) і перетворення Хафа для кожного насіння визначають координати його контуру і апроксимують до математичного рівняння в Декартовій системі координат.

8. З отриманих контурів кожного насіння визначають їх геометричні розміри: довжину, як найбільшу відстань між двома протилежними точками контуру з урахування симетрії, і ширину, як найбільшу відстань між точками контуру, що перпендикулярна довжині.

9. Задаючи необхідні діапазони математичних значень визначених морфологічних показників насіння (забарвлення, геометричні розміри і форма) здійснюється їх розділення.

10. Для кожної групи розділеної партії насіння визначаються середні значення визначених морфологічних показників насіння (забарвлення, геометричні розміри і форма), їх середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації.

11. Всі отримані дані зберігають у базу даних.

5.5.2 Обґрунтування конструктивно-технологічних схем

Реалізація способу автоматичного фенотипування було реалізовано на двох пристроях: матричний і стрічковий.

Матричний пристрій для автоматичного фенотипування насіння (рисунок 5.36) містить раму 1 і розміщену на ній матрицю 2. Матриця 2 (рисунок 5.37) складається з двох однакових пластин 3 і 4, які розміщені дзеркально і повернуті одна від одної на кут 90° . Пластини 3 і 4 містять квадратні отвори, які розміщені на них по горизонталі і вертикалі (рисунок 5.37). На кожній пластині 3 і 4 у відповідності горизонтального розміщення отворів зроблені повздовжні поглиблення. Між пластинами 3 і 4 розміщено однакові полоси 5 по горизонталі і вертикалі. Кожна полоса 5 має квадратні отвори, що співпадають за розмірами і розміщенням із отворами на пластинах 3 і 4. Пластини 3 та 4 і полоси 5 утворюють на матриці 2 комірки. До кожної полоси 5 з одного краю закріплено шток тягнучого електромагніту (соленоїда) 6, а з іншого – пружину розтягування 7. Кожні тягнучий електромагніт (соленоїд) 6 і пружина розтягування 7 жорстко закріплено на рамі 1. На рамі 1 встановлено чотири направляючі 8, на яких вільно переміщується основа 9, що фіксується за допомогою фіксаторів 10. На основі 9 розміщено фотокамеру 11 і однакова кількість різнокольорових ламп 12 трьох спектрів електромагнітного випромінювання: червоний (R), зелений (G) і голубий (B). Навколо основи 9 і рами 1 розміщуються стінки 13 із світлонепроникного матеріалу. Кожний тягнучий електромагніт (соленоїд) 6 і різнокольорові лампи 12 приєднані по засобом електричних проводів до блока керування 14. Фотокамеру 11 приєднанню по засобом електричних проводів до персонального комп'ютера 15, який в свою чергу з'єднується з блоком керування 14. Внизу рами 1 встановлено піддон 16 для збору насіння.

Матричний пристрій для автоматичного фенотипування насіння працює таким чином.

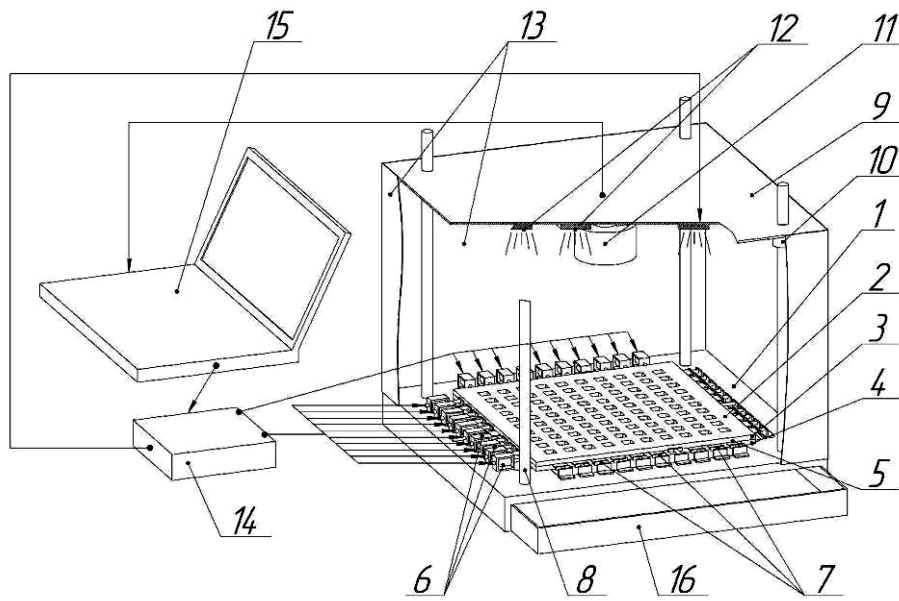


Рисунок 5.36 – Конструктивно-технологічна схема матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння

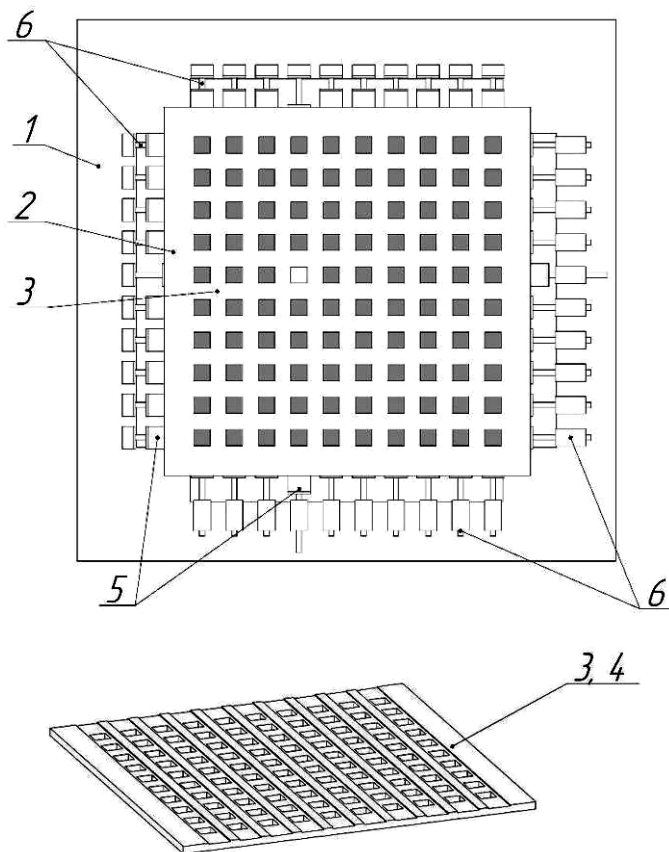


Рисунок 5.37 – Конструктивно-технологічна схема матриці

Фіксатори 10 послаблюються і основа 9 піднімається в гору по направляючим 8. При цьому з'являється вільний доступ до рами 1 із матрицею 2. Насіння, що необхідно дослідити, розміщують в комірках на матриці 2. Далі основу 9 із стінками 13 опускають вниз по направляючим 8 і фіксуються за допомогою фіксаторів 10.

Оператор запускає на персональному комп'ютері 15 відповідне програмне забезпечення на основі бібліотеки алгоритмів комп'ютерного зору OpenCV, яке виконує процес сканування насіння. При цьому персональний комп'ютер передає цифровий сигнал до блока керування 14, який по чергово вмикає різнокольорові лампи 12 у наступних спектрах електромагнітного випромінювання: червоний (R), зелений (G) і голубий (B). Після кожного вмикання різнокольорових ламп 12 фотокамера 11 фотографує матрицю 2 із розміщеним на ній насінням і передає цифрове зображення до персонального комп'ютера 15.

Персональний комп'ютер 15 визначає колір кожного насіння при кожному вмикання різнокольорових ламп 12 у червоному (R), зеленому (G) і голубому (B) спектрах у колірному просторі HSV (Hue – основний тон, Saturation – насиченість кольору, Value – кількість світла). Окрім цього персональний комп'ютер за отриманими зображеннями визначає форму і геометричні розміри кожного насіння, що досліджується. Вся визначена інформація зберігається у базу даних, відображається на дисплеї персонального комп'ютера 15 і представляється на огляд оператору.

Оператор виходячи з представлених даних встановлює потрібні йому діапазони кольору та геометричних розмірів і форми насіння і вносить їх у персональний комп'ютер 15. Далі персональний комп'ютер 15 передає цифровий сигнал до блока керування 14. Блок керування 14 починає по чергово вмикати тягнучі електромагніти (соленоїди) 6, що відповідають коміркам матриці 2, в яких лежать насіння із кольором, геометричними розмірами і формою заданими оператором. Після вмикання тягнучого електромагніту

(соленоїда) 6 полоса 5 зміщується відносно матриці 2 і відкриває відповідні комірки. При зміщенні горизонтальної і вертикальної полоси 5 однозначно відкривається одна комірка і насіння випадає в піддон 16. Далі блок керування 14 вимикає тягучі електромагніти (соленоїда) 6 і полоси 5 під дією пружин розтягування 7 повертаються у початкове положення. Таким чином в піддон 16 потрапляє насіння, яке відповідає заданим оператором вимогам щодо кольору, геометричних розмірів і форми.

Стрічковий пристрій для автоматичного фенотипування насіння (рисунок 5.38) містить раму 1 і розміщену на ній стрічковий транспортер 2. Стрічковий транспортер 2 містить стрічку 3 і електродвигун 4. Перед стрічковим транспортером 2 на рамі 1 закріплено лоток подачі насіння 5 на резинових амортизаторах 6. Лоток подачі насіння 5 оснащений регульованою заслінкою 7. До нижньої частини лотка подачі насіння 5 кріпиться вібродвигун 8. На початку і в кінці стрічкового транспортера 2 навпроти один одного встановлені інфрачервоні світлодіоди 9 та 10 і фотоприймачі 11 та 12 відповідно. Над стрічковим транспортером 2 встановлена фотокамера 13, RGB-світлодіоди 14 і труба 15 із світлонепроникного матеріалу. Після стрічкового транспортеру 2 встановлено прийомний лоток 16 на тензодатчику 17, який закріплено на рамі 1. Тензодатчик 17 по засобом електричних проводів приєднано до підсилювача 18. Електродвигун 4, вібродвигун 8, інфрачервоні світлодіоди 9 та 10, фотоприймачі 11 та 12, RGB-світлодіоди 14, підсилювач 18 по засобом електричних проводів приєднано до блока керування 19. В свою чергу блок керування 19 і фотокамера 13 по засобом електричних проводів приєднано до персонального комп'ютера 20.

Стрічкоий пристрій для автоматичного фенотипування насіння працює таким чином.

Насіння, що необхідно дослідити, розміщують в лотку подачі насіння 5. З а використанням регульованої заслінки 7 встановлюють задану подачу насіння на стрічковий транспортер 2. Далі оператор запускає на персональному

комп'ютері 20 відповідне програмне забезпечення на основі бібліотеки алгоритмів комп'ютерного зору OpenCV і послідовного порту COM. Персональний комп'ютер 20 передає сигнал про початок роботи до блока керування 19, який включає вібродвигун 8 і електродвигун 4. Вібродвигун 8 створює віброуючі коливання лотка подачі насіння 5, і як наслідок насіння потрапляють на стрічку 3, яка переміщується під дією електродвигуна 4. Насіння проходить між інфрачервоним світлодіодом 9 і фотоприймачем 11. В результаті чого формується сигнал, який через блок керування 19 потрапляє до персонального комп'ютера 20. Персональний комп'ютер 20 вмикає фотокамеру 13 і передає сигнал до блока керування 19 про почергове вмикання RGB-світлодіодів 14. Зображення насіння в трьох освітленнях зберігається в базу даних персонального комп'ютера 20.

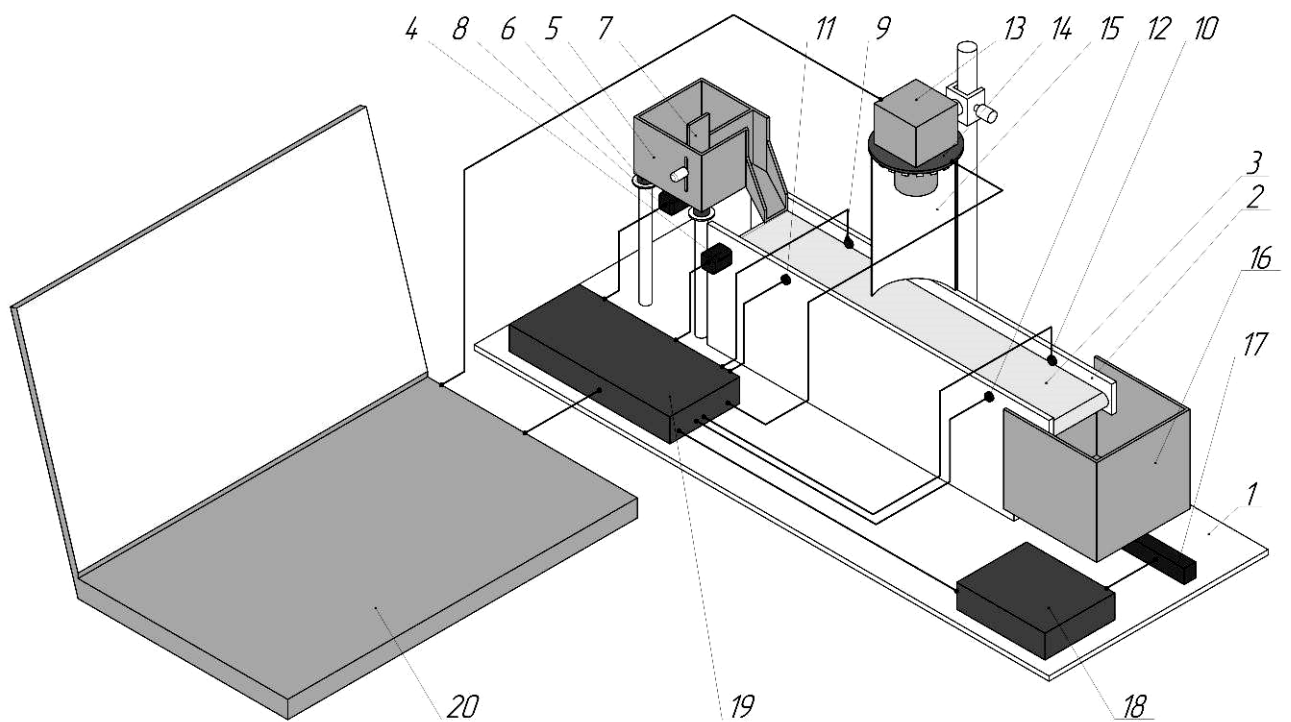


Рисунок 5.38 – Конструктивно-технологічна схема стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння

Далі насіння проходить між інфрачервоним світлодіодом 10 і фотоприймачем 12. В результаті чого формується сигнал, який через блок

керування 19 потрапляє до персонального комп'ютера 20. В кінці стрічкового транспортеру 2 насіння потрапляє до прийомного лотка 16. Сигнал з тензодатчика 17 через підсилувач 18 і блок керування 19 потрапляє до персонального комп'ютера 20, де значення маси насінини записується в базу даних.

Зображення насіння обробляється персональним комп'ютером 20. При цьому визначається колір кожного насіння при кожному вмикання RGB-світлодіодів 14 у червоному (R), зеленому (G) і голубому (B) спектрах у колірному просторі HSV (Hue – основний тон, Saturation – насиченість кольору, Value – кількість світла). Окрім цього персональний комп'ютер 20 за отриманими зображеннями визначає форму і геометричні розміри кожного насіння, що досліджується. Вся визначена інформація зберігається у базу даних, відображається на дисплеї персонального комп'ютера 20 і представляється на огляд оператору.

Таким чином, запропонований спосіб і пристрої для його здійснення, зберігають точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння, визначення їх форми і забарвлення, що відповідає сучасним вимірювальним засобам, та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками. Крім того, запропонований спосіб і пристрої для його здійснення дозволяють визначати морфологічні і маркерні ознаками (геометричний розмір, форма і забарвлення) всієї вибірки, що неможливо виконати за допомогою безпосереднього вимірювання, чим підвищує загальну продуктивність дослідження. При цьому також в значній мірі виключається вплив людського фактора на точність вимірювання морфологічних і маркерних ознак (геометричний розмір, форма і забарвлення) насіння.

5.5.3 Експериментальна перевірка макетного зразка обладнання

Експериментальна перевірка матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику була проведена на макетному зразку, загальний вид якого представлено на рисунку 5.41.

В якості фотокамери використано Video Microscope Camera 1080P 16MP HDMI USB виробництва Eakins. Керування матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння здійснює апаратно-програмний засіб Arduino Uno ATmega328P-PU у комплексі із сервоприводами SG 90 і боком реле. Електрична схема макетного зразка матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику приведена на рисунку 5.42.

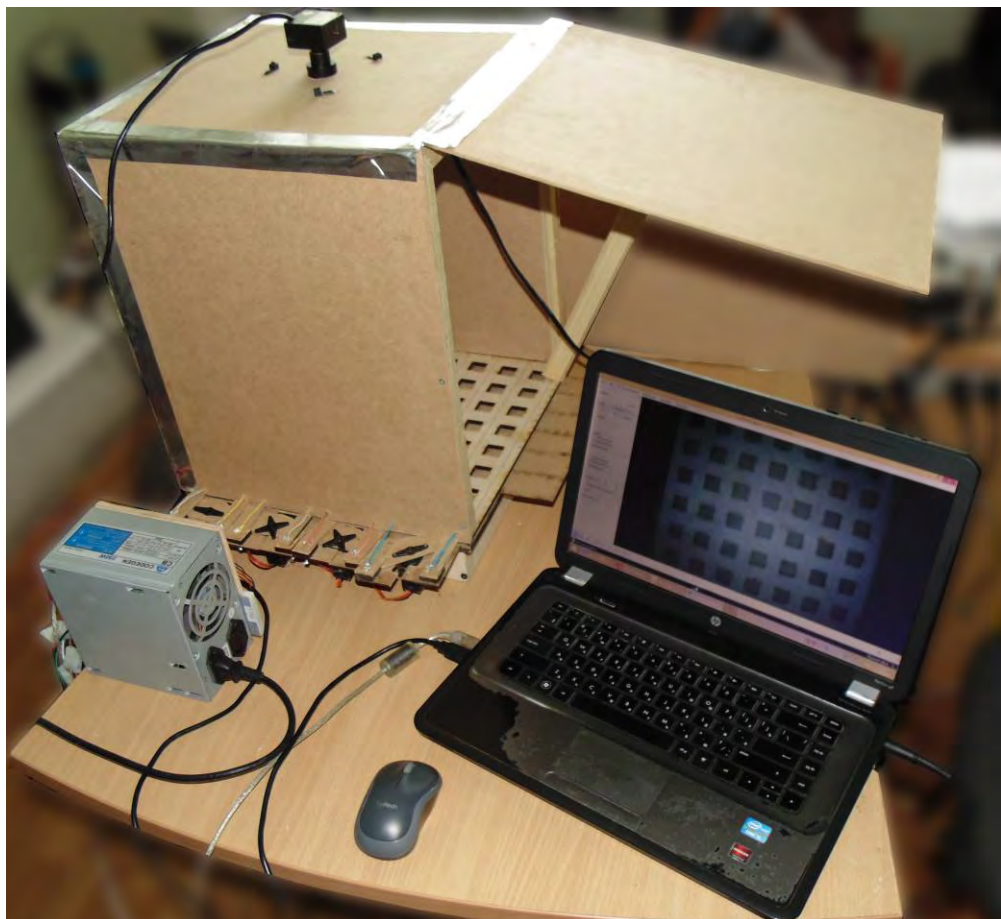


Рисунок 5.39 – Загальний вигляд макетного зразка матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику

В результаті експериментальної перевірки матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику встановлено його продуктивність, яка складала 1 кг/год, і споживаємо потужність (разом із персональним комп'ютером) – 76 Вт. Під час перевірки було проведено операцію сепарації 143 сортозразків соняшника за морфологічними і маркерними ознаками. Матричний пристрій для автоматичного фенотипування насіння соняшнику забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури сепарації зразків насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками.

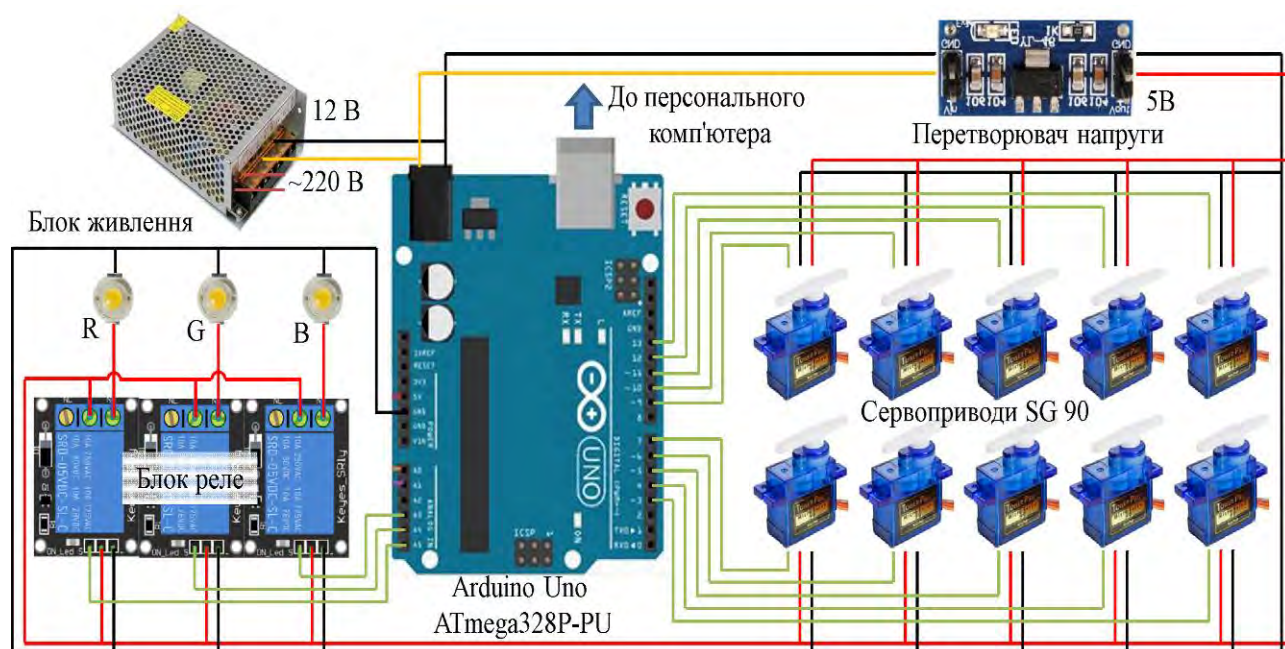


Рисунок 5.40 – Електрична схема макетного зразка матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику

Експериментальна перевірка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику була проведена на макетному зразку, загальний вид якого представлено на рисунку 5.41.

В якості тензодатчика із підсилювачем використано Weight sensor HX711. В якості фотокамери використано Video Microscope Camera 1080P 16MP HDMI USB виробництва Eakins. Керування стрічкового пристрою для автоматичного

фенотипування насіння здійснює апаратно-програмний засіб Arduino Uno ATmega328P-PU у комплексі із блоком реле. Електрична схема макетного зразка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику приведена на рисунку 5.42.

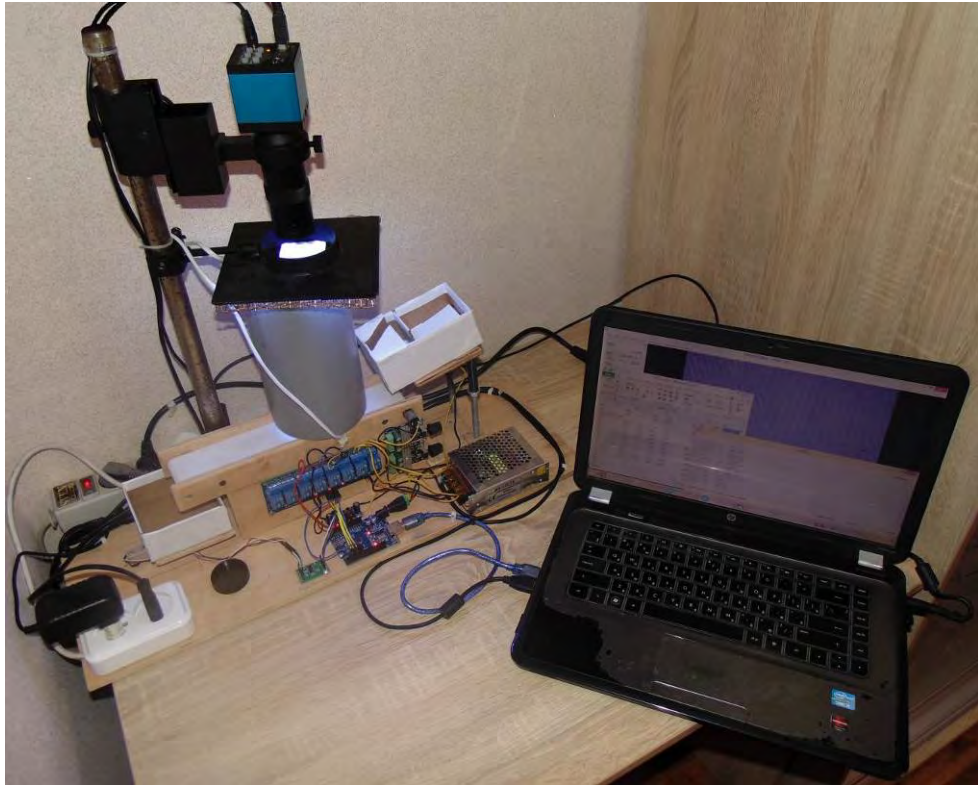


Рисунок 5.41 – Загальний вигляд макетного зразка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику

В результаті експериментальної перевірки стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику встановлено його продуктивність, яка складала 5 кг/год, і споживаємо потужність (разом із персональним комп'ютером) – 114 Вт. Під час перевірки була створена база даних морфологічних і маркерних ознак насіння 31 сортозразка соняшника. Стрічковий пристрій для автоматичного фенотипування насіння соняшнику забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення і ідентифікації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками.

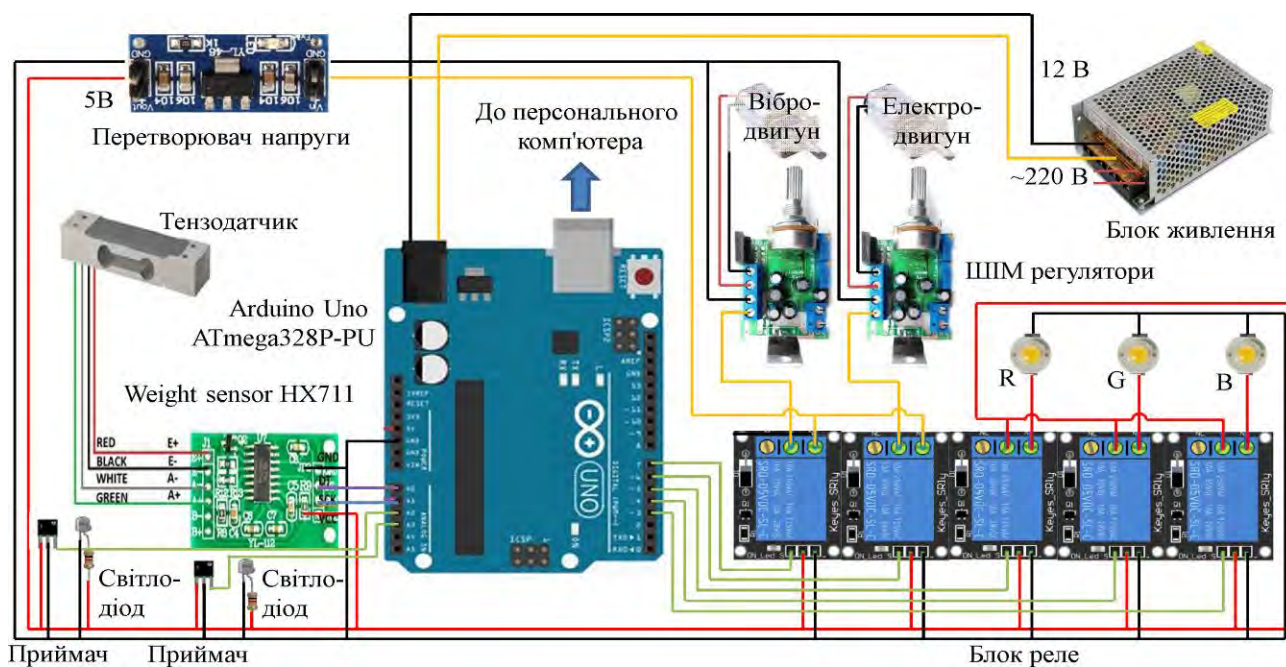


Рисунок 5.42 – Електрична схема макетного зразка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння соняшнику

5.6 Висновки з розділу

1. Спираючись на отримані дані чисельного моделювання встановлено, що з використанням автоматизованого каскаду заслінок можна досягти вирівнювання швидкості повітряного потоку ($\pm 0,2-0,4$ м/с) в сепаратійній камері аеродинамічного сепаратора, до складу якого може входити будь-який генератор потоку. Однак при цьому відбувається втрата номінальної швидкості на 5-15 %. Підвищення її може бути здійснено за рахунок збільшення продуктивності генератора повітряного потоку (наприклад, за рахунок збільшення частоти обертання лопатей вентилятора), що приводить до збільшення енерговитрат на 5-15 %. Але враховуючи пріоритетність якості виконання технологічного процесу сепарації на аеродинамічному сепараторі даними втратами можна знехтувати.

2. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.43)-(2.47), (2.53)-(2.57), (2.63)-(2.67), (2.48)-(2.52), (2.58)-(2.62), (2.68)-(2.72), (2.74), (2.77), (4.19), (4.21) розроблено адаптивний аеродинамічний сепаратор із

раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q і швидкість повітря V) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.2), який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за аеродинамічними властивостями з більш високою продуктивністю ($q = 114 \pm 9$ кг/год) і якістю (коефіцієнт розподілу $\delta = 96,3 \pm 2,6$ %).

3. В результаті досліджень розроблено відповідне програмне забезпечення для визначення фракційного складу насіння за фотозображенням, які основані на його перетворенні з 24-розрядного (повнокольорового) в 1-бітове (чорно-біле) за допомогою методу сегментації, обробки на основі морфологічних операцій і з використанням детектора границь Кенні та перетворення Хафа автоматичного визначення контуру кожного насіння в 1-бітному зображенні з подальшим обчисленням довжини L , ширини B , площі S та довжини периметра P насіння.

4. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.126), (2.129), (4.25)-(4.33) розроблено адаптивний віброрешітний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , кут нахилу α і частота коливань ψ решета) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.14), який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за геометричними розмірами з більш високою продуктивністю ($q = 189 \pm 13$ кг/год) і якістю (сумарна концентрація насіння $\theta = 3,4 \pm 1,3$ %).

5. Розроблено і проведено калібрування блока вимірювання об'ємної маси адаптивного вібропневматичного сепаратора. В результаті порівняння отриманих значень із традиційним методом вимірювання об'ємної маси (ДСТУ 4694:2006) за розрахованим критерієм Пірсона (χ^2) нормальність розподілу похибок вимірювань складає 2,13, більше за табличне значення $\chi^2(0,95;5) = 1,15$. Поведена перевірка гіпотези про однорідність значень за допомогою критерію Кохрена $G = 0,39 < G_{0,05}(1;20) = 0,48$.

6. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.170), (2.173), (2.176), (4.36), (4.39), (4.41) розроблено адаптивний вібропневматичний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , швидкість повітряного потоку V , частота коливань деки ψ , кути нахилу деки α і β) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.24), який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за об'ємною масою з більш високою продуктивністю ($q = 131 \pm 6$ кг/год) і якістю (коефіцієнт розподілу $\delta = 95,5 \pm 1,5$ %).

7. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.199), (2.201), (4.58), (4.62), (4.64) розроблено фотоелектронний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , частота коливань вібрототка ψ , частота обертання барабана n , часова затримка спрацьовування форсунки Δt , чутливість фотодатчика λ) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.32), який дозволяє виконувати технологічний процес дворазової сепарації насінневої суміші соняшнику за забарвленням поверхні сім'янок із продуктивністю ($q = 38 \pm 3$ кг/год) і сумарною концентрацією насіння ($\theta = 1,2 \pm 0,1$ %).

8. Розроблено матричний і стрічковий пристрої для автоматичного фенотипування насіння, які зберігають точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння соняшнику, визначення їх форми і забарвлення, що відповідає сучасним вимірювальним засобам, та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [388, 439, 440, 441, 442, 443].

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

6.1 Економічна оцінка впровадження результатів досліджень

Для обґрунтування ефективності впровадження розробленої прецизійної технологічної лінії сепарації насінневого матеріалу соняшнику під час селекційно-насінницького процесу проведемо її економічну оцінку.

Розрахунки виконані згідно методу економічного оцінювання техніки на етапі випробування, яка є галузевим стандартом України ДСТУ 4397-2005 [444] і ГСТУ 3-37-4-94 [445]. Також економічна оцінка була проведена у відповідності методик [446, 447, 448]. В якості об'єкту економічної оцінки сепарації насінневої суміші при виконанні селекційно-насінницького процесу обрано простий міжлінійний гібрид Пріоритет селекції Інституту олійних культур НААН. Вихідними даними для розрахунку прийнято ділянку батьківських компонентів добазового насінництва, площею 0,5 га.

Оцінка техніко-економічної ефективності процесу сепарації насінневої суміші для базового насінництва (супер еліта і еліта) проведена в комплексі. Розроблену раціональну прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику порівнювали із традиційною на основі результатів випробувань, теоретичних та експериментальних досліджень.

Вихідні дані економічного розрахунку представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані економічного розрахунку

Витрати вихідного насінневого матеріалу вищих репродукції для посіву, т/га	0,004
Урожайність насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів, т/га	0,6
Ціна насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів, грн	80000
Вартість електроенергії, грн.	2,89
Тарифна ставка, грн.	38,5

Технологічна карта і техніко-економічні показники традиційної і раціональної прецизійної технологічних ліній сепарації насінневого матеріалу соняшнику при виконанні селекційно-насінницького процесу представлено в додатку Ц.

Зведені дані техніко-економічного розрахунку представлені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Зведені дані техніко-економічного розрахунку

Показник	Раціональна прецизійна технологічна лінія	Традиційна технологічна лінія
Площа ділянки батьківських компонентів добазового насінництва, га	0,50	0,50
Маса насінневої суміші батьківських компонентів добазового насінництва із ворохом, т	0,300	0,300
Маса насінневого матеріалу батьківських компонентів добазового насінництва, т	0,249	0,228
Площа ділянки батьківських компонентів базового насінництва, га	62,3	57,1
Маса насінневої суміші батьківських компонентів базового насінництва із ворохом, т	37,4	34,2
Маса насінневого матеріалу батьківських компонентів базового насінництва, т	30,8	26,0
Затрати на електроенергію, грн.	3206,83	3243,15
Затрати на працю, грн.	28191,68	29367,77
Затрати на амортизацію, грн.	19979,30	13820,32
Затрати на ремонт і ТО, грн.	19979,30	13820,32
Загальні затрати, грн.	71357,13	60251,56
Питомі затрати, грн./т	2317,37	2314,53
Капіталовкладення, грн.	2050000,00	1400000,00
Додатковий ефект, грн.	380823,39	-
Додаткові капіталовкладення, грн.	650000,00	-
Економічний ефект, грн.	369717,83	-
Питомий економічний ефект, грн./т	12006,86	-
Строк окупності додаткових капіталовкладень, рік	1,76	-

Гістограми питомих витрат і динаміку маси насінневого матеріалу в процесі його сепарації представлені на риснках 6.1–6.2.

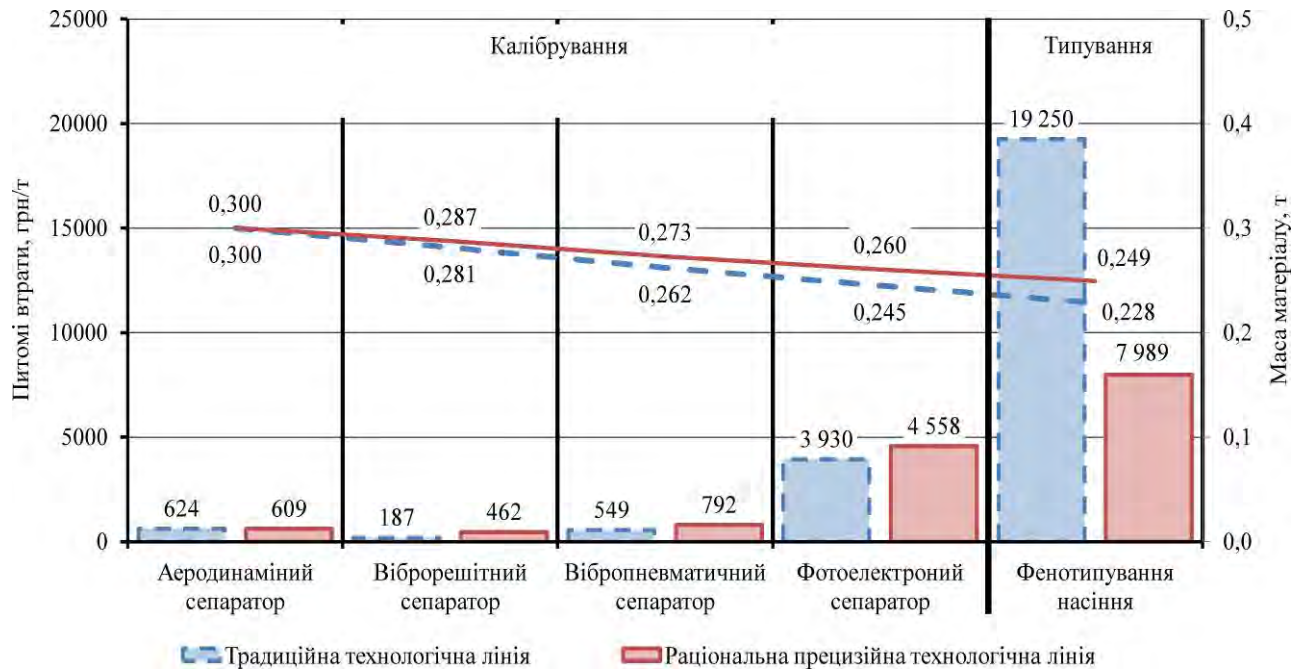


Рисунок 6.1 – Гістограма питомих витрат і динаміка маси насіннєвого матеріалу в процесі його сепарації при базовому насінництві соняшнику (супер еліта)

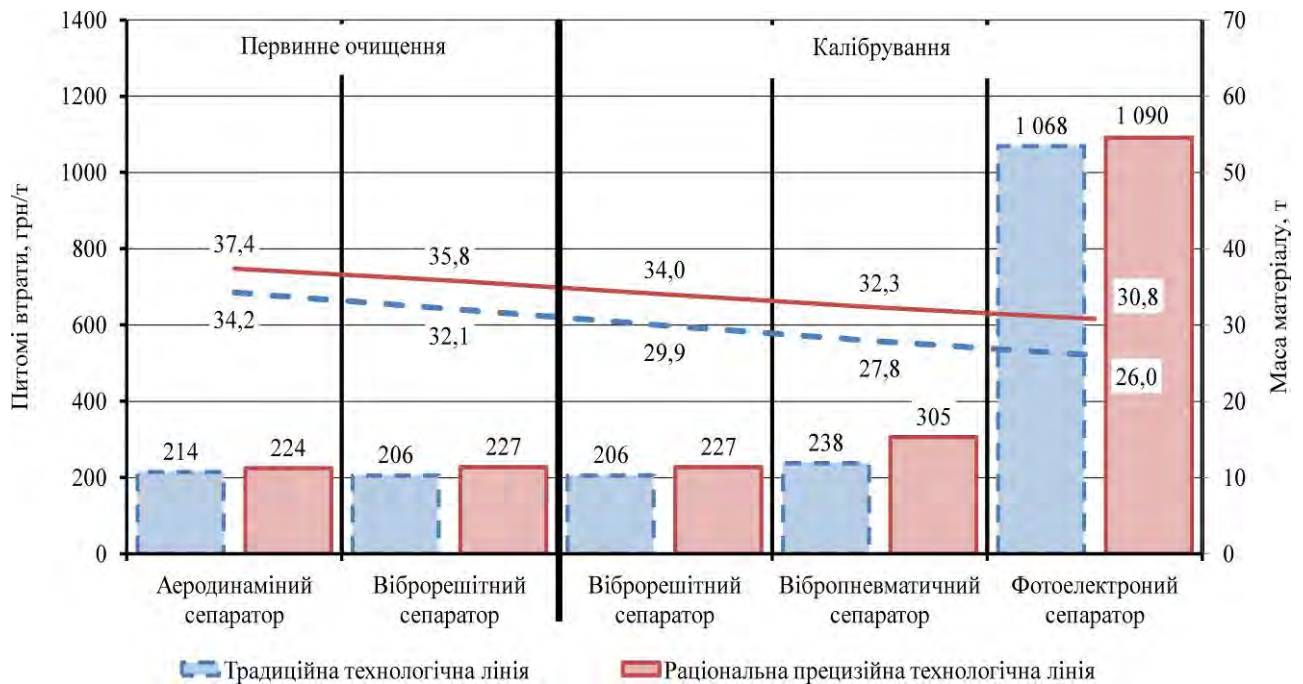


Рисунок 6.2 – Гістограма питомих витрат і динаміка маси насіннєвого матеріалу в процесі його сепарації при базовому насінництві соняшнику (еліта)

Розрахунки показують, що запропонована раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику має більш високі капіталовкладення (18,4 %) і відповідно до цього затрати на амортизацію, ремонт і ТО – 44,5 %, однак більш низькі затрати на електроенергію – 2,1 % і затрати на працю – 6,1 %. Окрім цього запропонована лінія в порівнянні із традиційною забезпечує додатковий економічний ефект по відношенню до вартості додаткових капіталовкладень – 58,5 %, який досягається за рахунок запобігання втратам ліквідного насінневого матеріалу в процесі сепарації насінневої суміші. Питомий економічний ефект з ділянки розмноження батьківських компонентів гібриду соняшнику Пріоритет (площею 0,5 га) за умови вартості отриманого насінневого матеріалу F1 (80000 грн/т) складає 12006,86 грн/т. При цьому строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,76 років.

6.2 Розроблені методики

Розроблена «Методика з визначення можливих максимальних втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищенні та розділенні» і алгоритми розрахунку, які реалізовані в програмному пакеті Microsoft Excel передані і впроваджені у виробництво Товариства з обмеженої відповідальністю «Снек-продакшн» (додаток III). В результаті використання результатів науково-дослідної роботи зменшено трудові витрати на розрахунки обґрунтованих втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищенні та розділенні на технічних засобах і обладнаннях ТОВ «Снек-продакшн». Розроблена методика дала змогу обґрунтувати раціональні режимні параметри калібрувальної машини ОКМФ і зерноочисного сепаратора БСХ-100 в залежності від технологічних характеристик вихідної насінневої суміші кондитерського соняшник.

Приватне підприємство «ЛЕНДФОРТ ДНІПРО» використовує розроблену «Методику визначення несортованого насіння соняшнику в насінневі суміші»

під час закупівлі і прийомки насінневого матеріалу соняшнику різних сортів і гібридів. Методика заснована на використанні маркерних ознак насіння (форма, геометричні розміри, забарвлення та інші), які слугують для встановлення приналежності рослин до певного гібриду чи сорту. Використання запропонованої методики дозволило запобігти отримання несортованого насіння в насінневій суміші від постачальників. Тим самим не допускаючи фальсифікацію насіння при прийомці (Додаток Ш).

Згідно з «Методики визначення несортованого насіння соняшнику в насінневій суміші» необхідно виконати наступні дії.

1 Провести відбір проб з партії насіння відповідно до ДСТУ 4601:2006 (Насіння олійних культур. Методи відбирання проб), ГОСТ 10852-86 (Семена масличные. Правила приемки и методы отбора проб), ГОСТ 29142-91 (Семена масличных культур. Отбор проб), ДСТУ 3355-96 (Продукція сільськогосподарська рослинна. Методи відбору проб у процесі карантинного огляду та експертизи), ДСТУ ISO 542:2006 (Насіння олійних культур. Методи відбирання проб). Кількість проб залежить від об'єму (маси) партії.

2 Отримати дані, щодо ознак насіння сорту або гібриду соняшнику, які зазначаються у описі зареєстрованого у Державній службі з охорони прав на сорти рослин.

3 Для кожної проби визначити морфологічні і технологічні властивості насінневої суміші соняшнику.

3.1 Визначення сміттєвої та олійної домішок провести у відповідності до ГОСТ 10854-88 (Семена масличные. Методы определения сорной, масличной и особо учитываемой примеси), ДСТУ ISO 658:2006 і ISO 658:2002 (Насіння олійних культур. Метод визначення вмісту домішок)

3.1.1 Визначити кількість (у % за масою) олійних домішок.

3.1.2 Визначити кількість (у % за масою) домішок мінерального походження.

3.1.3 Визначити кількість (у % за масою) домішок органічного походження.

3.1.4 Визначити фракційний склад насінневої суміші за шириною і товщиною (у % за масою) на круглих і щілиноподібних лабораторних решетах відповідно.

3.1.5 Визначити фракційний склад насінневої суміші (у % за масою) за довжиною візуально (можна розділити на 2-3 групи).

3.1.6 Визначити форму насіння у насінневій суміші (у % за масою) візуально (можна розділити на 2-3 групи).

3.2 Визначити органолептичні показники насіння соняшнику визначаються згідно ГОСТ 27988 (Семена масличные. Методы определения цвета и запаха), ДСТУ 8840:2019 (Насіння олійних культур. Методи визначення кольору та запаху).

3.2.1 Визначити запах насіння без обробки, розмеленого насіння, пропареного насіння.

3.2.2 Визначити смак ядра насіння і по можливості визначити кількість насіння (%), яке є прогірклим або не відповідає якості.

3.2.3 Визначити якість розлузування і відділення оплодня (лушпиння) від ядра.

3.2.4 Визначити структуру ядра і лушпиння.

3.2.5 Визначити наявність волосків і як наслідок відполірованість зовнішньої поверхні насіння соняшника.

3.2.6 Визначити забарвлення зовнішньої поверхні насіння в насінневій суміші (у % за масою) візуально (можна розділити на 2-3 групи).

3.3 Визначити заселенність насіння шкідниками.

3.4 Визначити вологості насіння соняшнику згідно з ДСТУ 4811, ДСТУ ISO 665:2008 (Насіння олійних культур. Визначення вмісту вологи та летких речовин), ДСТУ ISO 10565 (Насіння олійних культур. Одночасне визначання

вмісту жиру та вологи. Метод спектрометрії з використанням імпульсного ядерно магнітного резонансу).

3.5 Визначити маси 1000 насінин відповідно до ГОСТ 10842-89, ISO 520-77 (Зерно зерновых и бобовых культур и семена масличных культур. Метод определения массы 1000 зерен или 1000 семян), а об'ємну вагу (натуру) – за ГОСТ 10840-2017 (Зерно. Метод определения натуре).

3.6 Визначити схожість у відповідності до ДСТУ 4138-2002 (Насіння сільськогосподарських культур).

4 Після визначення морфологічних і технологічних властивостей насінневої суміші соняшнику провести порівняння всіх проб між собою та з ознаками які регламентовані у п. 2 за кожним визначеним вище показником.

4.1 Розрахувати середнє значення показника $P_{\text{сер}}$.

4.2 Оцінити середньоквадратичне відхилення показника $S_{\text{П}}$.

4.3 Розрахувати абсолютне відхилення показника $\Delta P_{\text{вип}}$.

4.4 Визначити відносне відхилення показника $\epsilon_{\text{П}}$.

5 Для кожної проби визначити біохімічні властивостей насінневої суміші соняшнику.

5.1 Визначити кислотне число насіння соняшнику відповідно до ДСТУ ISO 729:2005, ISO 729:1988 (Насіння олійних культур. Визначення кислотності олії), ГОСТ 26597-89 (Подсолнечник. Метод определения кислотного числа масла с применением рН-метрии), ГОСТ 10858-77 (Семена масличных культур. Промышленное сырье. Методы определения кислотного числа масла).

5.2 Визначити олійність насіння соняшнику відповідно до ГОСТ 10857-64 (Семена масличные. Методы определения масличности), ДСТУ ISO 10565-2003 (Насіння олійних культур. Одночасне визначання вмісту олії та вологи. Метод спектрометрії з використанням імпульсного ядерного магнітного резонансу), ДСТУ ISO 659:2007, ISO 659:1998 (Насіння олійне. Визначення вмісту олії (контрольний метод)).

5.3 Визначити вміст протеїну (білка) у насінні соняшнику відповідно до ГОСТ Р 53600-2009 (Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области), ДСТУ 7169:2010 (Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначання вмісту азоту і сирого протеїну), ГОСТ 10846-91 (Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка), ДСТУ ISO 5983:2003 (Корми для тварин. Визначення вмісту азоту і обчислювання вмісту сирого білка. Метод К'ельдаля).

5.4 За необхідністю визначити жирно-кислотний склад олії з насіння соняшника.

5.5 За необхідністю визначити активність ліпази і вміст загальних цукрів у насінні соняшнику

6 Після визначення біохімічних властивостей насінневої суміші соняшнику провести порівняння всіх проб між собою та з ознаками які регламентовані у п. 2 за кожним визначеним вище показником.

6.1 Розрахувати середнє значення показника $P_{\text{сер}}$.

6.2 Оцінити середньоквадратичне відхилення показника $S_{\text{п}}$.

6.3 Розрахувати абсолютне відхилення показника $\Delta P_{\text{вип}}$.

6.4 Визначити відносне відхилення показника $\varepsilon_{\text{п}}$.

7 Всі дані звести в таблицю.

6.3 Впровадження результатів у виробництво

Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації фотоелектронного сепаратора впроваджені і використані на виробництві Приватного підприємства «Агромех плюс» для виготовлення відповідного дослідного зразка (додаток III). Отримана документація буде використовуватися для проведення дослідно-виробничих випробувань фотоелектронного сепаратора з метою поставлення його на серійне виробництво.

Товариством з обмеженої відповідальності «Атлант-Запоріжжя» прийняло для впровадження у виробництво науково-технічну продукцію – комплекти конструкторської та технічної документації на експериментальні зразки адаптивного аеродинамічного сепаратора, адаптивного віброрешітного сепаратора і адаптивного вібропневматичного сепаратора (додаток Ш). В результаті аналізу документації фахівцями підприємства встановлені основні переваги запропонованих конструкцій. Використання вищезазначених адаптивних сепараторів дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових або насінневих сумішей за аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами і об'ємною масою з більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

Товариство з обмеженої відповідальності «Укрнасілляпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з виробничого контролю технологічних процесів очищення і розділення насінневого матеріалу соняшнику (додаток Ш). Прийняті рекомендації дозволили зменшити витрати електроенергії обладнання і машин для калібрування насіння на 12 % і зменшити витрати на працю на 7 %.

Отримані експериментальні залежності використані і прийняті Фізичною особою підприємцем Лінчуком Є.В. в якості методичних засад для проведення налаштування і калібрування фотоелектронного сепаратора ТАІНО 6SXZ-252 CCD COLOR SORTER. В результаті використання розроблених методичних засад налаштування і калібрування фотоелектронних сепараторів встановлено питомий економічний ефект у розмірі 87 грн. на 1 тону насінневого матеріалу, який підлягає сепарації. Зазначене значення обумовлено зменшенням енерговитрат на 18,3 % і витрат на оплату праці на 12,4 % (додаток Ш).

Пристрій для автоматичного фенотипування насіння олійних культур використовується при наукових дослідженнях в області селекції і генетики в Інституті олійних культур НААН (додаток Ш). Вищезазначений пристрій і спосіб автоматичного фенотипування насіння який покладено в його основу,

зберігає точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння будь-якої культури, визначення їх форми і забарвлення, що відповідає сучасним вимірювальним засобам, та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками. Крім того, запропонований спосіб і пристрій для його здійснення дозволяє визначати морфологічні і маркерні ознаками (геометричний розмір, форма і забарвлення) всієї вибірки, що неможливо виконати за допомогою безпосереднього вимірювання, чим підвищує загальну продуктивність дослідження. При цьому також в значній мірі виключається вплив людського фактора на точність вимірювання морфологічних і маркерних ознак (геометричний розмір, форма і забарвлення) насіння.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Нікертор» отримало рекомендації з ремонту і технічне обслуговування машин і устаткування для сепарації, розділення і очищення насіння олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей, конструктивно-технологічних і електричних принципових схем, які розроблені згідно науково-дослідної роботи «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насіннєвого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U003095, 2016-2020 рр.) в Інституті олійних культур НААН. Отримані рекомендації будуть використані для ремонту і удосконалення існуючих сепараторів різних типів (аеродинамічні, віброрешітні, вібропневматичні). Їх удосконалення буде виконуватися шляхом автоматизації керуючих елементів і раціонального узгодження їх конструктивно-режимних параметрів (Додаток Ш).

6.4 Висновки з розділу

1. Результати економічної оцінки показують, що пропонована раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику має більш високі капіталовкладення (18,4 %) і відповідно

до цього затрати на амортизацію, ремонт і ТО – 44,5 %, однак більш низькі затрати на електроенергію – 2,1 % і затрати на працю – 6,1 %. Окрім цього запропонована лінія в порівнянні із традиційною забезпечує додатковий економічний ефект по відношенню до вартості додаткових капіталовкладень – 58,5 %, який досягається за рахунок запобігання втратам ліквідного насіннєвого матеріалу в процесі сепарації насіннєвої суміші.

2. Питомий економічний ефект з ділянки розмноження батьківських компонентів гібриду соняшнику Пріоритет (площею 0,5 га) за умови вартості отриманого насіннєвого матеріалу F1 (80000 грн/т) складає 12006,86 грн/т. При цьому строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,76 років.

3. В результаті використання «Методика з визначення можливих максимальних втрат маси насіннєвої суміші кондитерського соняшнику при її очищені та розділені» зменшено трудові витрати на розрахунки обґрунтованих втрат маси насіннєвої суміші кондитерського соняшнику при її очищені та розділені на технічних засобах і обладнаннях ТОВ «Снек-продакшн». Розроблена методика дала змогу обґрунтувати раціональні режимні параметри калібрувальної машини ОКМФ і зерночисного сепаратора БСХ-100 в залежності від технологічних характеристик вихідної насіннєвої суміші кондитерського соняшник.

4. «Методика визначення несортованого насіння соняшнику в насіннєвій суміші» заснована на використанні маркерних ознак насіння (форма, геометричні розміри, забарвлення та інші), які слугують для встановлення приналежності рослин до певного гібриду чи сорту. Використання запропонованої методики дозволило запобігти отримання несортованого насіння в насіннєвій суміші від постачальників. Тим самим не допускаючи фальсифікацію насіння при прийомці.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [449, 450].

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена проблема підвищення ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. Розроблено механіко-технологічні основи проектування систем автоматизованого керування конструктивно-режимними параметрами технічного забезпечення технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. За вимогами до технологічних процесів очищення та розділення насінневої суміші для отримання насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів (сортова чистота – 98,0–99,9 %) для всіх ланок селекційно-насінницького процесу розроблена раціональна прецизійна технологічна схема лінії процесів сепарації, яка включає автоматизацію технічних засобів. Для підвищення ефективності селекційно-насінницького процесу соняшнику щодо розробленої технологічної лінії додано пристрій для автоматичного фенотипування насіння, що дозволяє значно інтенсифікувати та скоротити селекційний процес та поліпшити проектування програми схрещування за рахунок біоінформативного аналізу даних і сортування насіння.

2. Чисельним моделюванням і емпіричними дослідженнями процесу сепарації насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) отримано залежності масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів ξ_h (2.39) і ξ_l (2.40) від ефективного діаметру насіння соняшнику D_p і швидкості повітря V . Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких ρ_h (2.41) і легких ρ_l (2.42) компонентів від вищезазначених факторів досліджень. Отримані залежності дають змогу визначати швидкість потоку повітря V виходячи з необхідних об'ємних мас ρ_h і ρ_l та ефективного діаметру насіння соняшнику D_p .

3. За результатами чисельного моделювання і експериментальних досліджень механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під

дією повітряного потоку отримано залежності розподілу кожної фракції насіння по довжині області (середнє значення \bar{x} : (2.43)-(2.47), (2.53)-(2.57), (2.63)-(2.67); середньоквадратичне відхилення σ : (2.48)-(2.52), (2.58)-(2.62), (2.68)-(2.72); коефіцієнт заповнення χ : (2.74); коефіцієнт розподілу δ : (2.77), (4.19)) і споживаної потужності P (4.21) від ефективного діаметра насінин D_p , швидкості подачі повітря V та подачі насіння Q .

4. На підставі результатів досліджень (2.43)-(2.47), (2.53)-(2.57), (2.63)-(2.67), (2.48)-(2.52), (2.58)-(2.62), (2.68)-(2.72), (2.74), (2.77), (4.19), (4.21) розроблено адаптивний аеродинамічний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q і швидкість повітря V) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.2), який визначає технологічний процес сепарації насінневої суміші соняшнику за аеродинамічними властивостями з більш високою продуктивністю ($q = 114 \pm 9$ кг/год) і якістю (коефіцієнт розподілу $\delta = 96,3 \pm 2,6$ %).

5. Чисельним моделюванням і експериментальними дослідженнями процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами під дією вібруючих решіт різних видів (пробивні, пруткові, точні) встановлено залежності зміни сумарної концентрації θ (2.129), (4.28)-(4.30), продуктивності q (2.126), (4.25)-(4.27) і споживаної потужності P калібрувальної машини (4.31)-(4.33) від подачі насіння Q , кута нахилу решета α , частоти ψ і амплітуди коливань решета A .

6. За результатами проведених досліджень (2.126), (2.129), (4.25)-(4.33) розроблено адаптивний віброрешітний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , кут нахилу α і частота коливань ψ решета) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.14), який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за геометричними розмірами з більш високою продуктивністю ($q = 189 \pm 13$ кг/год) і якістю (сумарна концентрація насіння $\theta = 3,4 \pm 1,3$ %).

7. Процес сепарації насінневого матеріалу соняшнику за об'ємною масою під дією віброуючої поверхні визначається коефіцієнтом заповнення χ (2.173), коефіцієнтом розподілу δ (2.176), (4.36) продуктивністю q (2.170), (4.39) і споживаною потужністю пневмовібросепаратора P (4.41), які залежать від подачі насіння Q , кутів нахилу віброуючої поверхні α та β , частоти коливань ψ , амплітуди коливань A та швидкості повітряного потоку V .

8. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (2.170), (2.173), (2.176), (4.36), (4.39), (4.41) розроблено адаптивний вібропневматичний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , швидкість повітряного потоку V , частота коливань деки ψ , кути нахилу деки α і β) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунок 5.24), який дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневих сумішей соняшнику за об'ємною масою з більш високою продуктивністю ($q = 131 \pm 6$ кг/год) і якістю (коефіцієнт розподілу $\delta = 95,5 \pm 1,5$ %).

9. На базі чисельного моделювання та експериментальних досліджень технологічного процесу роботи фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала середній інтервал часу між падаючим насінням t (2.201), сумарну концентрацію насіння θ (4.58), продуктивність фотоелектронного сепаратора q (2.199), (4.62) і його споживану потужність P (4.64) від подачі насіння Q , частоти коливань віброрізка ψ , частоти обертання барабана n , часової затримки спрацьовування форсунки Δt , чутливості фотодатчика λ . В результаті експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора встановлено експоненціальну залежність зміни ймовірності реагування газової форсунки p (4.55) від інтервалу часу між падаючим насінням t

10. На підставі результатів досліджень (2.199), (2.201), (4.58), (4.62), (4.64) удосконалено фотоелектронний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння Q , частота коливань віброрізка ψ , частота обертання барабана n , часова затримка спрацьовування форсунки Δt , чутливість фотодатчика λ)

за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму (рисунк 5.32), який дозволяє виконувати технологічний процес дворазової сепарації насінневої суміші соняшнику за забарвленням поверхні сім'янок із продуктивністю ($q = 38 \pm 3$ кг/год) і сумарною концентрацією насіння ($\theta = 1,2 \pm 0,1$ %).

11. Розроблено математичну модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння соняшнику із реалізацією принципу відбракування за кількома параметрами (забарвлення, форма, геометричні розміри) за допомогою перетворювачів зображення, які реалізовані на визначенні забарвлення і контуру насіння у колірному просторі HSV. Результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння різних сортів соняшнику дали змогу встановити середню похибку визначення геометричних розмірів насіння соняшнику (довжини L і ширини B) – 0,06 мм. Розрахунок коефіцієнтів калібрувальної характеристики вимірювання геометричних розмірів з використанням експериментального пристрою для автоматичного фенотипування в припущенні, що ця залежність є лінійною, було перевірено з використанням критерію Фішера $F = 1,15 < F_{0,05}(91, 100) = 1,39$.

12. Встановлені гістограми розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB при різному освітленні. В результаті аналізу отриманих гістограм розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB встановлено, що у випадку однорідності кольору найбільш виразно видно дискретність каналів при червоному освітленні. При цьому гістограма має по одному максимуму для кожного каналу, який зміщується в залежності від забарвлення насіння. Так для чорного забарвлення $R = 182-189$, $G = 194-202$, $B = 211-218$, а для білого $R = 112-118$, $G = 124-129$, $B = 133-139$. Також виявлено, що у випадку двокольорового забарвлення насіння соняшнику на гістограмах спостерігається два максимуми, кожен з яких відповідає певному кольору. Частоти цих максимумів відповідають інтенсивності кожного з кольорів. Враховуючи вищесказане, можна визначити показник забарвлення насіння C , як матрицю частот f відповідних максимумів (\max) в колірному просторі RGB при червоному освітленні насіння (4.70).

13. Розроблено матричний і стрічковий пристрої для автоматичного фенотипування насінневого матеріалу соняшнику за його морфологічними і маркерними ознаками. Пристрої налаштовані на високу точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння соняшнику із визначенням їх форми і забарвлення та забезпечують низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння.

14. Питомий економічний ефект від впровадження раціональної прецизійної технологічної лінії процесів сепарації насінневого матеріалу на прикладі соняшнику з ділянки розмноження батьківських компонентів гібриду Пріоритет (площею 0,5 га) у порівнянні з традиційною технологічною лінією за умови вартості отриманого насінневого матеріалу F1 (80000 грн/т) складає 12006,86 грн/т. При цьому строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,76 років.

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. Державна цільова програма розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року (2016). Офіційний вісник України. № 24. Київ: Кабінет Міністрів України. 11 с.
3. Державна служба статистики України (2019). Економічна статистика / Економічна діяльність / Сільське, лісове та рибне господарство. Електронний ресурс: https://ukrstat.org/uk/operativ/menu/menu_u/cg.htm.
4. ДСТУ 2240-93. (1993). Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ: Держстандарт України. 74 с.
5. Кириченко, В. В., Петренкова, В. П., Кривошеєва, О. В., Рябчун, В. К., Маркова, Т. К. (2007). Ідентифікація морфологічних ознак соняшнику (*Helianthus L.* посібник). Харків: Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва УААН. 78 с.
6. Кутіщева, Н. М., Одинець, С. І., Шудря, Л. І., Серета, В. О., Шугурова, Н. О., Погорільчук, З. І., Краснокутська, Ю. В., Левченко, В. І., Бондаренко, А. В. (2015). Каталог робочої колекції ліній-відновників фертильності пилку (*Helianthus annuus L.*). Запоріжжя: Інститут олійних культур НААН. 36 с.
7. Кириченко, В. В., Сивенко, В. І., Сивенко, О. А., Макляк, К. М., Леонова, Н. М. та інші (2015). Каталог ліній-відновників фертильності пилку соняшнику (*Helianthus annuus L.*). Харків: Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН. 33 с.
8. Кириченко В. В. (2005). Селекція и семеноводство подсолнечника [*Heliantus annus*]. Харьков. 387 с.
9. Кириченко В. В. (2016). Основи управління продукційним процесом польових культур. Харків. 711 с.
10. ДСТУ 4138-2002. (2002). Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Київ: Держстандарт України. 173 с.
11. Петренкова, В. П., Кривошеєва, О. В., Леонова, Н. М. (2004). Створення високобілкових ліній соняшнику для кондитерського напрямку

селекції. Сучасні технології селекційного процесу сільськогосподарських культур: збірник тез міжнародного наукового симпозіуму (7-8 лип. 2004 р.). УААН, Ін-т рослинництва ім. В.Я. Юр'єва. Харків. С. 138-139.

12. Леонова, Н. М., Кириченко, В. В., Сивенко, А. А. (2015). Проявление эффекта гетерозиса и комбинационная способность линий подсолнечника кондитерского типа. Масличные культуры : научно-технический бюллетень Всероссийского 19 научно-исследовательского института масличных культур. Краснодар. Вып. 1 (161). С. 16-21.

13. Атлас морфологічних ознак сортів рослин соняшника однорічного *Helianthus annuus* L. (2011). Наочне доповнення до «Методики проведення інспектування насінницьких посівів соняшника однорічного». К.: Алефа, Український інститут експертизи сортів рослин. 87 с.

14. Нікітчин Д. І. (1993). Соняшник. К.: Урожай. 192 с.

15. Gorohivets, N. A., Vedmedeva, E. V. (2016). Inheritance of epidermis pigmentation in sunflower achenes, *Cytol Genet.* Vol. 50, no. 2. P. 116-120. DOI: 10.3103/S0095452716020031.

16. Poliakova, N.A., Vedmedeva, E.V. (2016). Inheritance of Anthocyanin Coloration Trait in Pericarp of Sunflower Seeds. *HELIA.* P. 81–90. DOI: 10.1515/helia-2016-0005

17. Ведмедева, К. В. (2017). Окраска краевых цветков в коллекции линий подсолнечника. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК. Вып. 4 (172). С. 31-38.

18. Шевченко, І. А., Лях, В. О., Поляков, О. І., Сорока, А. І., Ведмедева К. В., Журавель, В. М., Махно Ю. О., Товстановська Т. Г., Буділка Г. І. (2017). Льон олійний, гірчиця. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС. 44 с.

19. Шевченко, І. А., Поляков, О. І., Ведмедева К. В., Комарова І. Б. (2017). Рижій, сафлор, кунжут. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС. 40 с.

20. Окнин, Б. С., Горбачев, И. В., Терехин, А. А., Соловьев, В. М. (1987). Машины для послеуборочной обработки зерна. М.:Агропромиздат. 238 с.
21. Тарасенко, А. П. (2008). Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян [Электронный ресурс]: [учеб. пособие]. М. : Колос. 232 с.
22. Трубилин, Е. И., Федоренко, Н. Ф., Тлишев, А. И. (2009). Механизация послеуборочной обработки зерна и семян. Учебное пособие для студентов сельскохозяйственных вузов. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет. 96 с.
23. Галкин, В. Д., Кошурников, А. Ф., Хавыев, А. А., Хандриков, В. А., Грубов, К. А. (2014). Вибропневмосепараторы и их использование в линиях очистки семян: учебное пособие. М-во с.-х. РФ; федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высш. проф. образов. «Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д.Н. Прянишникова». 2-е изд. перераб. и доп. Пермь: ИПЦ «ПрокростЪ». 102 с.
24. Шафоростов, В. Д. (2013). Универсальная контейнерная технология послеуборочной обработки семенного материала. Науч.-техн. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. № 2 (155-156). С. 108–112.
25. Шафоростов, В. Д., Припоров, И. Е. (2014). Усовершенствование универсального семяочистительного комплекса. Международный научно-исследовательский журнал. № 8-1 (27). С. 71-73.
26. Шафоростов, В. Д., Тюрин, А. А., Перетягин, Е. А. (2005). Основные направления совершенствования технологии подготовки семенного материала высших репродукций. Науч.-техн. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. № 2 (133). С. 58-63.
27. Шафоростов, В. Д., Припоров, И. Е. (2014). Качественные показатели работы универсального семяочистительного комплекса на базе отечественных семяочистительных машин нового поколения. В сборнике: Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК Сборник научных трудов 9-й Международной научно-практической конференции в 2-х частях. Редакционная коллегия: Хлыстунов В.Ф. ответственный редактор, Рыков В.Б., Бурьянов А.И., Беспмятнова Н.М., Камбулов С.И., Кушнарев А.П. ответственный секретарь. С. 162-167.

28. Припоров, И. Е., Шафоростов, В. Д. (2014). Технология послеуборочной обработки семян масличных культур. Инновации в сельском хозяйстве. № 5 (10). С. 10-14.

29. Припоров, И. Е. (2012). Параметры усовершенствованного процесса разделения компонентов вороха семян крупноплодного подсолнечника в воздушно-решетных зерноочистительных машинах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01. Кубанский государственный аграрный университет. Краснодар. 149 с.

30. Припоров, И. Е., Лазебных, Д. В. (2015). Рациональная технология послеуборочной обработки семян подсолнечника. Научный журнал КубГАУ. №112 (08). С. 1-11.

31. Закон України «Про насіння і садивний матеріал» (зі змінами та доповненнями). Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2003, № 13, ст.92. Редакція від 04.10.2018. – електронний ресурс <http://zakon1.rada.gov.ua>.

32. Авдеев, А. В., Сечкин, В. С., Галкин, В. Д., Новиков, М. А., Кошурников, А. Ф., Галкин, А. Д., Ерошенко, Л. И. (2005). Агрегаты и комплексы для послеуборочной обработки и хранения зерна и семян: учебное пособие. С.– Пб.: СПГАУ. 130 с.

33. Галкин, В. Д., Хавыев, А. А., Хандриков, В. А., Грубов, К. А., Менгалиев, И. П., Килин, К. С., Козловский, И. Ю. (2013). Исследование процессов движения и разделения компонентов семенной смеси в вибропневмооживленном слое. Научно-практический журнал. Пермский аграрный вестник. №3 (3). С. 20-23

34. Дринча В. М. (2006). Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК». 384 с.

35. Федоренко, В. Ф., Ревякин, Е. Л. (2006). Зерноочистка – состояние и перспективы. М.: ФГНУ «Росинформагротех». 204 с.

36. Макаров, П. И., Юнусов, Г. С., Казанков, И. И., Казанков, С. И., Богданов, Г. В., Гайнанов, Х. С., Маслова, Н. Ф. (2007). Механизация послеуборочной обработки зерна. Йошкар-Ола: МарГУ. 284 с.

37. Чижиков, А. Г., Бабченко, В. Д., Машков, Е. А. (1981). Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна (в Нечерноземной зоне). М.: Россельхозиздат. 192 с.
38. Заїка, П. М. (2006). Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Харків: Око. 407 с.
39. Заика, П. М., Мазнев, Г. Е. (1978). Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. М.: Колос. 287 с.
40. Адамчук, В. В., Прилуцький, А. Н., Заришняк, А. С., Степаненко, С. П. (2014). Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України. В зб.: Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ». Вип. 99. С. 40-56.
41. Диринча, В. М. (2006). Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. Воронеж: МОДЭК. 384 с.
42. Фадеев, Л. В. (2013). Зерно. Очистка. Производство семян. Щадящие технологии Фадеева. Харьков: Издание ООО "Спецэлеватормельмаш". 96 с.
43. Федоренко, В. Ф., Буклагин, Д. С., Гольтяпин, В. Я., Измайлов, А. Ю., Елизаров, В. П., Пугачев, П. М., Самосюк, В. Г., Чеботарев, В. П., Барановский, И. В., Князев, А. А., Михайловский Е. И. (2010). Машины и оборудование для послеуборочной обработки и хранения зерна и семян: кат. М.: ФГНУ «Росинформагротех». 92 с.
44. Ямпиллов, С. С. (2003). Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ. 262 с.
45. Чеботарев, В. П., Барановский, И. В., Князев, А. А., Немцев П. М. (2010). Анализ тенденций развития современных зерноочистительных и сортировальных машин. Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Минск. Т. 1. С.184-189.
46. Сайтов, В. Е., Фарафонов, В. Г., Суворов, А. Н., Григорьев, Д. В. (2012). Разработка и совершенствование малогабаритных пневмосепараторов с замкнутым циклом воздушного потока. Монография. Киров: Вятская ГСХА. 209 с.

47. Саитов, В. Е. (2008). Совершенствование технологического процесса воздушно-решетных зерно- и семяочистительных машин (рекомендации). Киров: Вятская ГСХА. 87 с.

48. Саитов, В. Е. (2012). Инновации в послеуборочной обработке зернового материала: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 150 с.

49. Саитов, В. Е., Фарафонов, В. Г., Суворов, А. Н. (2012). Исследование процессов в рабочих органах сепараторов зерна: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 200 с.

50. Сычуглов, Н. П., Саитов, В. Е., Гатауллин, Р. Г. (2006). Повышение эффективности функционирования семяочистительных машин путем совершенствования рабочих органов пневмосистем: монография. Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. 193 с.

51. Бурков, А. И., Глушков, А. Л., Саитов, В. Е. (2008). Машина для пневмофракционной технологии обработки зернового вороха. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 11. С. 3-6.

52. Саитов, В. Е. (2007). Совершенствование машины предварительной очистки зерна. Тракторы и сельскохозяйственные машины. № 4. С. 17-20.

53. Саитов, В. Е., Григорьев, Д. В. (2012). Замкнутый малогабаритный пневматический сепаратор для очистки зерна. Тракторы и сельскохозяйственные машины. № 7. С. 15-18.

54. Войтюк, Д. Г., Гаврилук Г. Р. (1994). Сільськогосподарські машини. К.: Урожай. 446 с.

55. Тищенко, Л. Н., Мазоренко, Д. И., Пивень, М. В., Харченко, С. А. и др. (2010). Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харків: Міськдрук. 360 с.

56. Ермольев, Ю. И., Бутовченко, А. В., Дорошенко, А. А. (2014). Модельное прогнозирование показателей функционирования воздушно-решетной зерноочистительной машины от роста эффективности операции пневмосепарации. Вестник ДГТУ. Т. 14. № 1 (76). С. 122-134.

57. Бутовченко, А. В. (2012). Высокотехнологичный семяочистительный агрегат. Вестник Дон. гос. техн. ун-та. № 3 (64). С. 16-21.
58. Войтюк, Д. Г., Гаврилюк, Г. Р. (2004). Сільськогосподарські та меліоративні машини. К.: Вища освіта. 554 с.
59. Тіщенко, Л. М., Корнієнко, С. І., Харченко, С. О. та ін. (2015). Технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур: монографія; за ред. Л.М. Тіщенка. Харків: ХНТУСГ. 273 с.
60. Kharchenko, S. O. (2017). Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators. Kharkiv: «Діса+». 220 p.
61. Войтюк, Д. Г., Гаврилюк, Г. Р. (2008). Сільськогосподарські машини. К.: Каравела. 551 с.
62. Ольшанський, В. П., Бредихін, В. В., Лук'яненко, В. М., Півень, М. В., Сліпченко, М. В., Харченко, С. О. (2017). Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ПланетаПрінт. 803 с.
63. Вобликов, Е.М., Буханцов, В.А., Маратов, Б.К., Прокопец, А.С. (2001). Послеуборочная обработка и хранение зерна. М: Март. 229 с.
64. Морозов, Н. К. (2003). Зерноочистительно-сушильные комплексы. М.: Колос. 356 с.
65. Манжесов, В. И., Попов, И. А., Щедрин, Д. С. (2009). Технология хранения растениеводческой продукции. Воронеж: Изд-во ВГАУ имени К. Д. Глинки. 286 с.
66. Шафоростов, В. Д., Припоров, И. Е. (2008). Исследование воздушной системы зерноочистительной машины МВУ – 1500. Науч.-техн. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. № 2 (139). С. 82-84.
67. Ермольев, Ю. И., Шафоростов, В. Д., Бутовченко А. В., Припоров, И. Е. (2011). Оценка основных закономерностей функционирования подсистемы «решётный ярус–пневмосепаратор воздушно–решётной зерноочистительной машины». Вестник Донской ГТУ. Том 11. № 4 (55). С. 480-488.
68. Ямпиров, С. С. (2004). Технологические и технические решения проблемы очистки зерна решетками. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ. 165 с.

69. Тищенко, Л. Н., Пивень, М. В., Харченко, С. А., Бредихин, В. В. (2013). Результаты производственных испытаний зернового сепаратора А1-БЦСМ-100 с разработанными решетками. Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. Вип. 135. С. 9-15.

70. Харченко, С. А., Тищенко, Л. Н. (2015). Определение абсолютных компонент скоростей пузырьковой псевдоожиженной зерновой смеси при движении по цилиндрическим решеткам виброцентробежных сепараторов. Інженерія природокористування. Харків. № 2 (4). С. 52-57.

71. Тищенко, Л. Н., Харченко, С. А. (2016). Инновационные решения повышения эффективности виброрешетной просеваемости зерновых смесей. Вібрації в техніці та технологіях. Вінниця: ВНАУ. №2 (82). С. 116-124.

72. Котов, Б. І., Пастушенко, М. Г., Степаненко, С. П. (2012). Дослідження ефективності вібровідцентрової сепарації зерна на ступінчасто-конічному решеті методом планування експериментів. Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин. Випуск 42. Частина 2. С. 70-75.

73. Пивень, М. В. (2002). Экспериментальные исследования разрыхленности зернового слоя при сепарации зернового материала на вибрационном решете. Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ. Вип. 12. С. 101-107.

74. Бредихін, В. В. (2003). Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих сумішей за густиною насіння. Автореф. дис. канд. техн. наук. Харків. 20 с.

75. Петренко, Н. Н., Марченко, И. В., Марченко, К. Н. (2003). Анализ процесса сепарации зерна на решете в среде пульсирующего воздушного потока. Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. Кіровоград: КДТУ. Вип. 33. С. 141-143.

76. Тищенко, Л. Н. (2004). Интенсификация сепарирования зерна. Харьков: Основа. 224 с.

77. Харченко, С. А. (2016). Методика определения энергозатрат процессов виброрешетного просеивания зерновых смесей. Вісник СНАУ. Суми: СНАУ. 10/2 (30). С. 137-142.

78. Котов, Б. І., Степаненко, С. П., Пастушенко, М. Г. (2004). Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. Вибрации в технике и технологиях. № 3 (35). С. 61-63.

79. Кузьмицкий, А. В., Бойко, Т. В., Шупилов, А. А., Ракова, Н. Л., Авраменко, П. В. (2012). Машины и оборудование для очистки и сортирования зерновых и зернобобовых культур: учебно-методическое пособие. Минск: БГАТУ. 100 с.

80. Дерев'янюк, Д. (2015). Дослідження ударної взаємодії травмування насіння поверхнею циліндричного решета вібросепаратора після його сходження з диска розподільника. Техніка і технології АПК. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, № 6 (69). С. 9-12.

81. Галкин, В. Д., Хандриков, В. А., Хавыев, А. А. (2017). Сепарация семян в вибропневмооживленном слое: технология, техника, использование: монография. М-во с.-х. РФ; федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высш. образов. «Пермский гос. аграрно-технологич. ун-т им. акад. Д.Н. Прянишникова». Пермь: ИПЦ «ПрокростЪ». 170 с.

82. Завгородний, А. И., Обыхвост, А. В. (2006). Очистка семян гречихи на вибрационном сепараторе с малогабаритными деками. Вісник Полтавської державної аграрної академії. № 4. С. 50-51.

83. Заика, П. М. (1977). Динамика вибрационных зерноочистительных машин. М.: Машиностроение. 305 с.

84. Заика, П. М., Мазнев Г. Е. (1978). Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. М.: Колос. – 287 с.

85. Заика, П. М. (1981). Вибрационные семяочистительные машины и устройства. Учебное пособие. М.: МИИСП. 141 с.

86. Заїка, П. М., Бакум, М. В., Михайлов, А. Д., Козій, О. Б. (2012). Сепарация насіння льону на вібраційних сепараторах. Вібращі в техніці та технологіях. № 3 (67). С. 106-111.

87. Лукьяненко, В. М. (2015). Сепарация трудноразделимых семенных смесей. Scientific Proceedings III International Scientific and Technical Conference "Agricultural Machinery". Year XXIII. Volume 1. P. 95-98.

88. Ковалишин, С., Дадак, В., Соколюк, В., Жолобка, В. (2014). Пути усовершенствования послеуборочной подготовки семян мелкосеменных культур. MOTROL. Commission of Motorization and energetics in agriculture. Vol. 16. № 4. С. 38-44.

89. Сайтов, В. Е., Фарафонов, В. Г., Суворов, А. Н., Синяков С. В. (2011). Физико-математическое моделирование процессов разделения зерновых материалов для повышения эффективности функционирования зерно- и семяочистительных машин: монография. Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА. 176 с.

90. Козлов, В. Г. (2005). Новые пути развития магнитной очистки мелкосеменных культур. Вклад молодых ученых в решение проблем аграрной науки, материалы межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых. Ч II. Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ. С. 212-214.

91. Козлов, В. Г. (2007). Новый способ пневмомагнитной сепарации семян. Региональные проблемы повышения эффективности агропромышленного комплекса материалы всероссийской научно-практической конференции. Курск, 20-22 марта 2007 г. Ч. 2. Курск: КГСХА. С. 190-193.

92. Немцев, А. А., Немцев, И. А., Шкоденко, А. В., Тарасов, С. Н. (2010). Определение оптимальной частоты вращения барабана диэлектрического сепаратора и напряжения при сепарации яровой пшеницы Сб. тр. по мат. 54-й студенческой науч.-практ. конф. Самара: РИЦ СГСХА. С. 96-98.

93. Бутовченко, А. В. (2017). Применение механизированной очистки и фотосепарации семенного зерна и початков кукурузы в современных технологиях. Научный журнал КубГАУ. №134(10). С. 1-11.

94. Clien, С., Chiang, Y. P., Pomeranz, Y. (1989). Image analysis and characterization of cereal grains with a laser range finder and camera contour extractor. Cereal Cliem. № 6. P. 466-470.

95. Thomson, W. H., Pomerang, Y. (1991). Classification of wheal kernels using three-dimensional image analysis. Cereal Chem. 68. № 34. P. 357-361.

96. Шафоростов, В. Д., Припоров, И. Е. (2015). Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян

подсолнечника. *Международный научно-исследовательский журнал*. № 1-3 (32). С. 23-25.

97. Шаззо, А. А., Гюлушанян, А. П., Корнена, Е. П., Мхитарьянц, Л. А. (2011). Сравнительная оценка способов сепарирования рушанки подсолнечных семян и способов контроля качества ядра. *Новые технологии*. № 3. С. 75-79.

98. Kiratiratanapruk, K., Sinthupinyo, W. (2011). Color and texture for corn seed classification by machine vision. *Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. "The Decad. Intell. Green Signal Process. Commun. ISPACS*. P. 7-11.

99. Ronge, R. V., Sardeshmukh, M. M. (2014). Comparative analysis of Indian wheat seed classification. *Icacci'14*. P. 937-942.

100. Припоров, И. Е., Шафоростов, В. Д. (2015). Классификация оптических фотосепараторов для сортирования семян подсолнечника. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. Т. 10. № 1. С. 68-70.

101. Шаззо, А. Ю. (1996). Интенсификация крупяного производства на основе моделирования технологических процессов. Автореферат докторской диссертации. Краснодар. 51 с.

102. Li, J., Liao, G., Xiao, F. (2008). Rapeseed seeds colour recognition by machine vision. *Proc. 27th Chinese Control Conf. CCC*. P. 146-149.

103. Шаззо, А. Ю., Усатіков, С. В. (2012). Ефективність розпізнавання прихованої зараженості зернівок із зображень в інфрачервоному спектрі. *Вісник ОНУ. Харчова технологія*. № 4. С. 105-108.

104. Демкин П.П. Об определении типичности образцов пшеницы по цвету зерна / П.П. Демкин, В.В. Пыльнева // *Селекция и семеноводство*. – 2000. – № 4. – С.18-19.

105. Хохлов О.М. Застосування програми аналізу зображень ImageJ в дослідженнях об'єктів сортовивчення / О.М. Хохлов // *Виноградарство і виноробство. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Спец. випуск*. – Одеса, 2009. – С. 179-185.

106. Цевма В.М. Морфометрическая характеристика зерен пшеницы средствами «Машинного видения» / В.М. Цевма, А.Н. Хохлов // *Сборник научных трудов СГИ*. – Одесса, 2009. – Вып. 14 (54). – С. 182-189.

107. Коруняк А.П. Морфометрическая и колометрическая характеристика зерен ячменя их цифровыми изображениями / А.П. Коруняк, В.М. Цевма, А.Н. Хохлов // Сборник научных трудов СГИ - НЦНС. – Одесса, 2011. – Вып. 17 (57). – С. 143-150.

108. Цевма В.М. Инструментальное определение сортоспецифичных характеристик цвета зерна пшеницы / В. Цевма, А.Н. Хохлов // Сб. науч. трудов СГИ. – Одесса, 2007. – Вып. 10 (50). – С. 116-135.

109. Припоров, И. Е. (2015). Сортирование семян подсолнечника на фотосепараторе. Сельский механизатор. № 3. С. 12-13.

110. Усатиков, С. В., Горонков, К. А., Руденко, О. В. (2011). База данных обучающей выборки для высокоточного распознавания плоских изображений сортов злаковых и масличных культур. Журнал «Фундаментальные исследования». Москва. Вып.8. Часть 2. С. 342-346.

111. Руденко, О. В., Усатиков, С. В. (2011). Нейросетевое распознавание в технических системах зерноперерабатывающей и пищевой промышленности. Современные проблемы науки и образования. № 3. С. 1-8.

112. Mira Park, Jesse S. Jin, Sherlock L. Au, Suhuai Luo, Yue Cui1 (2009). Automated Defect Inspection Systems by Pattern. Recognition International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. Vol. 2. No. 2. P. 31-41.

113. Домасев, М. В., Гнатюк, С. П. (2009). Управление цветом, цветовые расчеты и измерения. Спб.: Питер. 2009. 224 с.

114. Гонсалес, С., Вудс, Р. (2005). Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 1072 с.

115. Пронин, С. П. (2001). Оценка качества информационно-измерительной оптико-электронной системы. Барнаул: Издательство АлтГТУ. 125 с.

116. Сухін, В. С., Чернобай, І. В., Калічава, Г.Т. (2018). Патент на корисну модель UA 122770 U, МПК В07В 4/02 (2006.01), А01F 12/44 (2006.01). Універсальний аеродинамічний сепаратор серії "Сад" з додатковим очищенням зернового матеріалу. Заявник Сухін В. С., Чернобай І. В., Калічава Г.Т. № u 2017 07797. Заявл. 24.07.2017. Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.

117. Сухін, В. С., Чернобай, І. В., Калічава, Г. Т. (2018). Патент на винахід UA 116073 C2, МПК В07В 4/02 (2006.01), В07В 11/06 (2006.01), В07В 11/08 (2006.01), А01F 12/44 (2006.01). Спосіб сепарації з додатковим очищенням зернового матеріалу та аеродинамічний сепаратор "Сад" для його реалізації. Заявник Сухін В. С., Чернобай І. В., Калічава Г.Т. № а 2017 01824. Заявл. 27.02.2017. Опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2, 2018 р.

118. Фадєєв, Л. В. (2008). Патент на корисну модель UA 36999 U, МПК В07В 4/02 (2008.01). Струминний сепаратор Фадєєва. Заявник Фадєєв Л. В. № u200808062. Заявл. 13.06.2008. Опубл. 10.11.2008, Бюл. № 10.

119. Гапонюк, О. І., Гросул, Л. Г., Мосієнко, Г. А., Яцкова, Т. Й., Гончарук, Г. А. (2011). Патент на корисну модель UA 63368 U, МПК В07В 4/04 (2006.01). Повітряно-гравітаційний сепаратор. Заявник Одеська національна академія харчових технологій. № u201102177. Заявл. 24.02.2011. Опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.

120. Сухін, В. С., Чернобай, І. В., Калічава, Г. Т. (2017). Патент на корисну модель UA 119017 U, МПК В07В 4/02 (2006.01) А01F 12/44 (2006.01). Аеродинамічний сепаратор "Сад" з додатковим очищенням зернового матеріалу. Заявник Сухін В. С., Чернобай І. В., Калічава Г.Т. № u 2017 01874. Заявл. 27.02.2017. Опубл. 11.09.2017, Бюл. № 17.

121. Кирпа, М. Я., Скотар, С. О., Рослик, О.О. (2014). Дослідження процесу та параметрів аеродинамічного сепарування однокомпонентних насінневих сумішей. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. № 2 (34). С. 95-98.

122. Гросул, Л. Г., Гапонюк, О. І., Мосієнко, Г. А., Яцкова, Т. Й., Гончарук, Г. А. (2011). Повітряно-гравітаційний сепаратор для попередньої обробки збіжжя. Зернові продукти і комбікорми. № 2 (42). С. 40-42.

123. Рудь, А. В., Дуганець, В. І., Павельчук, Ю. Ф., Мошенко, І. О., Мельник, В. В. (2013). Результати дослідження технологічної доцільності використання аеродинамічних сепараторів. Збірник наукових праць. За редакцією доктора с.-г. наук, професора, академіка АН ВО України,

Заслуженого діяча науки і техніки України, ректора університету (голова) М.І. Бахмата. № 21. Кам'янець-Подільський. С. 372-377.

124. Михайлов, А. Д. (2012). Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння. Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка. 78 с.

125. Міщенко, М. І., Ріда, В. П. (2000). Патент на корисну модель UA 553 U, МПК (2006) B07B 9/00. Зерноочищувальний сепаратор. Заявник Відкрите акціонерне товариство "Хорольський механічний завод". № 99105723. Заявл. 19.10.1999. Опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4.

126. Савицький, С. М., Колісник, С. О., Дубовецький, А. О. (2018). Патент на корисну модель UA 127890 U, МПК (2018.01) B07B 1/00. Сепаратор зерноочисний. Заявник Савицький С. М., Колісник С. О., Дубовецький А. О. № u 2018 02500. Заявл. 12.03.2018. Опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

127. Іхно, М. П. (2001). Патент на винахід UA 20833 C2, МПК 6B07B1/00, B07B1/46. Калібрувальна машина. Заявник Харківський державний політехнічний університет. № 95031343. Заявл. 27.03.1995. Опубл. 15 02.2001, Бюл. № 1.

128. Фалько, О. Л., Заплетніков, І. М. (2007). Патент на корисну модель UA 24984 C2, МПК B07B 13/04 (2007.01). Універсальна калібрувальна машина. Заявник Донецький державний університет економіки і торгівлі ім. М. Туганбарановського. № u200701558. Заявл. 14.02.2007. Опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11.

129. Іхно, М. П., Фадеев, Л. В. (2002). Патент на винахід UA 51792 C2, МПК 6B07B1/46. Калібрувальна машина. Заявник Харківський державний політехнічний університет, Акціонерна компанія "Контакт". № 99126926. Заявл. 20 12 1999. Опубл. 16 12 2002, Бюл № 12.

130. Фадеев, Л. В. (2011). Патент на корисну модель UA 58428 U, МПК (2011.01) B07B 13/00. Очищально-калібрувальна машина. Заявник Фадеев Л. В. № u201011738. Заявл. 04.10.2010. Опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.

131. Фадеев, Л. В., Приходькін, О. С. (2003). Патент на корисну модель UA 1951 U, МПК 7 B07B1/46. Калібрувальна машина Км-Ласко. Заявник Фадеев Л. В. № 2002129898. Заявл. 10 12 2002. Опубл. 15 08 2003, Бюл № 8.

132. Бакум, М. В., Леонов, В. П., Горбатовський О. М., Бакум, М. М., Бобро Н. Г. (2009). Патент на корисну модель UA 41458 U, МПК B07B 1/40

(2009.01). Віброрешітний сепаратор. Заявник Фадеєв Л. В. № u200814237. Заявл. 10.12.2008. Опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.

133. Верещинський, О. П. (2017). Патент на винахід UA 115191U, МПК (2017.01), A01F 12/44 (2006.01), B07B 1/00. Ситовий сепаратор. Заявник Верещинський О. П. № а 2016 03746. Заявл. 07.04.2016. Опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

134. Ловейкін, В. С., Кулик, В. П. (2012). Патент на винахід UA 97155 C2, МПК A01F 12/44 (2006.01), B07B 1/28 (2006.01). Зерноочисна машина. Заявник Національний університет біоресурсів і природокористування України № а200913871. Заявл. 29.12.2009. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

135. Галкин, В. Д., Хавыев, А. А., Хандриков, В. А., Грубов, К. А., Галкин, С. В. (2017). Оценка работы вибропневмосепараторов усовершенствованной конструкции при очистке семян от низконатурных примесей. Пермский аграрный вестник: научно-практический журнал. №1 (7). С. 65-72.

136. Galkin, V., Hanlrikov, V., Kozlovskiy, I. (2012). Increase of efficiency of cleaning of seeds on a vibration pneumatic separator. Механизация на земеделието (София). №4. С. 7-10.

137. Бурков, А. И., Сычуглов, Н. П. (2000). Зерноочистительные машины: Конструкция исследования, расчёт и испытания. Киров: НИИСХ Северо-Востока. 258 с.

138. Халанский, В. М., Горбачёв, И. В. (2004). Сельскохозяйственные машины. М: «КолосС». 624 с.

139. Пивень, В. В., Уманская, О. Л. (2007). Определение динамических параметров несущих конструкций вибрационных машин, установленных на упругом основании. Вестник машиностроения. № 5. С. 14-16.

140. Бартенев, В. А., Бортников, А. И., Марков, В. Е., Жихарев, С. В. (1973). А. с. 384562 СССР, МКИЗ В 07b 4/08. Пневматический сортировальный стол для сыпучих смесей. № 1675999/28-13. Заявл. 29.06.71. Опубл. 29.05.73, Бюл. № 25. 3 с.

141. Захарченко, С. В., Гриценко, В. Т. (2007). Патент на винахід 80700 UA, МПК B03B 4/00 (2006), B07B 1/46 (2006) Вібропневмосепаратор. Заявник

Захарченко С. В., Гриценко В. Т. № а 20041008858; Заявл. 02.11.2004. Оpubл. 25.10.2007, Бюл. № 17.

142. Захарченко, С. В., Мельничук, Б. О., Гриценко, В. Т. (2006). Патент на винахід 75105UA, МПК В07В 4/08 (2006.01), В03В 4/00. Вібропневмосепаратор. Заявник Захарченко С. В., Мельничук Б. О., Гриценко В. Т. № а 2003076106. Заявл. 01.07.2003. Оpubл. 15.03.2006, Бюл. № 3.

143. Фадєєв, Л. В. (2011). Патент на корисну модель UA 56298 U, МПК (2011.01) В03В 4/00, В07В 7/00, В07В 11/00. Пневматичний сортувальний стіл. Заявник Фадєєв Л. В. № u201007265. Заявл. 11.06.2010. Оpubл. 10.01.2011, Бюл.№ 1.

144. Сухонкин, Л. М., Венков, С. А., Шкарупин, В. С., Хабрат, Н. Н., Чепрасова З. М. (1980). А. с. 774621, МПК В 07 В 4/08. Пневмосортировальный стол. Заявник Всеуэный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения им. В. П. Горячкина и Головное специализированное конструкторское бюро по комплексу машин для послеуборочной обработки зерна № 2155881/29-03. Заявл. 11.07.1975. Оpubл. 30.10.1980, Бюл.№ 40.

145. Захарченко, С. В., Мельничук, Б. О., Гриценко, В. Т. (2006). Патент на корисну модель UA 75105 С2, МПК (2006) В03В 4/00, В07В 4/08 (2006.01). Вібропневмосепаратор. Заявник Захарченко, С. В., Мельничук, Б. О., Гриценко, В. Т. № 2003076106. Заявл. 01.07.2003. Оpubл. 15.03.2006, Бюл. № 3.

146. Тищенко, А. И. (1999). Фотоэлектронные сепараторы и создание нового поколения отечественных продуктов питания повышенной пищевой и биологической ценности. В вестнике АлтГТУ. прил. к журналу «Поязуновский альманах». Барнаул, АлтГТУ. С. 112.

147. Бутковский, В. А., Мерко, А. И., Мельников, В. М. (1999). Технологии зерноперерабатывающих производств. Учебник. М.: Ингеграф сервгю. 472 с.

148. Gulling Michael John, Blurray Benedict Mark. (1981). Sorting objects. Gunson`s Sortex Ltd. Заявка Великобритании, кл. В 07 С 5/342, G 01 И 21/00. НКИ G 1 А, N2091415. Заяви 19.01.81 N8101541. Оpubл. 28.07.82.

149. Galling Michael John, Deefholts Murray Benedict Mark. (1981). Sorting objects. Gunson`s Sortex Ltd. Заявка Великобритании, кл. В 07 С 5/02, G 01 N 21/00, НКИ. G 1 А. Заявл. 19.01.81, N 8101542. Оpubл. 28.07.82.

150. Lockett James F. (1982). Univeisal sorting apparatus. Патент США, кл. В 07 С. 5/342, НКИ 209/564, N4344539. Заявл. 05.05.78, N 903050. Оpubл. 17.08.82.

151. Акама Масару, Нагао Юдзи, Окура Йосиаки. (1982). (Синко денки к.к.). Японская заявка, кд. В 07 С 5/10, В 07 С 5/342, N57-10380, заявл. 23.06.80, N55-85401, опубл 19.01.82.

152. Сатаке Восикико. (1980). (К.к. Сатаке сэйеакусе). Японская заявка, Кл. В 07 С 5/342, В 07 В 13/18, N55-86575. Заявл. 2.12.78, N 53-162901. Оpubл. 30.06.80.

153. Сатаке Восикико. (1981). (К.к. Сатаке сэйеакусе). Японская заявка, кл. В 07 С 5/342 N56-15879. Заяви 19.07.79 N 54-92258. Оpubл. 16.02.81.

154. Runmann, K. (1990). Beaiigong durch elektronische Farb-sortierung. Muhle Mischfutter-fechn. 1990. 127, №19. P. 244-245.

155. Osborne, D. Y., Verfrand, D. (1992). Image analysis and spectroscopic techniques. Rapp 9 Congr. Int. Cereals et pain, Paris, 1-5 juin 1992. Ind. cereal. № 77. P. 10-12.

156. Чиркова, Л. В., Николенко О. И. (1995). Создание отечественного фотоэлектронного сепаратора. Научно-теор. конференция «Научные основы прогрессивных технологий хранения и переработки сельхозпродукции для создания продуктов питания человека», Углич, 9-12 окт. 1995. Углич. С. 387-388.

157. Аверин, А., Казешюв, В., Чиркова, Л. (1992). Сепарирование зернопродуктов по цвету. Хлебопродукты. № 6. С. 10.

158. Чиркова, В. (1993). Классификация фотоэлектронных сепараторов. Хлебопродукты. 1993. № 2. С. 23.

159. Припоров, И. Е. (2014). Классификация фотоэлектронных сепараторов для сортирования семенного материала. Научное обеспечение агропромышленного комплекса, посвященной 110-летию П.Ф. Варухи: Материалы 8-й всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых (26-28 ноября 2013г. и 2–4 декабря 2014 г.). Краснодар: КубГАУ. Т. 1. С. 535–536.

160. Джус, М. І., Войтович, П. Й., Смолій, О. Ф., Лозін, А. А., Стригунов, П. М., Корнійчук, А. С. (2005). Деклараційний патент на корисну модель 8148 UA, МПК G01N 21/27 (2006.01) Сепаратор оптичний. Заявник Науково-виробнича фірма "Продекологія". № u200500732. Заявл. 27.01.2005. Опубл. 15.07.2005. Бюл. № 7, 2005 р.

161. Чуйко Г. В., Шульгін В. А., Бабішов Е. М., Гольдфарб В. А., Мінаков Д. А., Пахомов Г. В., Соколова О. В., Стригін В. Д., Чуриков А. А.; заявник Чуйко Г. В. (2016). Патент на винахід UA 112246 C2, МПК B03B 13/02 (2006.01), B07C 5/34 (2006.01), G01N 21/88 (2006.01), G07D 5/02 (2006.01) Оптоволоконний лазерний сортувальник. № а 2015 02458. Заявл. 13.02.2014. Опубл. 10.08.2016. Бюл. № 15, 2016 р..

162. Jahnke, S., Roussel, J., Hombach, T., Kochs, J., Fischbach, A., Huber, G., Scharr, H. (2016). phenoSeeder – A robot system for automated handling and phenotyping of individual seeds. *Plant Physiology* 172. P. 1358-1370.

163. Тіщенко, Л. М., Харченко, С. О., Харченко, Ф. М., Бакум, М. В., Абдуєв, М. М., Борщ, Ю. П., Коршунов, К. С. (2015). Патент на корисну модель UA 101069 U, МПК (2015.01) G01B 11/00 G01B 11/02 (2006.01). Спосіб визначення розмірів насіння. № u 2015 01890. Заявл. 03.03.2015. Опубл. 25.08.2015, Бюл. № 16.

164. Бакум, М. В., Манчинський, Ю. О., Горбатовський, О. М., Леонов, В. П., Путівцев, А. А., Приз, К. Л. (2006). Деклараційний патент на корисну модель UA 13868 U, МПК (2006) B07B 01/00. Спосіб визначення розмірних характеристик насіння. № u200510506. Заявл. 07.11.2005. Опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

165. Рингенбах, А., Лойенбергер, Я. А. (2006). Патент RU 2388203, МПК A01C1/00 (2006.01). Устройство для определения однородности партии семян. № 2007130533/13. Заявл. 09.01.2006. Опубл. 10.05.2010.

166. Лисицын, А. Н., Быкова, С. Ф. (2006). Особенности технологических свойств отечественных сортов и гибридов семян подсолнечника современной селекции. *Масложировая промышленность*. № 4. С. 34-37.

167. Barrozo, M., Silva, A., Oliveira, D. (2008). The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed. *Journal of Stored Products Research*. 2008. Vol. 44. P. 65-70.

168. Baumler, E., Cuniberti, A., Nolasco, S., Riccobene I. (2006). Moisture dependent physical and compression properties of safflower seed. *Journal of Food Engineering*. Vol. 72. P. 134-140.

169. Gupta, R. K., Das, S. K., (2000). Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive Loading. *J. Food Eng.* 46. P. 1-8.

170. Khazaei J., Sarmadi, M., Behzad, J. (2008). Physical properties of sunflower seeds and kernels related to harvesting and dehulling. *Lucrari Stiintifice*. P. 49.

171. Ягло М.Н. Маркерные признаки льна / М.Н. Ягло, В.А. Лях // *Науково-технічний бюлетень ІУК. – Запоріжжя, 2007. – Вип.12. – С. 86-91.*

172. Ayoub Bagvand. (2013). Determination of Physical Properties and Mechanical Behavior of Sunflower seeds. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. Vol. 5(11). p. 1255-1259.

173. Škoric, D., Seiler, G. J., Liu, Z., Jan, C. C., Miller, J. F., Charlet, L. D. (2012). *Sunflower genetics and breeding: international monograph*. Novi Sad: Serbian Academy of Sciences and Arts. Branch. 520 p.

174. Ревенко, В. Ю., Фролов, С. С. (2015). Физико-механические свойства семян подсолнечника современной селекции. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. № 12-6. М.: Научно-информационный издательский центр и редакция журнала "Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук". С. 8-14.

175. Ionescu, M., Voicu, Gh., Biriş, S., Ştefan, E. M., Ungureanu, N., Dincă, M. N. (2016). Determination of some mechanical properties for oilseeds using uniaxial compression tests. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 49, No. 2. INMA Bucharest. P. 71-76.

176. Білокопитов, О. О. (2012). Аналіз результатів визначення критичної швидкості та коефіцієнту парусності складових зернового вороху. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь. Вип. 2. Т. 5. С. 198-207.*

177. Береснева, Н.Д. (2013). Характеристика крупноплодных гибридов подсолнечника. VII международная конференция молодых ученых и специалистов, ВНИИМК. С. 20-23.

178. Mohammad Reza Seifi, Reza Alimardani. (2010). Moisture-Dependent Physical Properties of Sunflower Seed (SHF8190). Modern Applied Science. Vol. 4, No. 7. Published by Canadian Center of Science and Education. P. 135-143.

179. Ghodsevali, A., Vafaei, A. (2008). Studying of physical properties of sunflower in Golestan province. The fifth conference of agricultural machinery and mechanization, Mashad, Iran, 306 p.

180. Gupta, R. K., Das, S. K. (1997). Physical properties of sunflower seeds. Journal of Agricultural Engineering Research. № 66. P. 1-8.

181. Sahebeh Jafari, Javad Khazaei, Akbar Arabhosseini, Jafar Massah, Mohammad Hadi Khoshtaghaza. (2011). Study on mechanical properties of sunflower seeds. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Volume 14. Issue 1. P. 1-11.

182. Chavoshgoli, Es., Abdollahpour, Sh., Abdi, R., Babaie, A. (2014). Aerodynamic and some physical properties of sunflower seeds as affected by moisture content. Agric Eng Int: CIGR Journal. Vol. 16. No.2. P. 136-142.

183. Jafari, S. (2008). Design and construction a laboratory sunflower seed dehuller machine. A thesis submitted to Graduate Studies Office in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanic of Agricultural Machinery. Tehran, Iran, (in farsi).

184. Khodabakhshian, R., B. Emadi, M. H. Abbaspour Fard. (2009). Aerodynamic properties of sunflower seed, kernel and its hull affected by moisture content and size, azargol variety as a case study. International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand.

185. Михайлов, Є. В., Задосна, Н. О. (2015). Аеродинамічні властивості складових олійної сировини соняшнику. Праці ТДАТУ. Випуск 15. Том 4. С. 28-38.

186. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2012). Колебания зерновых потоков на виброрешётах. Харьков: "Міськдрук". 267 с.

187. Тищенко, Л. Н. (2001). Гидродинамические характеристики псевдооживленных сыпучих сред при виброцентробежном сепарировании на зерноперерабатывающих предприятиях. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ. Вип. 5. С. 13-33.

188. Тищенко, Л. Н., Абдуева, Ф. М., Ольшанский, В. П. (2008). Сравнение двух способов вычисления коэффициента вибровязкости псевдооживленной зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании. Вибрации в технике и технологиях. № 1 (50). С. 96-100.

189. Тищенко, Л. Н., Пивень, М.В., Харченко, С.А., Бредихин В.В. (2009). Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решётами. Вісник ХНТУСГ: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Харків: ХНТУСГ. Вип. 88. С. 34-44.

190. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2009). К расчёту движения зерновой смеси по вертикальному цилиндрическому решету вибросепаратора. Вібрації в техніці та технологіях. № 2(54). С. 50-55.

191. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2009). О влиянии поперечных колебаний плоского наклонного решета на движение сепарируемой зерновой смеси. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ. Вип. 9, Т.2. С. 131-139.

192. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2011). Гармонические колебания сепарируемой зерновой смеси при неравномерном вращении цилиндрического решета. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. №45. С. 135-140.

193. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2011). Математическая модель движения зерновых смесей по вертикальным решётам виброцентробежных сепараторов. Тракторы и сельскохозяйственные машины. №7. С. 35-38.

194. Тищенко, Л. Н., Ольшанский, В. П., Ольшанский, С. В. (2010). О применении уравнений движения неоднородной вязкой жидкости в моделях сепарирования зерна. Вісник ХНТУСГ: Механізація сільськогосподарського виробництва та переробки сільськогосподарської продукції. Харків: ХНТУСГ. Вип. 103. С. 320-326.

195. Ковриков, И. Т., Тавтилов, И. Ш. (2002). Совершенствование воздушных сепараторов зерна. Тез. докл. региональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Оренбургской области. Оренбург: ИПК ОГУ. С. 60-61.

196. Ковриков, И. Т., Тавтилов, И. Ш. (2003). Обоснование оптимальных параметров питателей воздушных сепараторов зерна. Оптимизация сложных биотехнологических систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Оренбург: ОГУ. С. 89-94.

197. Ковриков, И. Т., Тавтилов, И. Ш. (2003). Влияние способа подачи зерна на равномерность воздушного потока пневмоканала зернового сепаратора [текст]. Союз науки с производством – основа длительного успеха в рыночных условиях. Труды Оренбургского регионального отделения Российской инженерной академии. Выпуск 3. Оренбург. С. 120-126.

198. Ковриков, И. Т., Тавтилов, И. Ш. (2004). Повышение равномерности распределения семян по сечению пневмоканала и совершенствование питателей зерновых сепараторов. Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 7. С. 9-11.

199. Ковриков, И. Т., Тавтилов, И. Ш. (2005). Оптимизация конструкций устройств для ввода зерна в воздушных сепараторах. Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития пищевой промышленности России». Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ. С. 18-21.

200. Галкин, А. Д., Галкин, В. Д., Гузаиров, А. М. (2001). Методы и средства повышения эффективности послеуборочной обработки зерна и семян (для хозяйств Среднеуральского региона) Рекомендации. Пермь: Пермский филиал ВНИИМ. 84 с.

201. Галкин, В. Д. (2001). Зерноочистительные машины: настройка сепарирующих рабочих органов и повышение эффективности их использования по усовершенствованной технологии разделения зерновых смесей на поточных линиях производительностью 5,10,20 т/ч. Пермь: Пермская ГСХА. 36 с.

202. Галкин, В. Д., Разумков, А. В., Соловьев, В. П. (2000). Результаты экспериментальных исследований универсальной малогабаритной зерноочистительной машины. Социально-экономические основы эффективности технических систем, земельных и производственных ресурсов. Пермский аграрный вестник. Научно-производственный сборник. Вып. IV. часть II, Пермь. С. 61-62.

203. Галкин, В. Д. (2001). Моделирование технологического процесса цилиндрического решета с переменной скоростью вращения. Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Совершенствование технологии и технических средств механизации сельского хозяйства. Пенза. РИО. Пензенская ГСХА. С. 162-164.

204. Сечкин, В. С., Галкин, А. Д., Галкин, В. Д. (2003). Повышение эффективности подготовки семенного материала. /Механизация и электрификация сельского хозяйства. №6. С. 9-10.

205. Фоминых, А. В., Фомина, С. В., Шевцов, И. В. (2007). Расчет движения зерна по решетам, совершающим колебания в своей плоскости. Материалы XLVI международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Часть 2. Челябинск ЧГАУ. С. 168-172.

206. Фоминых, А. В., Шевцов, И. В. (2006). Методика расчета процесса сепарирования вороха на решетке. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора К. Г. Колганова. Т. 1. Челябинск ЧГАУ. С. 194-200.

207. Шевцов, И. В. (2007). Решета проволочно-сварной конструкции с круглыми перемичками. Аграрный вестник Урала. №2. С. 46-52.

208. Тищенко, Л. Н., Пивень, М. В., Харченко, С. А. (2007). Исследование закономерностей пористости зерновых смесей при сепарировании плоскими

вибрационными решетками. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Вип. 58. С. 22-29.

209. Тищенко, Л. Н., Миняйло, А. В., Пивень, М. В., Харченко, С. А. (2007). Исследования послыоного движения зерновых смесей на плоских вибрационных решетках. Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. Вип. 59. С. 69-76.

210. Тищенко, Л. Н., Пивень, М. В., Харченко, С. А., Бредихин, В. В. (2009). Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решетками. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Вип. 88. С. 34-43.

211. Харченко, С. А., Тищенко, Л. Н. (2013). Алгоритм расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдожидкости, моделирующей сепарируемую зерновую смесь. Вібрації в техніці та технологіях. №2 (70). С. 64-72.

212. Харченко, С. А. (2013). Построение решений уравнений динамики зерновых смесей на плоских виброрешетах. Конструювання, виробництво та експлуатація с.г. машин: Вісник КНТУ. Вип. 43, ч. II. С. 287-292.

213. Харченко, С. А. (2014). К построению уравнений динамики стационарных потоков в псевдоожигенном зерновом слое на структурных виброрешетах. Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. Харків: ХНТУСГ. Вип. 148. С. 181-186.

214. Харченко, С. А. (2014). К построению трехмерной гидродинамической модели динамики пузырьковой псевдоожигенной зерновой смеси по структурному виброрешету. Праці ТДАТУ. Мелітополь. Вип. 14. Т. 2. С. 80-85.

215. Харченко, С. А. (2014). К решению уравнений динамики пузырьковой псевдо-ожигенной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету. Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Вип.152. С. 109-114.

216. Харченко, С. А. (2015). К разработке гидродинамической модели движения зерновой смеси по цилиндрическому решету виброцентробежных сепараторов. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ. Вип. 158. С. 198-203.

217. Тищенко, Л., Харченко, С. (2013). К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzeszow, Vol.15, №7. P. 94-99.

218. Харченко, С., Тищенко, Л., Харченко, Ф. (2014). Решение уравнений динамики псевдооживленных зерновых смесей на структурных виброрешетах. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol. 16, №. 7. P. 111-117.

219. Харченко, С., Тищенко, Л., Борхаленко, Ю. (2015). Теория осесимметрических движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического виброрешета. MOTROL «Motorization and power industry in agriculture». Lublin-Rzeszow. Vol. 17, №7. P. 73-81.

220. Kharchenko, S. (2015). Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow. Vol. 15. № 3. P. 87-93.

221. Харченко, С. О. (2018). Концепція інтенсифікації процесів виброрешітного просіювання зернових сумішей. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Харків, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. 516 с.

222. Заика, П. М. (1998). Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. Киев: УСХА. 625 с.

223. Заика, П. М. (1967). Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчет. Москва: Машиностроение. 144 с.

224. Котов Б. І. та ін. (2017). Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення,

сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження). Колект. монографія. Київ; Ніжин. 551 с.

225. Котов, Б. І., Степаненко, С. П., Швидя, В. О. (2016). Технологічні аспекти сепарації зерна у вертикальному каналі. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 46. С. 154-159.

226. Котов, Б. І., Спирін, А. В., Твердохліб, І. В., Степаненко, С. П., Швидя, В. О. (2017). До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів. Техніка, енергетика, транспорт АПК. № 4. С. 51-55.

227. Котов, Б. І., Деревенько, І. А., Степаненко, С. П. (2017) Дослідження ефективності сепарації зернових матеріалів на ступінчастоконічному решеті вібровідцентрових машин. Вібрації в техніці та технологіях. № 2 (85). С. 99-102.

228. Дідух, В. Ф., Шолудько, П. В. (2014). Формування технологічних систем в агропромисловому комплексі. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. № 2. С. 38-42.

229. Дідух, В. Ф., Бабарика, С. Ф., Сацюк, В. В., Поліщук, М. М., Хомич, Ю. А. (2014). Дослідження впливу збурюючих сил на коливання машини. Сільськогосподарські машини. Вип. 27. С. 42-48.

230. Кірчук, Р. В., Дідух, В. Ф., Сацюк, В. В. (2017). Моделювання енергозберігаючих методів сушіння насіння бобових культур. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Випуск 27. С. 158-168.

231. Ягелюк, С.В., Дідух, В.Ф., Кірчук, Р.В. (2019). Дослідження процесів збирання льону олійного з використанням стеблової частини врожаю. Товарознавчий вісник. Випуск 12. С. 282-295.

232. Завгородний, А. И., Обыхвист, А. В. (2018). Особенности сепарации зерновых смесей на малогабаритных деках вибросепаратора. Сучасні напрямки технології та механізм процесів ПХВ: програма ХІХ Міжнар. наук.-практ. конф. / матеріали конф. ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків. С. 12.

233. Kharchenko, S., Kovalishin S., Zavgorodniy, A., Kharchenko, F., Mikhaylov Y. (2018). Intensification of sifting of flat grain on sieves of grain-cleaning machines. INMATEN – Agricultural Engineering. № 3. Vol. 56. P. 39-56.

234. Завгородний, А. И., Хессро Монтасер. (2015). Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей. Інженерія природокористування. ХНТУСГ. № 1 (3). С. 34-39.

235. Завгородний, А. И. (1992). Очистка решет в зерноочистительных машинах монография. К. : Изд-во УСХА. 180 с.

236. Завгородний, А. И., Шептур, А. А., Монтасер Хессро, Обыхвост, А. В. (2017). Обоснование параметров процесса вибросепарации семян на малогабаритных деках. Інженерія переробних і харчових виробництв: наук. Журнал. ННІ ПХВ, ХНТУСГ. Харків: Планета-прінт. № 2(1). С. 31-36.

237. Єрмак, В.П. (2009). Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.05.11; Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. 39 с.

238. Єрмак, В.П. (2003). Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11; Луган. держ. аграр. ун-т. Луганськ. 19 с.

239. Захаров, С. Е. (2018). Параметры и режимы работы горизонтального цилиндрического решета с планетарным вращением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Новосибирск, Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН. 155 с.

240. Хессро, М. Х. (2015). Обоснование параметров процесса вибросепарации гороха на деках с криволинейными рабочими поверхностями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. Харьков, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко. 230 с.

241. Завгородний, А. И., Монтасер, Хессро. (2015). Определение рациональной интенсивности колебаний рабочих органов вибросепаратора зерновых смесей. Інженерія природокористування: Науковий журнал. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. Вип. 2. С. 32-39.

242. Завгородний, А. И., Монтасер, Хессро. (2013). Периодический виброударный режим движения сферической частицы по дуге параболы. *Агробіологія: Збірник наукових праць Білоцерківського НАУ. Біла Церква. Вип. 11 (104). 2013. С. 161-167.*

243. Богомоллов, О. В., Сафонова, О. М., Перцевий, Ф. В., Тищенко, Л. М., Верешко, Н. В., Фоміна, І. М., Денисенко, С. А., Іванюк, О. К., Заїка, В. П. (2000). *Технологія переробки продукції рослинництва: Навч. посібник / За ред. О.В. Богомоллова. Харків: НМЦ ХДТУСГ. 349 с.*

244. Богомоллов, О. В., Краснобаєв, В. А. (2001). *Основи теорії технічних систем: Навч. посібник. Харків: НМЦ ХДТУСГ. 267 с.*

245. Богомоллов, А. В., Перцевой, Ф. В., Сафонова, О. Н., Тищенко, Л. Н., Верешко, Н. В., Фомина, И. Н., Денисенко, С. А., Машкин, Н. И., Гринченко, О. Н., Федак, Н. В., Крайнюк, Л. Н., Заика, В. П., Токолов, Ю. И. (2001). *Переработка продукции растительного и животного происхождения. Под ред. А. В. Богомоллова, Ф. В. Перцевого. СПб: ГИОРД. 336 с.*

246. Богомоллов, А. В. (2003). Движение частиц детерминированных форм поперечного сечения (эллипс, оживал) по движущемуся профилю наименьшего сопротивления. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 4. С. 21-26.*

247. Богомоллов, А. В. (2003). Сепарация трудноразделимых смесей с использованием эффекта Магнуса. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХДТУСГ. Харків: ХДТУСГ. Вип. 22. С. 5-21.*

248. Богомоллов, А. В. (2006). *Наукове обґрунтування енергозберігаючих процесів та обладнання для сепарації харчової сипкої сировини. Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних науки по спеціальності 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. Харків, Харківський державний університет харчування та торгівлі. 277 с.*

249. Дондокова, Г. Ж., Ямпілов, С. С. (2006). *Описание процесса просеивания частиц зернового материала в отверстия решет круглой формы.*

Материалы III международной конференции «Проблемы механики современных машин» - Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ. С. 176-179.

250. Дондокова, Г. Ж., Ямпиров, С. С. (2007). Вероятность просеивания частиц зернового материала в отверстия решет. Сб научных трудов Серия «Технология и средства механизации в АПК». Вып 3. Улан-Удэ Изд-во: ВСГТУ. С. 7-13.

251. Дондокова, Г. Ж. (2007). Обоснование основных параметров каскадного решетного сепаратора для очистки зерна со ступенчатым зазором. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Улан-Удэ, Восточно-Сибирский государственный технологический университет. 133 с.

252. Катченков, С. А., Милохина, А. В., Милохин, В. К. (2009). Определение диапазонов частот вращения молотильно-очесывающих роторов роторного сепаратора влажного льновороха. VI Кирилло-Мефодиевские чтения. Материалы научно-практической конференции: сб. науч. тр. Крестьянский государственный университет имени Кирилла и Мефодия-Луга: Изд-во Крестьянский государственный университет имени Кирилла и Мефодия. С. 98-101.

253. Волошин, Ю. И., Милохина, А. В., Катченков, С. А., Милохин, В. К., Жуков, А.А. (2009). Расчет коэффициента сепарации льняного вороха молотильно-очесывающим роторным сепаратором с активным подбарабаньем. Техника в сельском хозяйстве. № 3. С. 11-13.

254. Милохина, А. В. (2010). Повышение эффективности процесса сепарации льняного воровоха путем обоснования параметров и режимов работы роторного сепаратора. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Санкт-Петербург, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия». 198 с.

255. Шафоростов, В. Д., Перетягин, Е. А. (2007). Моделирование процесса сепарации семян подсолнечника в семяочистительном агрегате. Масличные культуры. Науч. тех. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. 1 (136). С. 97-111.

256. Шафоростов, В. Д., Перетягин, Е. А. (2007). Математическая модель процесса сепарации семян подсолнечника на пневмосортировальном столе. Масличные культуры. Науч. тех. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. 1 (136). С. 112-117.

257. Перетягин, Е. А. (2009). Технология послеуборочной обработки семян подсолнечника. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Краснодар, Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им В. С. Пустовойта». 138 с.

258. Цепляев, А. Н., Перепелкин, М. А. (2009). Теоретическое определение скоростей семян подсолнечника и примесей при разделении вороха на роторно-воздушном сепараторе. Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. № 3. С. 123-129.

259. Перепелкин, М. А. (2009). Разработка и исследование сепаратора роторно – воздушного типа для очистки вороха подсолнечника. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Волгоград, ФГОУ ВПО «Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия». 192 с.

260. Шафоростов, В. Д., Припоров, И. Е. (2011). Моделирование процесса сепарирования семян подсолнечника в вертикальном пневматическом канале ветро-решетных зерноочистительных машин. Науч.-техн. бюл. ВНИИ масличных культур. Вып. № 1 (146-147). С. 113-118.

261. Припоров, И. Е. (2012). Параметры усовершенствованного процесса разделения компонентов вороха семян крупноплодного подсолнечника в воздушно-решетных зерноочистительных машинах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 –

технологии и средства механизации сельского хозяйства. Краснодар, ГНУ ВНИИМК Россельхозакадемии. 118 с.

262. Попов, И. Ю. (2008). Теоретическая зависимость механических примесей в проходе и сходе с решета с регулируемыми отверстиями от подачи вороха подсолнечника. Аграрная наука в XXI веке : проблемы и перспективы. СГАУ им. Н. И. Вавилова. Саратов. С. 109-115.

263. Попов, И. Ю. (2012). Повышение качества очистки вороха подсолнечника при уборке за счёт применения решета с регулируемыми отверстиями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Саратов: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». 263 с.

264. Исупов, В. И. (2003). Влияние формы смежной стенки и вала внутри колеса на аэродинамические и шумовые показатели диаметрального вентилятора. *IX Międzynarodowa konferencja naukowa problemy intensyfikacji z uwzględnieniem ochrony środowiska i przepisów UE. Warszawa, 23-24 Wrzesnia. S. 424-428.*

265. Исупов, В. И. (2005). Повышение эффективности функционирования пневматического сепаратора семян. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Москва: ЗНИИСХ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого. 184 с.

266. Ермольев, Ю. И., Шелков, М. В., Московский, М. Н. (2001). Моделирование процесса сепарации сыпучих материалов в воздушно-решетной зерноочистительной машине с многоярусным решетными модулями. Труды 6-й международной научно-технической конференции по динамике технологических систем. Ростов на Дону: Издательский центр ДГТУ. С. 69-71.

267. Московский, М. Н. (2006). Интенсификация процесса сепарации семян зерновых в зерноочистительных агрегатах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 –

технологии и средства механизации сельского хозяйства. Москва: ФГОУ ВПО "Донской гос. техн. ун-т (ДГТУ)". 218 с.

268. Козлов В. Г. (2005). Совершенствование технологического процесса пневмомагнитной сепарации мелкосеменных культур. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им К. Д. Глинки. 142 с.

269. Брутто, А. Ф. (1991). Обоснование процессов, средств вымолота и очистки семян льна в селекции и семеноводстве. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.20.01 – механизация сельскохозяйственного производства. Москва: Московский ордена трудового красного знамени Институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. 150 с.

270. Сайд Эль Шахат Абдалла Эль Санди (2005). Интенсификация процесса сепарации семян подсолнечника на многоярусной решётной машине. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства. Ростов-на-Дону: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской Государственный Технический Университет» (ДГТУ). 182 с.

271. Алієв, Е. Б. (2016). Техніко-технологічне забезпечення процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур. Роль наукових досліджень в забезпеченні процесів інноваційного розвитку аграрного виробництва України. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і спеціалістів 25–26 травня 2016 р. НААН, ДУ ІЗК НААН, М-во аграр. політики та прод. України, Укр. ін-т експертизи сортів рослин. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД». С. 4-5.

272. Алієв, Е. Б., Кутіщев, В. Л. (2016). Очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. тенденції та перспективи» (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 134-135.

273. Алієв, Е. Б., Чеботарьов, В. П. (2018). Рациональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшника. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. Запоріжжя: ІОК НААН. С. 154-159.

274. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2019). Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшника. Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. №1 (92). С. 40-47.

275. Казаков, Е. Д. (1983). Зернодоведение с основами растениеводства. М.: «Колос». 288 с.

276. Gary W. Delaney, Paul W. Cleary, Marko Hilden, Rob D. Morrison. (2009). Validation of dem predictions of granular flow and separation efficiency for a horizontal laboratory scale wire mesh screen. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. Melbourne, Australia. 9-11 December. P 1-6.

277. Hans, J. Herrmann. (1993). Molecular dynamics simulations of granular materials. International Journal of Modern Physics C. Vol. 4. No. 2. P. 309–316.

278. Ferrara, G., Preti, U., Schena, G. D. (1987). Computer-aided Use of a Screening Process Model. APCOM 87. Proceeding of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries. Volume 2: Metallurgy. Johannesburg, SAIMM. P. 153–166.

279. Nail A. Gumerov, Ramani Duraiswami. (1998). Modeling of particle motion in viscous swirl flow between two porous cylinders. Proceedings of FEDSM'98 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting June 21-25. Washington, DC. P. 1–8.

280. Авраменко, М. И. (2005). О к-ε модели турбулентности. VIII Забабахинские научные чтения (5-9 сентября 2005 г.). С. 1–21.

281. Белов, И. А., Исаев, С. А. (2001). Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 108 с.

282. Jamnani Dinesh. (2009). Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Bangalore. P. 1–9.

283. Philipp Kanehl. (2010). Particle model of the Magnus effect. Bachelor Thesis. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. 35 p.

284. Гамзаев, Х. М. (2007). Моделирование движения одиночной частицы в восходящем потоке вязкопластической жидкости. Матем. моделирование. Том 19. № 3. С. 87-93.

285. Chen N. H. (1979). An Explicit Equation for Friction factor in Pipe. Ind. Eng. Chem. Fundam. Vol.18, No. 3. P. 296-297.

286. Shuai Zhang, Shigeyuki Kuwabara, Takahito Suzuki, Yoshio Kawano, Koji Morita, Kenji Fukuda. (2009). Simulation of solid–fluid mixture flow using moving particle methods. Journal of Computational Physics.. № 228. С. 2552-2565.

287. Вороненко, Б. А., Пеленко, В. В., Поляков, С. В. (2013). К вопросу об описании гидромеханического процесса осаждения твердых частиц в жидкой среде. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». № 4.

288. Johnson, K. L. (1987). Contact Mechanics. Cambridge University Press. 434 p.

289. Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco Paolo. (2004). Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. Chemical Engineering Science. № 59 (1). P. 525–541.

290. Komiwes, V., Mege, P., Meimon, Y., Herrmann, H. (2006). Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation. Granular Matter. № 8 (1). P. 41-54.

291. Pertti Broas. (2001). Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. Trans. VTT Symposium Virtual prototyping. Espoo, Finland, February 1 st. P. 73–81.

292. Bai C. (1996). Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London.

293. 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. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012). P. 1-6.
294. 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. Vol. 6. P. 411–415.
295. 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. Vol. 2. P. 41–45.
296. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. (2014). Basic Transport Phenomena in Materials Engineering. Springer. 260 p.
297. Иванец, В. Н., Бакин, И. А., Белоусов, Г. Н. (2002). Энтروпийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов. Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. №11. С. 16-18.
298. 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. Юрга.
299. Bai, C., Gosman, A. D. (1995). Development of methodology for spray impingement simulation. SAE Technical Paper Series. 21 p.
300. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. (2009). Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k-ε Turbulence Model. CFD Letters. Vol. 1(2). P. 87-94.
301. Wallin, S. (2000). Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 124 p.
302. Ведмедева, К. В., Махова, Т. В., Кирпичова, Н. М. (2017). Результат добору на крупноплідність у лінії та сорту соняшнику. Збірник наукових праць

селекційно-генетичного інституту Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення. Випуск 29 (69). Одеса. С.26–34.

303. Schiehlen, W., Eberhard, P. (2004). Technische Dynamik (in German). Stuttgart: Teubner.

304. Shabana, A. (1989). Dynamics of Multibody Systems. New York: Wiley-Interscience.

305. Alkhaldi, H., Eberhard, P. (2006). Computation of Screening Phenomena in a Vertical Tumbling Cylinder. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM),. Berlin, Germany.

306. Eberhard, P., Alkhaldi, H. (2006). Efficient Computation of Colliding Particles in a Vertical Tumbling Sorting Machine. Proceedings Second International Congress on Computational Mechanics and Simulation (ICCMS), Vol. 1. I. K. Publishing House, New Delhi, India. P. 81-87.

307. Khulief, Y., Shabana, A. (1987). A Continuous Force Model for the Impact Analysis of Flexible Multibody Systems, Mechanism and Machine Theory. Vol. 22. P. 213-224.

308. Lankarani, H., Nikravesh, P. (1990). A Contact Force Model with Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems, Journal of Mechanical Design. Vol. 112. P. 369-376.

309. Sadd, M., Tai, Q., m Shukla, A. (1993). Contact Law Effects on Wave Propagation in Particulate Materials Using Distinct Element Modeling. The International Journal of Non-Linear Mechanics. Vol. 28. No. 2, P. 251-265.

310. Luding, S. (1998). Collisions and Contacts between two Particles, Physics of Dry Granular Media. E350-NATO ASI series, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. P. 285-314.

311. Muth, B., Eberhard, P., Luding, S. (2003). Contact Simulation for Many Particles Considering Adhesion. Mechanics Based Design of Structures and Machines. Vol. 31. No. 3. P. 433-457.

312. Schäfer, J., Dippel, Wolf D. (1996). Force Schemes in Simulations of Granular Materials. Journal de Physique I. Vol. 6. P. 5-20.

313. Cundall, P., Strack, O. (1979). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*. Vol. 29. P. 47-65.
314. Luding, S., Clement, E., Blumen, A., Rajchenbach, J., Duran, J. (1994). Anomalous Energy Dissipation in Molecular Dynamics Simulations of Grains. *Physical Review E*. Vol. 50. P. 4113-4122.
315. Mao, K., Xu, Z., Wang, M., Chen, T. (2003). Efficient Computation of Particle Motions in Discrete Element Modeling of Particle Damping. Eighth International Symposium on Plasticity and Impact Mechanics. New Delhi, India. P. 994–1005.
316. Alkhaldi, H., Eberhard, P. (2007). Particle Screening Phenomena in an Oblique Multi-Level Tumbling Reservoir. A Numerical Study Using Discrete Element Simulation. *Granular Matter*.
317. Richard, G. Holdich. (2002). *Fundamentals of Particle Technology*. Midland Information Technology and Publishing. Shepshed, Leicestershire, U.K. 173 p.
318. Mester, L. (2009). The new physical-mechanical theory of granular materials. *Homonnai*. 73 p.
319. Gheorghe Voicu, Tudor Casandroi, Constantin Tarcolea. (2008). Testing Stochastic Models for Simulating the Seeds Separation Process on the Sieves of a Cleaning System, and a Comparison with Experimental Data. *Agric. conspec. sci.* Vol. 73. No. 2. P. 95-101.
320. Adel F Alenzi. (2012). Modeling of consolidation and flow of granular material under varying conditions. This dissertation Doctor of Philosophy. University of Pittsburgh. 144 p.
321. S'andor Fazekas. (2007). *Distinct Element Simulations of Granular Materials*. PhD Thesis. Budapest University of Technology and Economics Budapest. Hungary. 144 p.
322. Gunaji Ashok Sawant, V. Murali Mohan, Sandip Ashok Sawant. (2016). Study and Analysis of Deck inclination angle on Efficiency of Vibration Screen. *International Journal of Engineering Development and Research*. Volume 4. Issue 1. P. 631-635.

323. Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M. (2015). Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. M. Jahani et al. Powder Technology. No. 283. P. 32-47.

324. Cleary P.W., Fernandez J.W., Sinott M.D., Morrison R.D. (2010). Using DEM and SPH to model wet Industrial Banana Screens. Conference: Comminution '10, At Cape Town, South Africa. P. 1-24.

325. Ghosh Tathagata. (2013). Modeling of an air-based density separator. Theses and Dissertations. Mining Engineering. University of Kentucky UKnowledge. 139 p.

326. Christopher Harley Rycroft. (2007). Christopher Harley Rycroft. PhD Thesis. Massachusetts Institute Of Technology. 254 p.

327. Olumide Ogunmodimu. (2016). Developing a Mechanistic Model for Flow through a Perforated Plate with Application to Screening of Particulate Materials. PhD Thesis. University Of Cape Town. 100 p.

328. Zhanfu Li, Xin Tong. (2015). A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen. Int J Coal Sci Technol. No. 2(4). P. 299-305.

329. Mohammad Hossein Abbaspour-Fard. (2000). Discrete element modelling of the dynamic behaviour of non-spherical particulate materials. A thesis of Doctor of Philosophy. University of Newcastle upon Tyne. 275 p.

330. Mohammad Saeid Emami Naeini. (2011). Discrete Element Modeling of Granular Flows in Vibrationally-Fluidized Beds. A thesis of Doctor of Philosophy. Industrial Engineering University of Toronto. 130 p.

331. Wariam Chuayjan. (2010). Mathematical modelling of granular flows and its applications. A thesis of Doctor of Philosophy. Mahidol University. 115 p.

332. Evesque P. (1999). Statistical mechanics of granular media: An approach laboltzmann. Poudre & Grains. Vol. 6. P. 13-19.

333. Chapman, S., Cowling, T. G. (1970). The mathematical theory of non-uniform gases. Cambridge University Press.

334. Brilliantov, N. V., Pöschel, T. (2004). Kinetic Theory of Granular Gases. Oxford University Press. New York.

335. Goldshtein, A., Shapiro, M. (1995). Mechanics of collisional motion of granular materials. Part 1. General hydrodynamic equations. J. Fluid Mech. Vol. 282. P. 75-114.

336. Sergei, E. Esipov, Thorsten, Pöschel. (1997). The granular phase diagram. *J. Stat. Phys.* Vol. 86. P. 13-85.
337. T. P. C. van Noije, Ernst M. H. (1998). Velocity distributions in homogeneous granular fluids: the free and the heated case. *Granular Matter.* Vol. 1, P. 57-64.
338. Hashem Alkhalidi. (2007). Contact Investigations of Granular Mechanical Media in a Tumbling Sorting Machine. Institut für Technische und Numerische Mechanik Universität Stuttgart. 122 p.
339. Yanpei Chen. (2014). Asymmetric local velocity distribution in a vibro-fluidized granular gas and its non-classical hydrodynamic description. A thesis of Doctor of Philosophy. Ecole Centrale Paris. 159 p.
340. Carl R. Wassgren. (1997). Vibration of Granular Materials. A thesis of Doctor of Philosophy. California Institute of Technology. California. 208 p.
341. Deepak Raju Tunuguntla. (2015). Polydisperse granular flows over inclined channels. A thesis of Doctor of Philosophy. University of Twente. 190 p.
342. Wilkinson, D. R., Edwards, S. F. (1982). Spontaneous interparticle percolation. *Proc. R. Soc. Lond. A.* Vol. 381. P. 33–51.
343. Sela, N., Goldhirsch, I. (1998). Hydrodynamic equations for rapid flows of smooth inelastic spheres, to burnett order. *J. Fluid Mech.* Vol. 361, P. 41–74.
344. Ernst, M. H., Brito, R. (2002). Driven inelastic maxwell models with high energy tails. *Phy. Rev. E.* Vol. 65, P. 4.
345. McLennan, J. A. (1989). Introduction to nonequilibrium statistical mechanics. Prentice Hall. London.
346. T. P. C. van Noije, M. H. Ernst, and R. Brito. (1998). Ring kinetic theory for an idealized granular gas. *Physica A.* Vol. 251. P. 266–283.
347. P. Resibois and M. de Leener. *Classical Kinetic Theory of Fluids.* (1977). Wiley & son. New York.
348. P. P. J. M. Schram. (1991). *Kinetic Theory of Gases and Plasmas.* Kluwer Academic Publishers. AA Dordrecht.
349. J. Javier Brey, Cubero D. Ruiz-Montero M. J. (1999). High energy tail in the velocity distribution of a granular gas. *Phy. Rev. E.* Vol. 59. P. 1256-1258.

350. Losert, D. G., Cooper, W., Delour, J., Kudrolli, A., Gollub, J. P. (1999). Velocity statistics in excited granular media. *chaos*. Vol. 9. P. 682-690.
351. Hou, M., Liu, R., Zhai, G., Sun, Z., Lu, K., Garrabos, Y., Evesque, P. (2008). Velocity distribution of vibration-driven granular gas in knudsen regime in microgravity. *Microgravity Sci Technol*. Vol. 20. P. 73-80.
352. Javier Brey J., Dufty James W., Chang Sub Kim, Andr'es Santos. (1998). Hydrodynamics for granular flow at low density. *Phy. Rev. E*. Oct. Vol. 58. P. 4638-4653.
353. Haff, P. K. (1983). Grain flow as a fluid-mechanical phenomenon. *J. Fluid Mech*. Vol. 134. P. 401-430.
354. Herbst, O., Müller, P., Otto, M., Zippelius, A. (2004). Local equation of state and velocity distributions of a driven granular gas. *Phy. Rev. E*. Vol. 70. P.
355. Evesque, P. (2002). Are temperature and other thermodynamics variables efficient concepts for describing granular gases and/or flows? *Poudre & Grains*. Vol. 13. P. 20-26.
356. Baldassarri, A., Barrat, A., D'Anna, G., Loreto, V., Mayor, P., Puglisi, A. (2005). What is the temperature of a granular medium? *Condens Matter*. Vol. 17. P. S2405-S2428.
357. Goldhirsch, I. (2008). Introduction to granular temperature. *Power Technology*. Vol. 182. P. 130-136.
358. Widman, I. R. D., Parker, D. J. (2002). Coexistence of two granular temperature in binary vibrofluidized beds. *Phy. Rev. Lett*. Vol. 88. P. 64301.
359. Campbell, I. C. S. (2002). Granular flows-an overview. *Power Technol*. Vol. 162(3). P. 208-229.
360. Hutter, K., Rajagopal, K. R. (1994). On the flows of granular materials. *Contin. Mech. Thermodyn*. Vol. 6. P. 81-139.
361. Кильчевский, Н. А. (1977). Курс теоретической механики. Т. 1. Москва: Наука. 480 с.
362. Власов, М. М. (1997). Оптимізація параметрів шарнірних ножів роторного подрібнювача. *Вісник сільськогосподарської науки*. №10. С. 48-49.
363. Кореневич, Л. П. (1989). К теории движения растительных частиц по передней грани ножа. *Тр. Белорус. ин-та механиз. сел. хоз-ва*. Вып. 12. С.41-46.

364. Заика, П. М., Кросовицкий, Ю. И. (1991). Моделирование материальной точкой процессов перемещения семенных смесей. Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Вып. 21. Киев: Техника. С. 36–40.
365. Csink, L., Paulus, D., Ahlrichs, U., Heigl, B. (1998). Color normalization and object localization. *Vierter Workshop Farbbildverarbeitung*. Koblenz. P. 49-55.
366. Funt, B., Barnard, K., Martin, L. (1998). Is machine colour constancy good enough? *Computer Vision. ECCV'98*. Freiburg. Vol. 1406. P. 445-459.
367. Wang, F., Man, L., Wang, B., Xiao, Y., Pan, W. Lu, X. (2008). Fuzzy-based algorithm for color recognition of license plates. *Pattern Recognition Letters*. Vol. 29. P. 1007-1020.
368. Berlin, B., Kay, P. (1969). *Basic color terms: their universality and evolution*. University of California Press. 196 p.
369. Lammens, J. (1994). *A computational model of color perception and color naming*. Ph.D. thesis, State University of New York. Genoa. 253 p
370. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54, No. 1. P. 95-104.
371. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. №2 (97). С. 19-23.
372. Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. Житомир. №1 (58). Т.1 С. 173-180.
373. Алієв, Е. Б., Лабатюк, Ю. М. (2017). Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник*

Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. Вип. 180. С. 67-71.

374. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Результати чисельного моделювання процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. №4 (99). С. 18-23.

375. Алієв, Е. Б., Гаврильченко, О. С., Драчов А. В. (2017). Теоретичні дослідження руху насіння по лопаті барабана вібродозатора. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур» (16 листопада 2017 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 168-169.

376. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., Кутіщев, В. Л. (2017). Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур» (16 листопада 2017 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 170-171.

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

378. Aliev, E. B. (2017). Modeling of the mechanical and technological processes for the separation of oilseeds. Internationals research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference Proceedings, December 27-28, 2017–Radom, Republic of Poland. Vol. 19. No 3. P. 107-110.

379. Алієв, Е. Б. (2017). Модель системи фотоелектронного сепаратора насіннєвого матеріалу. Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України». Вип. 14. Кіровоград, КОД. С. 135-138.

380. Алієв, Е. Б. (2017). Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією вібруючого решета. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип. 47, ч. I. Кропивницький: ЦНТУ. С. 31-39.

381. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Драчов, А. В. (2017). Фізико-математична модель руху насіння по лопаті барабана вібродозатора. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка, сільськогосподарські науки, технічні науки, економічні науки. Вип. 27. Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет. С. 97-104.

382. Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючого решета. Механізація та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]. Глеваха. Вип. 6 (105). С. 97-103.

383. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математична модель процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючої поверхні. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». Вінниця: ВНАУ. № 1 (88). С. 54-59.

384. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математичний апарат гранульованого газу шару насінневого матеріалу. Технології АПК XXI століття: проблеми і перспективи розвитку: Зб. наукових-праць (17-18 травня 2018 року, м. Ніжин). За наук. Ред. В.С. Лукача [та ін.]. Ніжин. С. 285-294.

385. Алієв, Е., Яропуд В. (2018). Математична модель взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. “Вібрації в техніці та технологіях”, XVII Міжнародна науково-технічна конференція 11-12 жовтня 2018 р.: тези доповідей. Дрогобич: Посвіт. С. 28-29.

386. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Кунда, В. Г. (2018). Фізико-математичний апарат взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та

технологіях”. Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця. Вип. 3 (90) С. 5-10.

387. Алиев, Э. Б. (2018). Моделирование движения сыпучего материала под действием воздушного потока. Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции (Минск, 21–23 ноября 2018 года) / редкол.: В. П. Чеботарев [и др.]. Минск : БГАТУ. С. 126-129.

388. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.

389. Mohsenin, N. N. (1980). Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc. P. 51-87.

390. Aydin, C. (2003). Physical properties of almond nut and kernel. New Food Eng. Vol. 60. P. 315-320.

391. McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P. (1986). Unit operations of chemical engineering. McGraw-Hill Book Co, New York.

392. Jain, R. K., Bal S. (1997). Properties of pearl millet. Journal of Agricultural Engineering Research. P. 85-91.

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

394. Singh, K. K., Goswami, T. K. (1996). Physical properties of sunflower seeds. Physical properties of cumin seed. J. Agric. Eng. Vol. 64. P. 93-98.

395. Joshi, D. C., Das, S. K., Mukherjee, R. K. (1993). Physical properties of pumpkin seed. Journal of Agricultural Engineering Research. 1993 Vol. 54 P. 219-229.

396. Ogunjimi L. Some engineering properties of locust bean seed / L. Ogunjimi, N. Aviara, O. Aregbesola // Some engineering properties of locust bean seed. J. Food En. – 2002 – Vol. 55 – P. 95-99.

397. Nimkar, M. P., Chattopadhyay, K. P. (2001). Some Physical properties of green gram. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 80(2). P. 183-189.

398. ГОСТ 10854-88. (2010). Семена масличные. Методы определения сорной, масличной и особо учитываемой примеси. Введ.: 23.12.88. Москва. Стандартинформ. 10 с.
399. Дьяконов, В. П. (2008). Mathematica 5.1/5.2/6. Программирование и математические вычисления. Москва: ДМК-Пресс. 576 с.
400. Половко, А. М. (2007). Mathematica для студента. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. 368 с.
401. Мельников, В. В., Алёшкин, В. Р., Рощин, П. М. (1972). Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов . Ленинград: Колос. 194 с.
402. Pabis, S. (1985). Metodologia i metody nauk empirycznych. Warszawa: PWN. 220 s.
403. Han, J., Ma, K. (2002). Fuzzy color histogram and its use in color image retrieval. IEEE Transactions on Image Processing. Vol. 11. P. 944-952.
404. Sural, S., Qian, G., Pramanik, S. (2002). Segmentation and histogram generation using the HSV color space for image retrieval. Proceedings 2002 International Conference on Image Processing. New York. Vol. 2. P. 589-592.
405. Fleyeh H. (2005). Road and traffic sign color detection and segmentation – A Fuzzy Approach. IAPR Conference on Machine Vision Applications. Tsukuba Science City. P. 124-127.
406. Красовский, Г. И., Филаретов, Г. Ф. (1982). Планирование эксперимента : учеб. пособие. Мн. : Изд-во БГУ. 302 с.
407. Калоша, В. К., Лобко, С. И., Чикова, Т. С. (1982). Математическая обработка результатов эксперимента. Мн.: Высшая школа. 103 с.
408. Реброва, О. Ю. (2002). Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ Statistica. М.: МедиаСфера. 312 с.
409. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджиєв Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. За заг. ред. Д. О. Мілька; Інститут механізації тваринництва

НААН. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.

410. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения: ГОСТ Р ИСО 5479–2002. [Дата введения 2002.07.01]. (2002). М.: ИПК Издательство стандартов. (Государственный стандарт Российской Федерации).

411. Мастицкий, С. Э. (2009). Методическое пособие по использованию программы Statistica при обработке данных биологических исследований. Мн.: РУП “Институт рыбного хозяйства”. 76 с.

412. Боровиков В. (2003). STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов [2–е изд.]. (+CD). СПб.: Питер. 688 с.

413. Лапач, С. М., Губенко, А. В., Бабіч, П. М. (2001). Статистичні методи в медико-біологічних дослідженнях із застосуванням Excel. 2–е вод., перероб. і доп. К.: МОРІОН. 408 с.

414. 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. Вип. 28. Кіровоград: КНТУ. С. 255-260.

415. Любченко, Е. А., Чуднова, О. А. (2010). Планирование эксперимента: учебное пособие. Часть 1. Владивосток: Изд-во ТГЭУ. 156 с.

416. Алієв, Е. Б., Бакарджиєв, Р. О. (2014). Статистична оцінка показників роботи дозатора безперервної дії. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. Запоріжжя. Випуск 21. С.131-136.

417. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 54. No. 1. P. 129-138.

418. Алієв Е. Б., Шевченко, І. А. (2017). Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. Вісник аграрної науки. №3 (769). С. 63-65.

419. Elchin Aliev, Viktor Pryshliak, Vitaly Yaropud. (2017). Research of physical and mechanical properties of oilseed crops. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin – Rzeszów. Vol. 19. No 3. P. 103-108.

420. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б. (2018). Дослідження фотоелектронного процесу визначення забарвлення насіння олійних культур. Техніка і технології АПК. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, № 4 (103). С. 40-43.

421. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редкол.: В. Кравчук (голов.ред.) та ін. Дослідницьке. Вип. 22 (36). С. 61-65.

422. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока подачі фотоелектронного сепаратора насіння олійних культур. Проблеми надійності машин: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. Вип. 192. С. 185-193.

423. Aliiev, E. B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in aerodynamic separator. Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (26 жовтня 2018 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 70-71.

424. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 56, No. 3. P. 119-128.

425. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. Food Science and Technology. Volume 12 Issue 4. P. 135-142.

426. Алієв, Е. Б. (2018). Експериментальні дослідження процесу розділення насіння соняшнику під дією повітряного потоку. Machinery & Energetics. Kyiv. Ukraine, Vol. 9, No. 3, P. 113-116.

427. Elchyn Aliiev. (2019). The results of studies of the separation of sunflower seed material by volume. Інноваційні технології та інтенсифікація

розвитку національного виробництва: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. 30 травн. 2019 р. Тернопіль : Крок. С. 96-98.

428. Aliiev E. B. (2019). Results of the experimental study of separation process seeds in photoelectronic separator. Олійні культури: інновації та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (14 травня 2019 р.). Запоріжжя. ІОК НААН, 2019. С. 89-90.

429. Шевченко, І., Алієв, Е., Каминский Ян Р. (2019). Результати експериментальних досліджень процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшника за об'ємною вагою. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редкол.: В. Кравчук (голов.ред.) та ін. Дослідницьке. Вип. 24 (38). С. 252-259. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-26](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-26).

430. Алієв, Е. Б. (2018). Критерії оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип. 48. Кропивницький: ЦНТУ. С. 170-176. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.170-176>.

431. Алієв, Е. Б. (2019). Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника. Науковий журнал «Наукові горизонти», № 5 (78). С. 23-30. ISSN: 2663-2144.

432. Алієв, Е. Б. (2019). Результати досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння соняшник. Наукові читання до 100-річчя від дня народження професора Івана Вікторовича Яшовського (Матеріали міжнародної наукової конференції 14-15 серпня 2019 року, Чабани) / за ред. д-ра с.-г. наук В.Ф. Камінського. – Вінниця : ТОВ «ТВОРИ». С. 90-92.

433. Wang S, Wu K, Yuan Q, Liu X, Liu Z, Lin X, Zeng R, Zhu H, Dong G, Qian Q, et al (2012) Control of grain size, shape and quality by OsSPL16 in rice. *Nat Genet* 44: 950–954.

434. OpenCV Developers Team (2012). OpenCV Reference Manual. <http://opencv.org/documentation.html> (July 31, 2012).
435. Suzuki S, Abe K (1985). Topological structural analysis of digital binary image by border following. *Comput Vis Graph Image Process* 30: 32–46.
436. Tanabata, T., Yamada, T., Shimizu, Y., Shinozaki, Y., Kanekatsu, M., Takano, M. (2010). Development of automatic segmentation software for efficient measurement of area on the digital images of plant organs. *Hort Res* 9: 501–506.
437. ДСТУ 4694 (2006). Соняшник. Олійна сировина. Технічні умови. Київ: Держстандарт України. 12 с.
438. OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [Electronic resource] : [Web-site]. (2018). Electronical Data. OpenCV team. Access mode: <https://opencv.org> (date of treatment 22.07.2018) – Title from the screen.
439. Алієв, Е. Б., Гаврильченко, О. С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого матеріалу. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. Вип. 201. С. 132-140.
440. Алієв, Е. Б. (2019). 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.
441. Алієв, Е. Б. (2019). 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.
442. 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, № a201808708. Заявл. 25.10.2019. Опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.

443. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120235, МПК (2006) B07B 1/00, B07B 1/40 (2006.01), B07B 1/42 (2006.01), G05B 13/00, G05B 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.

444. ДСТУ 4397 (2005). Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. К. Держспоживстандарт України. 15 с.

445. ГСТУ 3-37-4-94 (1995). Трактори та машини сільськогосподарські. Методи економічної оцінки. К. Мінагрополітики України. 18 с.

446. Остапенко, М. Н. (2017). Развитие методики экономической оценки сельскохозяйственных машин. Экономика и организация инженерно-технических систем в АПК. Москва. Вестник, № 2. С. 49-53.

447. Сорокин, Н. Т., Табашников, А. Т. (2015). Методика оценки экономической эффективности сельскохозяйственной техники. Сельскохозяйственные машины и технологии. Вып. 2. С. 41-44.

448. Данильченко, М. Г., Гладич, Б. Б., Гевко, Р. Б., Ткаченко, І. Г. (2001). Експертноаналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки: Навчально-методичний посібник для студентів економічних спеціальностей. Тернопіль: Економічна думка. 61 с.

449. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. Економічний розвиток держави, регіонів і підприємств: проблеми та перспективи / зб. наук. праць / наук. ред. В.С. Лукач. Ніжин. С. 224-227.

450. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка впровадження прецизійної технологічної лінії сепарації насінневого матеріалу соняшнику. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха. Вип. № 9 (108). С. 81-87.

ДОДАТКИ

Додаток А

Технічні характеристики технічних засобів і машин для очищення та розділення насіння

Таблиця А.1 – Технічні характеристики пневмо- і вібросепараторів

Марка	Продуктивність, т/год	Ефективність очищення	Потужність, кВт	Енергоємність, кВт·год/т	Габарити, мм	Маса, кг
Пневмосепаратор СП-2У-ОК	0,6-2,0	–	2,75	1,4-4,6	2600×950×3000	251
Пневмосепаратор ПС-15	15	–	8,6	0,57	2000×1900×2700	930
Пневмосепаратор СП-4У-Р	1,2-5,0	–	6,05	1,2-5	5245×1635×3410	515
Самопересувний пневмосепаратор ПСПБ-3С/10С/25С	2,8-3,1/ 10(20 товарне)/ 25(50 товарне)/	–	8,3/ 24/ 45	2,67-2,97/ 1,2-2,4/ 0,9-1,8	4400/5350/6620 4000/5150/6830 3100/3500/3820	600/1095/ 2550
Стационарний пневмосепаратор ПСПБ-3/10/25	2,8-3,1/ 10(20 товарне)/ 25(50 товарне)/	–	4/ 18,5/ 37	1,3-1,43/ 0,925-1,85/ 0,74-1,48	1600/2400/3650 1500/3200/4250 1800/2820/3000	220/660/ 1820
Пневмосепаратор Р-8-СДО-16	16	Не менше 50%	2,2	0,14	2600×900×1770	310
Пневмосепаратор Р6-СВ-6-01-02	6/3/1,5	Не менше 60%	1,5/1,1/ 1,1	0,25/0,37/ 0,73	1245×1430/830/ 530×1830	600/330/ 260
Сепаратор САД	6-200/4-150/2-50	–	1,8-31	0,3-0,6	1520×635×1850 3830×1700×3850	205-2251
Сепаратор повітряного очищення СВО-25	25	Не менше 50%	5,5	0,22	1860×1040×2050	328
Сепаратор зерновий Р6-СВС-6	6	60%	0,75	0,12	2120×1200×1600	530
Сепаратор зерновий Р6-СВС-12	Э–50 М–12	Э–50-60 М–60-80	1,1	Э–0,022 М–0,091	2460×1360×2125	727
Сепаратор вібровідцентровий зерновий типу БЦСМ “СУЗІР”Я”	25/50/100	Не менше 70%	3/4,5/9	0,12/0,09/ 0,09	1800/3300/3300 1250/1250/2500 3250	1290/1400/ 2400

Марка	Продуктивність, т/год	Ефективність очищення	Потуж- ність, кВт	Енерго- ємність, кВт·год/т	Габарити, мм	Маса, кг
Пневмо вібровідцентрові універсальні сепаратори БЦСМ	65/130/260 (25/50/100 при очищенні насіневої олії)	60-80% (98%)	4,4/6,6/ 13,2	0,067/0,05 0/0,13	2300/2300/5600 1270/2540/2540 3600	1450/2800/ 5600
Машина універсальна зерноочисна МУЗ-8	10-80	–	1,5	0,02-0,15	–	–
Очищувач вороха стаціонарний ОВС-25С	12	–	4	0,33	3000×2000× 2600	1915
Машина попереднього очищення зерна МПО-50	50	–	7,5	0,15	1850×2850× 2050	1041
Сепаратор попереднього очищення зерна СПО-100	80	–	11	0,13	2850×1940× 2120	1250
Сепаратори вороха універсальні СВУ- 30, СВУ-60	30/60	–	15,7/18,7	0,52/0,31	3940×2310× 3080	2800/ 4000
Машини вторинного очищення МВУ- 10	10	–	2,2	0,22	3250×2300× 2980	2300
Сепаратор пневматичний сортувальний СПС-10	5	–	11,25	2,25	4035×1574× 2955	1000
Сепаратори трієрні СТ-8	8	–	6,2	0,78	3400×1100× 2600	1400
Машина вторинної очистки насіння стаціонарна МС- 4,5С	4,5	–	5,2	1,15	3000×2500× 2800	1550
Сепаратор купи первинного очищення СВТ-40	40	–	11,7	0,29	3880×2285× 2810	3600
Машина зерноочисна МЗС-25	25	–	2,2	0,09	3500×2200× 3100	2100

Таблиця А.2 – Технічні характеристики фотоелектронних сепараторів

Країна, фірма	ОАО «Воронежсельмаш»				Компанія «CSort»				Компанія «AnMeiDa Group»						
	Ф 20.1	Ф 15.1	Ф 10.1	Ф 5.1	120 канал.	90 канал.	ZK5/ 320	ZK4/ 256	ZK/ 192	ZK2/ 128	320Z	240Z	208Z	160Z	128Z
Марка	1,6... 30	1,2...2 2,5	0,8... 15	0,5... 9	до 5	до 3,5	до 17	до 13,6	до 10,2	до 6,8	до 15	до 11,25	до 9,3	до 7,5	до 5,5
Встановлена потужність, кВт	2,5	1,8	1,5	1,4	2,1	1,4	1,5... 3,5	1,2,3	1,2,7	0,6... 1,8	1,5,3	1,2... 2,5	1,2	0,8... 1,8	0,6... 1,6
Споживання повітря л/хв, не більше	1000 2500	1000 2500	1000 1500	500 1000	600 2000	400 1800	1500 3000	1200 2500	1000 1800	600 1200	1500 3000	1200 2800	500 1400	800 1800	500 1400
Кількість швидкодіючих пнемо- розподільників	288	216	144	96	120	90	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд
Габаритні розміри, мм	2015	1741	1368	1585	1875	1875	2110	1808	1506	1204	2066	2066	2066	1346	1346
	1300	1350	1350	1100	1105	1105	1550	1550	1550	1550	1010	1010	1010	1010	1010
	1950	1950	1950	2265	1935	1935	1840	1840	1840	1840	1890	1890	1890	1890	1890
Маса, кг	820	730	610	550	нд.	нд.	950	750	635	600	1000	950	900	850	800
Країна, фірма	Росія, ПО Пролетар- ський завод		Англія Sortex	Японія, Toyo	Японія, Satake	Італія, SEA	Бразилія, Tecnostral	США, Техас ESM	Германія, Justus	Бельгія, Mandrel					
Марка	СРФ-5		Sortex 9401	CA-150	GF400FA	GR3000MS	SMS-608	G3800R	Megasort	Elexso					
Продуктивність, т/год	5,0		4,0-12,0	0,6-9,0	2,0	2,0	0,3-0,7	0,8	3,4	2,4					
Потужність, кВт	5,0		2,0	2,0	7	0,85	0,5	1,2	1,2	0,25					
Габаритні розміри, м	2,4		2,0	1,2	1,5	1,8	0,5	2,2	1,5	0,8					
	1,4		1,2	1,2	0,4	1,2	0,8	1,2	1,1	1,1					
	2,2		1,4	1,9	1,6	0,9	1,«	1,1	2,3	2,3					
Маса, кг	700		640	360	300	350	160	300	410	400					

Додаток Б
Морфологічні показники насіння

Таблиця Б.1 – Форма насіння найбільш поширених бур'янів

Форма	Контурний рисунок	Характерні ознаки	Вид бур'янистої рослини
Куляста, куляста-кутова, злегка здавлена		Довжина, ширина і товщина приблизно рівні між собою і утворюють більш-менш правильну кулю	Гірчиця польова, рутка лікарська, мак-дикий, повитиця польова, підмаренник чіпкий
Округло-здавлена, плоска		У контурі округла, бічні сторони здавлені, майже паралельні, ребра тупі; в області насінного рубчика сильно стиснута	Дурман звичайний, лобода розлога і ін. види, лобода біла та ін. види, паслін чорний, проскурник зневажений і ін. види
Чечевицеподібна		Більш-менш округла, з бічних сторін здавлена, ребра загострені. У поперечному перерізі двосторонньо або односторонньо слабовипукла	Щириці – біла, жміндовідна, запрокинута
Овальна, виконана		У контурі більш-менш подовжена. У поперечному перерізі майже округла, або дещо здавлена, або округло-слаботригранна	Буркун лікарський, молочай лозний, чистець однорічний
Овальна, здавлена або плоска		Бічні сторони або майже паралельні, або листоподібні здавлені	Осот городній, осот польовий жовтий
Овальна, складчаста		Корінець і сім'ядолі утворюють борозенку, що розділяє насіння вздовж. Насіння більш-менш здавлене	Гулявник – лікарський, Лезеля, дескурайнія Софії, жовтушник вигризені, грицики
Обернено-яйцевидна, виконана, слабо тригранна		Вершина розширена, тупоокругла, до насінневого рубчика звужена. Довжина перевищує ширину і товщину в 1,5 і більше разів. У поперечному перерізі насіння округле або дещо здавлене	Амброзія полинолиста, осот щетинистий, березка польова, геліотроп європейський

Форма	Контурний рисунок	Характерні ознаки	Вид бур'янистої рослини
Обернено-яйцевидна, здавлена або плоска		У поперечному перерізі сильно здавлена або плоска, бічні сторони паралельно зближені	Кохия веничная, латук дикий, осот шорсткий, талабан польовий
Ниркоподібна, овально-виконана або подовжена, здавлена з боків		По спині округла, у насінневого рубчика здавлена. Довжина трохи більше ширини. У поперечному перерізі клиноподібна	Гібіскус трійчастий, канатник Теофраста, портулак городній, резеда жовта
Серцеподібна, овально-виконана або плоска		Спинка округла, потовщена, насіння до насінневого рубчик здавлене, бічні сторони паралельні, основа широко-округле, вершина злегка витягнута в загострення	Горець почечуйний, горець шорсткий
Тригранно-пірамідальна, укорочена		Основа тупоконическая, вершина пірамідально загострена. Насіння в поперечному перерізі трикутно-чотиристороння	Горець берізка, горець почечуйний, гречка татарська. Щавель кінський, щавель кучерявий
Тригранно-подовжена		Вершина прямо або косо усічена, утворює трикутну майданчик. Насіння в поперечному перерізі нерівносторонні трикутне	Железниця гірська, живокіст польова, глуха кропива
Циліндрична		Пряма або слабо вигнута, до основи і вершини слабо звужується	Крестовник весняний, жовтозілля звичайне, мелкопестник канадський
Плоди і насіння з придатками і прищіпками		По краях або по всій поверхні розміщені причеплені або шиповидні придатки	Нетреба звичайна, липучка відстовбурчені, якірці сланкі
Веретеновидна, довгоколінчаста остиста		Ость довше зернівки. Зернівка до вершини поступово загострюється, до основи більш виконана. У поперечному перерізі майже округла	Овес порожній (вівсюг)

Форма	Контурний рисунок	Характерні ознаки	Вид бур'янистої рослини
Ладьевидно-подовжена, відкрита, коротка остистая з очевидним загостренням		Остевидне загострення до 1/4 довжини зернівки. Зовнішня квіткова луска в повному обсязі закриває внутрішню	Пирій повзучий
Яйцеподібна, здавлена або односторонньо опукла, довгоостиста, остиста		Ості рівні зернівці або довше. У контурі овальна-яйцеподібна, в поперечному перерізі односторонньо опукла	Єжовник звичайний (просо куряче)
Яйцевидно-здавлена, односторонньо опукла, безоста		У контурі овальна-яйцеподібна, в поперечному перерізі овальна, здавлена або односторонньо опукла	Щетинник зелений, мишій сизий, Свиной пальчатий
Примітка: поняття – «виконана», «здавлена» і «плоска» мають такі границі: якщо в поперечному перерізі відношення товщини до ширини дорівнює одиниці або 3/4 – така форма називається виконаною; якщо це відношення менше 3/4 – до 1/4 – форма здавлена; якщо воно менше 1/4 – форма плоска.			

Додаток В

Чисельне моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією повітряного потоку

Таблиця В.1 – Матриця чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі

№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Швидкість повітря V , м/с	№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Швидкість повітря V , м/с
1	3	8	13	5	12
2	3	9	14	5	13
3	3	10	15	5	14
4	3	11	16	5	15
5	3	12	17	7	8
6	3	13	18	7	9
7	3	14	19	7	10
8	3	15	20	7	11
9	5	8	21	7	12
10	5	9	22	7	13
11	5	10	23	7	14
12	5	11	24	7	15

Таблиця В.2 – Матриця плану чисельного моделювання процесу переміщення насіння в повітряному потоці

№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Подача насіння Q , т/год	Швидкість повітря V , м/с
1	3	1	5
2	3	1	10
3	3	1	15
4	3	2	5
5	3	2	10
6	3	2	15
7	3	3	5
8	3	3	10
9	3	3	15
10	5	1	5
11	5	1	10
12	5	1	15
13	5	2	5
14	5	2	10
15	5	2	15
16	5	3	5

№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Подача насіння Q , т/год	Швидкість повітря V , м/с
17	5	3	10
18	5	3	15
19	7	1	5
20	7	1	10
21	7	1	15
22	7	2	5
23	7	2	10
24	7	2	15
25	7	3	5
26	7	3	10
27	7	3	15

Таблиця В.3 – Результати чисельного моделювання процесу сепарації насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

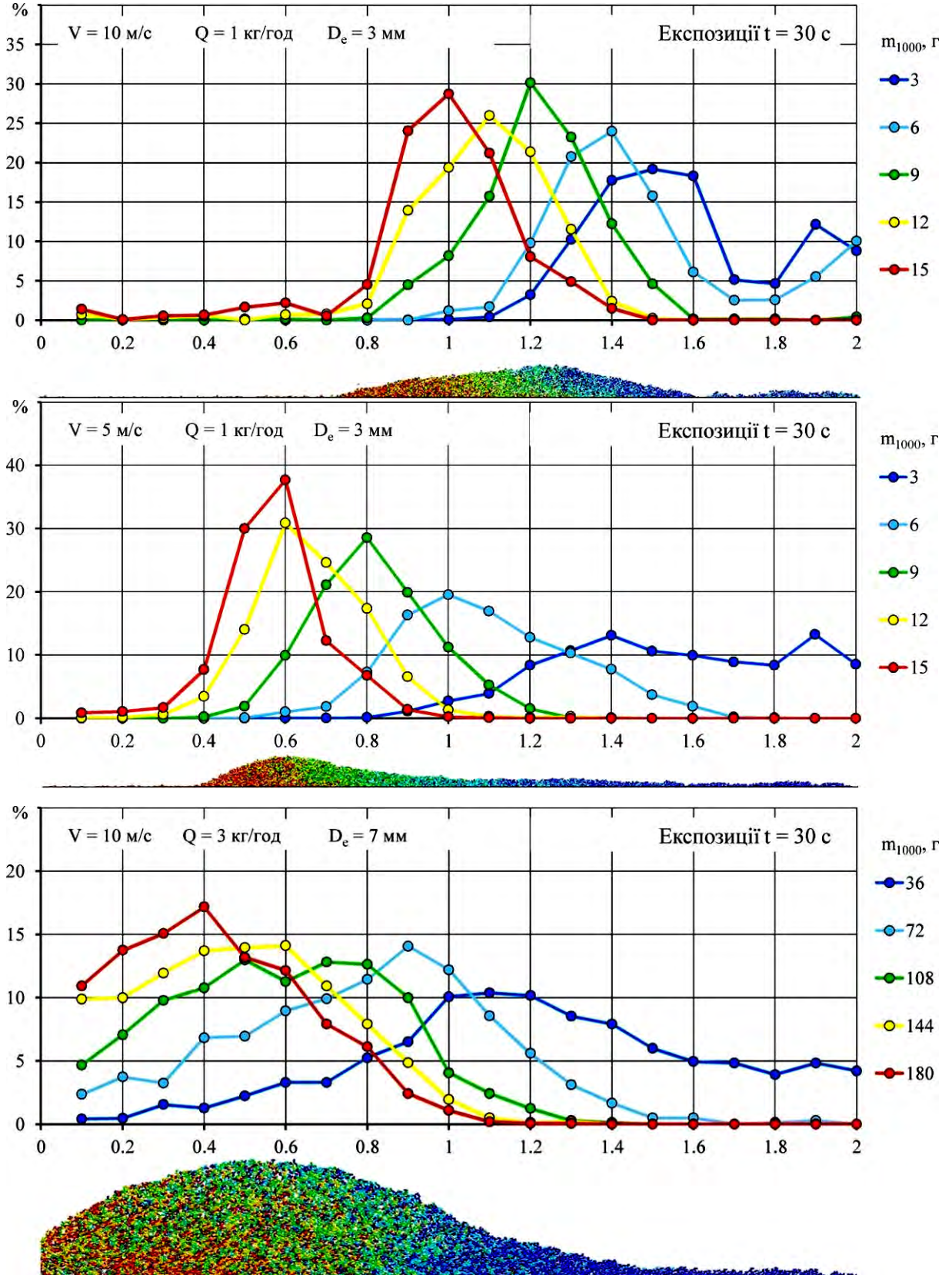
№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Швидкість повітря V , м/с	ξ (ρ , кг/м ³), %							ρ_h , кг/м ³	ρ_s , кг/м ³
			140	160	180	200	220	240	260		
1	3	8	100	100	100	100	100	100	100	200	260
2	3	9	100	100	100	100	100	100	96,7	199	258
3	3	10	100	100	100	100	97,8	93,2	77,7	193	249
4	3	11	100	100	98,9	91,1	86,2	63,3	29,7	181	243
5	3	12	100	95,5	91,3	75,6	54,5	26,0	6,4	169	230
6	3	13	93,7	87,7	71,5	40,2	17,5	5,3	0,0	157	218
7	3	14	91,2	67,1	33,9	11,6	1,1	0,0	0,0	148	207
8	3	15	59,0	27,0	8,3	1,0	0,0	0,0	0,0	147	201
9	5	8	100	100	100	100	100	100	98,9	200	260
10	5	9	100	100	100	100	100	99,4	91,4	199	259
11	5	10	100	100	99,5	99,4	93,7	85,6	60,9	195	250
12	5	11	100	100	98,9	91,1	73,5	44,7	19,1	186	244
13	5	12	100	94,5	84,4	59,3	39,5	14,9	3,2	175	233
14	5	13	90,2	79,6	53,3	25,7	8,8	2,7	0,0	164	221
15	5	14	71,8	43,7	19,8	5,8	0,6	0,0	0,0	155	212
16	5	15	36,3	15,6	4,7	0,5	0,0	0,0	0,0	149	205
17	7	8	100	100	100	100	100	100	97,8	200	260
18	7	9	100	100	100	100	100	98,9	86,1	200	260
19	7	10	100	100	99,0	98,9	89,6	78,1	44,2	198	253
20	7	11	100	100	98,8	91,2	60,9	26,2	8,4	190	245
21	7	12	100	93,6	77,4	43,1	24,4	3,7	0,0	180	236
22	7	13	86,8	71,5	35,1	11,3	0,0	0,0	0,0	168	226
23	7	14	52,4	20,3	5,7	0,0	0,0	0,0	0,0	157	218
24	7	15	13,5	4,3	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	150	208

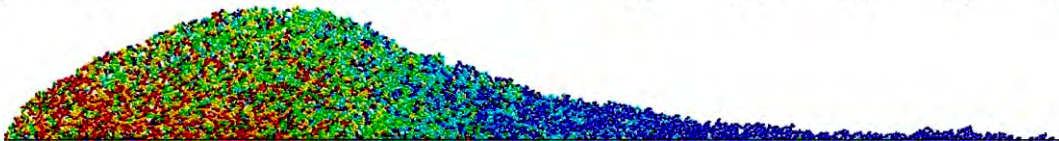
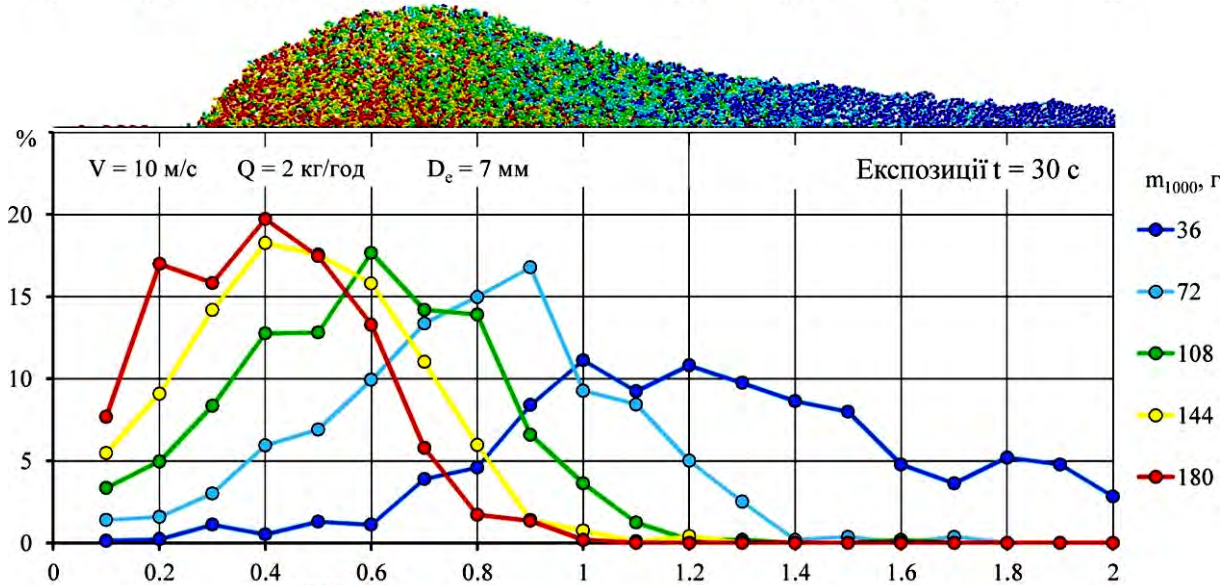
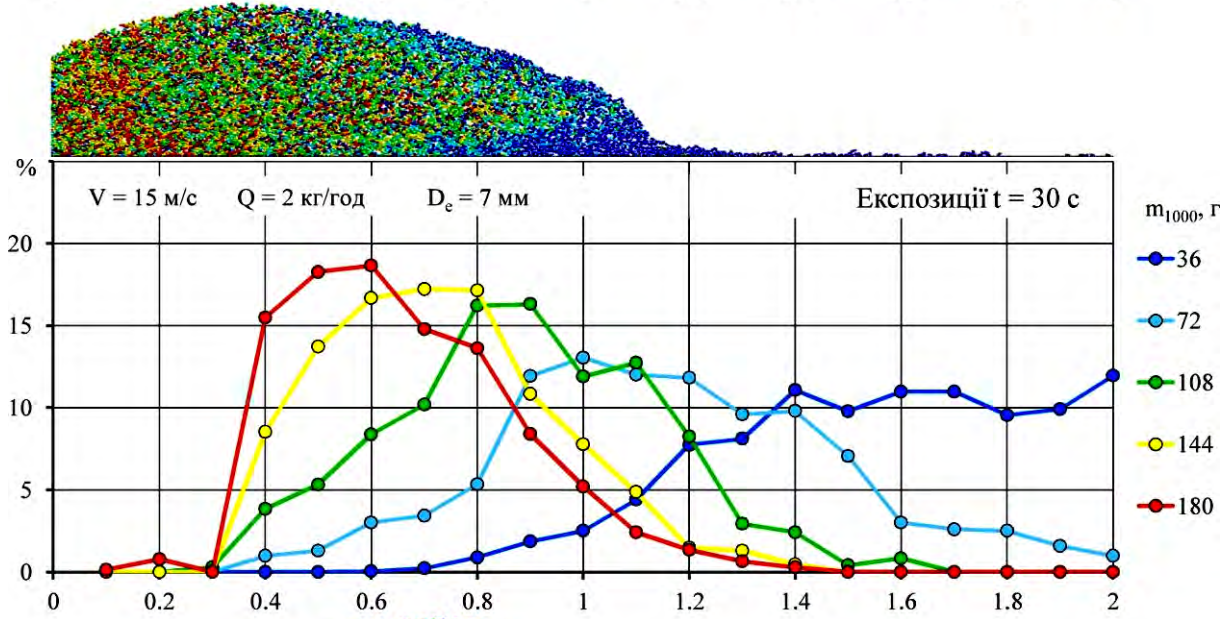
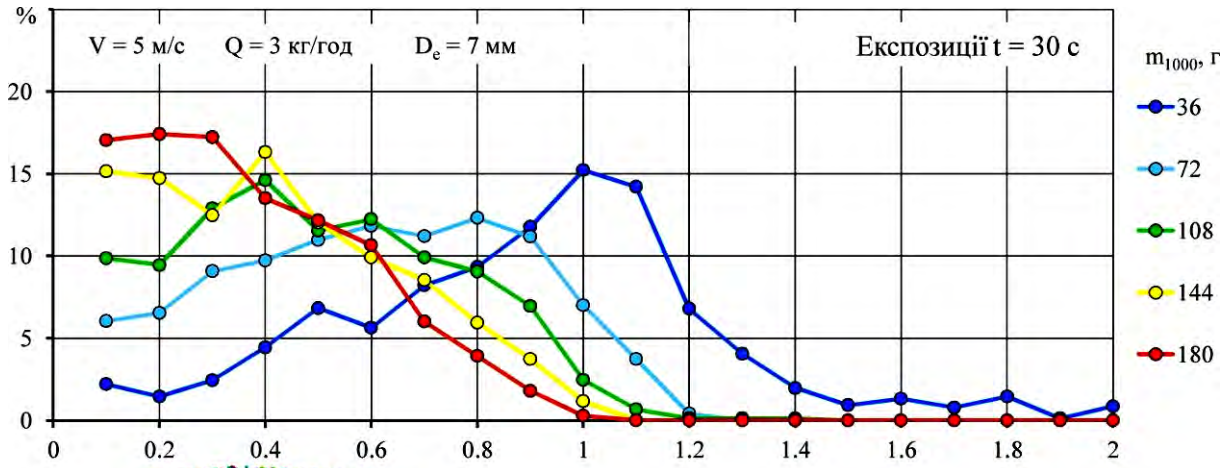
Таблиця В.4 – Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією повітряного потоку

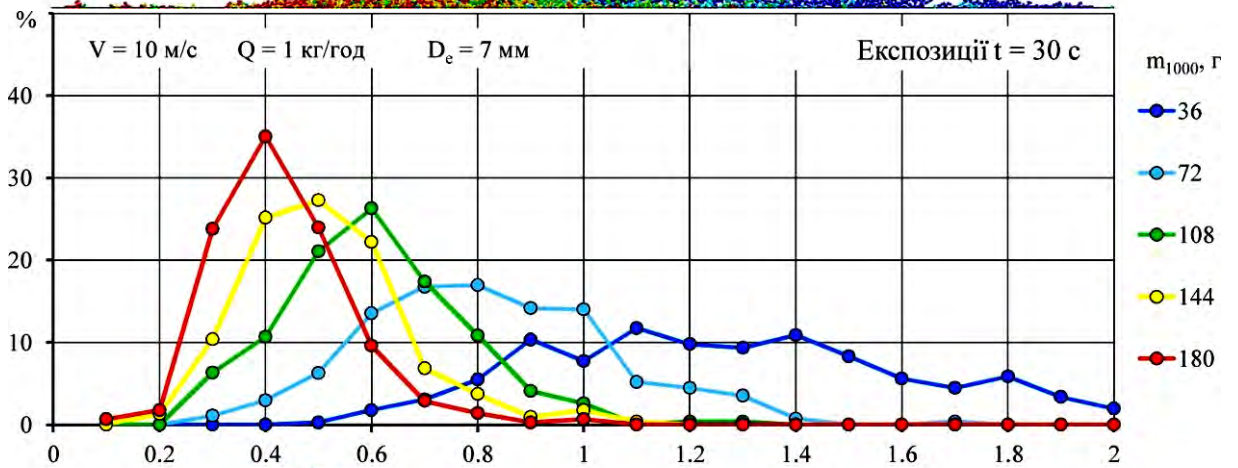
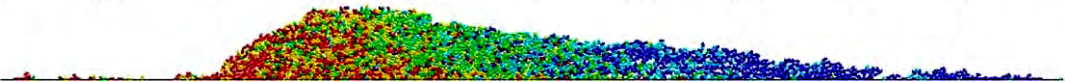
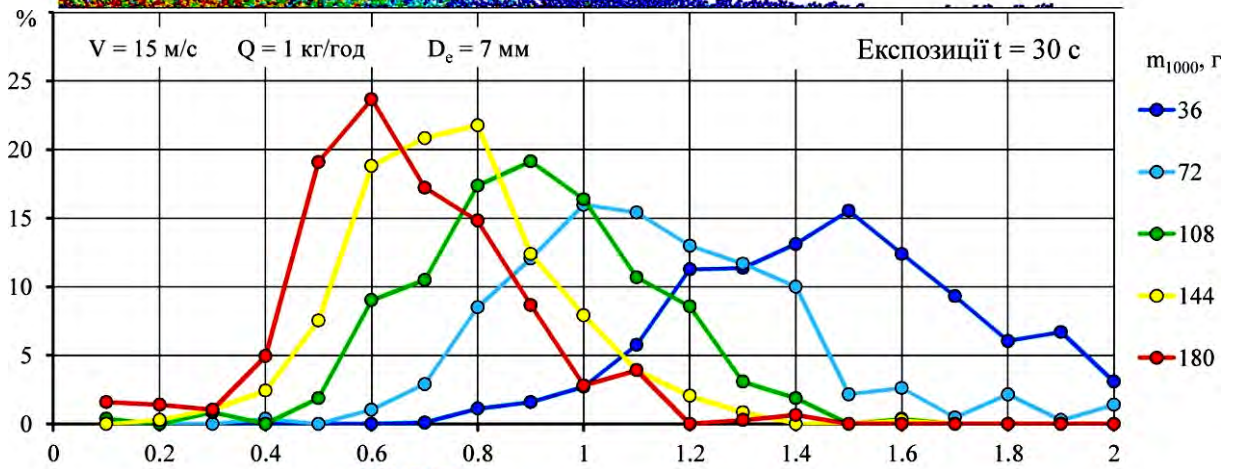
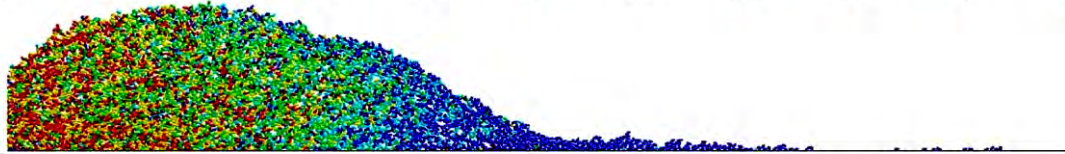
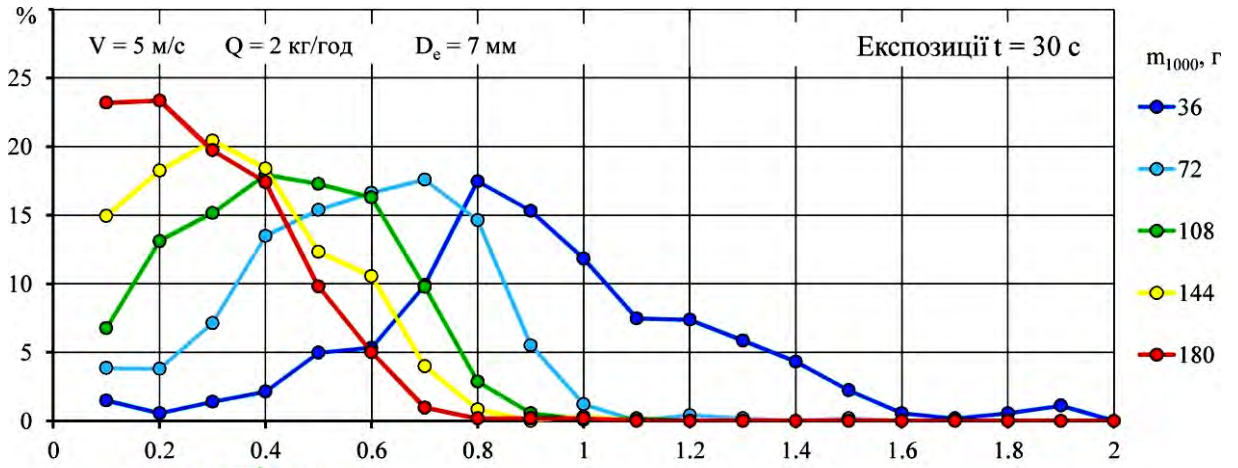
№	Ефективний діаметр насіння D_p , мм	Потік насіння Q , т/год	Швидкість повітря V , м/с	Середньоквадратичне відхилення σ , м					Середнє значення X , м					Коефіцієнт заповнення χ	Коефіцієнт розподілу δ , %
				3	6	9	12	15	3	6	9	12	15		
Маса 1000 насіння m_{1000} , г				3	6	9	12	15	3	6	9	12	15		
1	3	1	5	0,290	0,213	0,149	0,141	0,129	1,601	1,146	0,868	0,715	0,622	0,343	39,9
2	3	1	10	0,229	0,251	0,159	0,183	0,203	1,834	1,634	1,268	0,629	0,935	0,278	32,4
3	3	1	15	0,357	0,341	0,316	0,243	0,179	1,420	1,569	1,475	1,277	1,194	0,048	28,0
4	3	2	5	0,315	0,239	0,176	0,159	0,140	1,620	1,133	0,873	0,731	0,643	0,305	40,2
5	3	2	10	0,208	0,251	0,189	0,191	0,191	1,734	1,567	1,295	1,145	1,039	0,209	34,8
6	3	2	15	0,286	0,342	0,337	0,301	0,268	1,461	1,511	1,416	1,316	1,226	0,047	24,2
7	3	3	5	0,337	0,261	0,199	0,177	0,164	1,565	1,116	0,866	0,734	0,642	0,260	38,8
8	3	3	10	0,202	0,261	0,233	0,213	0,202	1,733	1,551	1,301	1,142	1,029	0,193	34,5
9	3	3	15	0,252	0,330	0,357	0,349	0,310	1,410	1,398	1,347	1,278	1,194	0,041	22,1
Маса 1000 насіння m_{1000} , г				13	26	39	52	65	13	26	39	52	65		
10	5	1	5	0,350	0,190	0,136	0,107	0,097	1,223	0,749	0,574	0,472	0,417	0,308	36,3
11	5	1	10	0,305	0,239	0,182	0,175	0,144	1,540	1,149	0,882	0,739	0,646	0,272	37,4
12	5	1	15	0,269	0,286	0,219	0,198	0,246	1,666	1,551	1,244	1,074	0,990	0,176	35,5
13	5	2	5	0,359	0,223	0,176	0,165	0,147	1,153	0,722	0,553	0,449	0,389	0,234	33,1
14	5	2	10	0,302	0,267	0,206	0,193	0,171	1,589	1,142	0,880	0,749	0,650	0,260	39,5
15	5	2	15	0,216	0,288	0,236	0,213	0,215	1,728	1,500	1,235	1,067	0,977	0,197	36,0
16	5	3	5	0,376	0,256	0,218	0,204	0,187	1,144	0,755	0,570	0,458	0,417	0,190	32,8
17	5	3	10	0,351	0,312	0,247	0,236	0,204	1,536	1,105	0,873	0,735	0,644	0,208	36,7
18	5	3	15	0,222	0,294	0,279	0,254	0,245	1,764	1,495	1,241	1,075	0,969	0,187	38,0
Маса 1000 насіння m_{1000} , г				36	72	108	144	180	36	72	108	144	180		
19	7	1	5	0,341	0,182	0,136	0,127	0,111	0,976	0,584	0,431	0,355	0,308	0,248	35,7
20	7	1	10	0,341	0,231	0,171	0,153	0,129	1,317	0,871	0,655	0,562	0,483	0,264	36,9
21	7	1	15	0,267	0,269	0,218	0,193	0,205	1,517	1,186	0,957	0,807	0,715	0,219	36,8
22	7	2	5	0,315	0,216	0,190	0,178	0,159	0,971	0,626	0,484	0,399	0,340	0,192	31,8
23	7	2	10	0,378	0,271	0,235	0,204	0,185	1,297	0,838	0,637	0,523	0,453	0,213	35,2
24	7	2	15	0,306	0,319	0,250	0,213	0,211	1,611	1,212	0,940	0,780	0,712	0,216	40,4
25	7	3	5	0,353	0,277	0,258	0,237	0,215	0,950	0,654	0,548	0,470	0,425	0,125	28,2
26	7	3	10	0,417	0,319	0,268	0,245	0,225	1,271	0,843	0,641	0,537	0,481	0,171	32,6
27	7	3	15	0,370	0,348	0,301	0,270	0,245	1,566	1,190	0,930	0,783	0,695	0,177	39,1

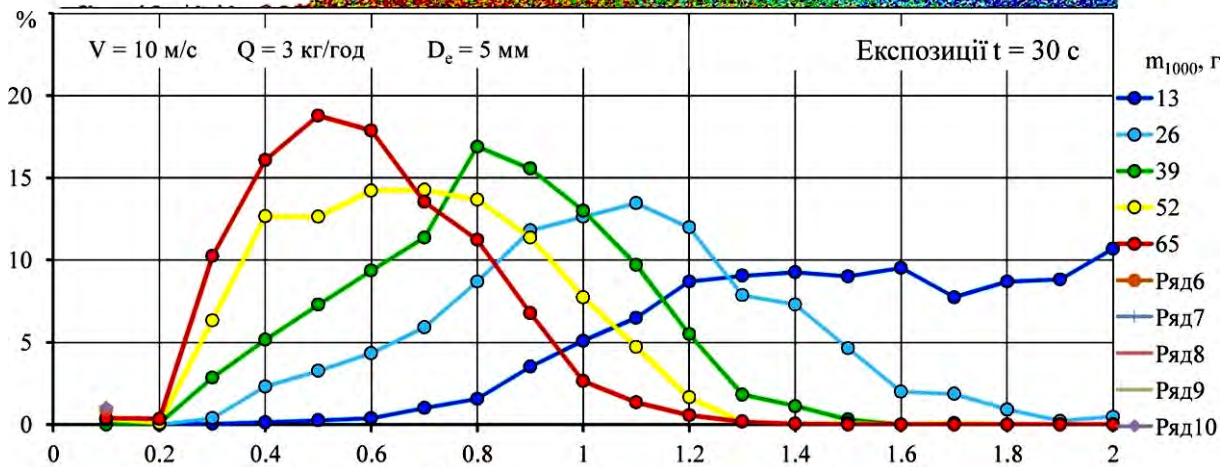
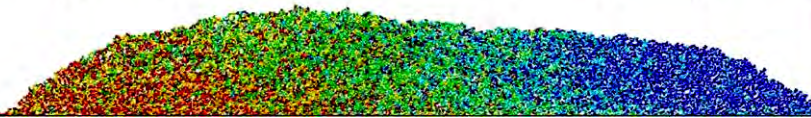
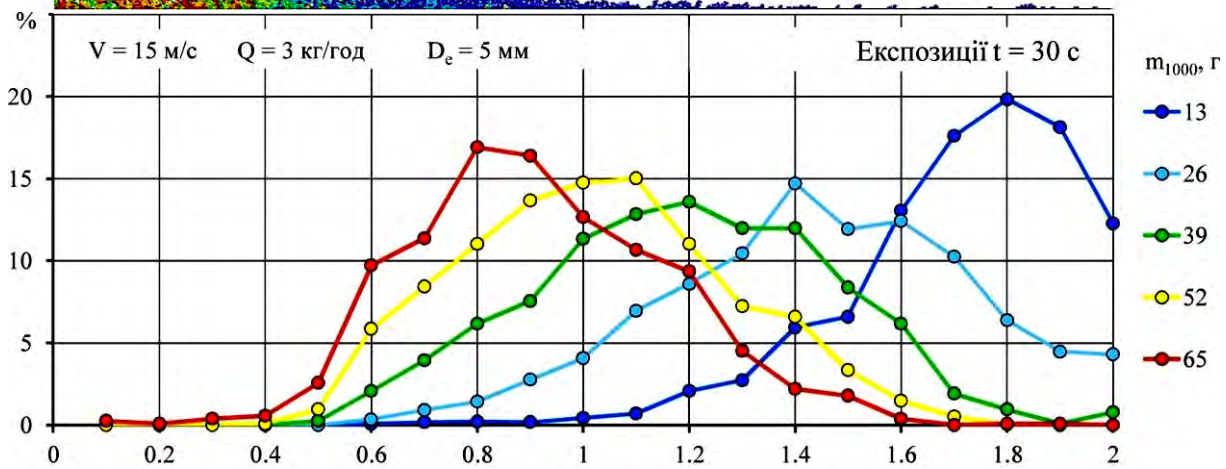
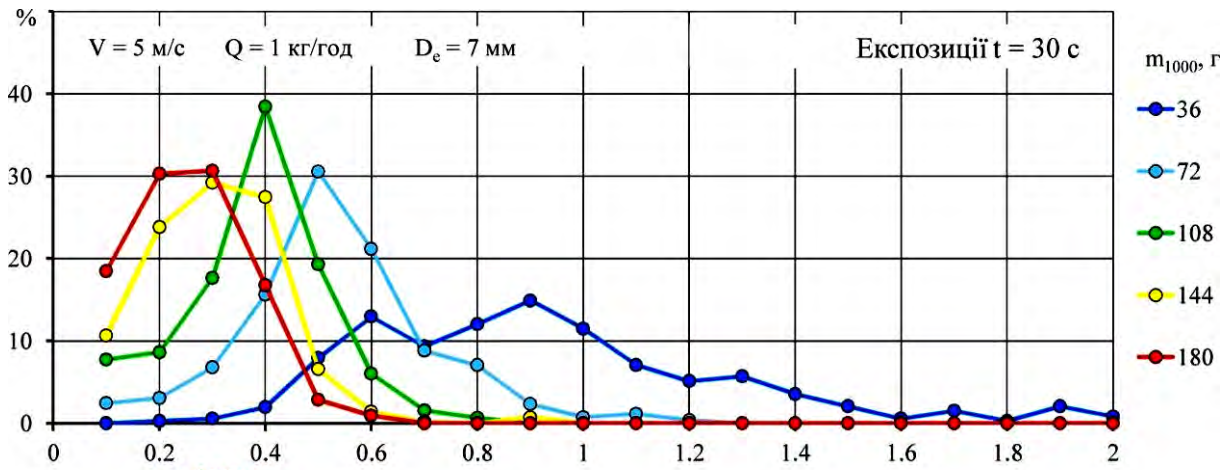
Додаток Г

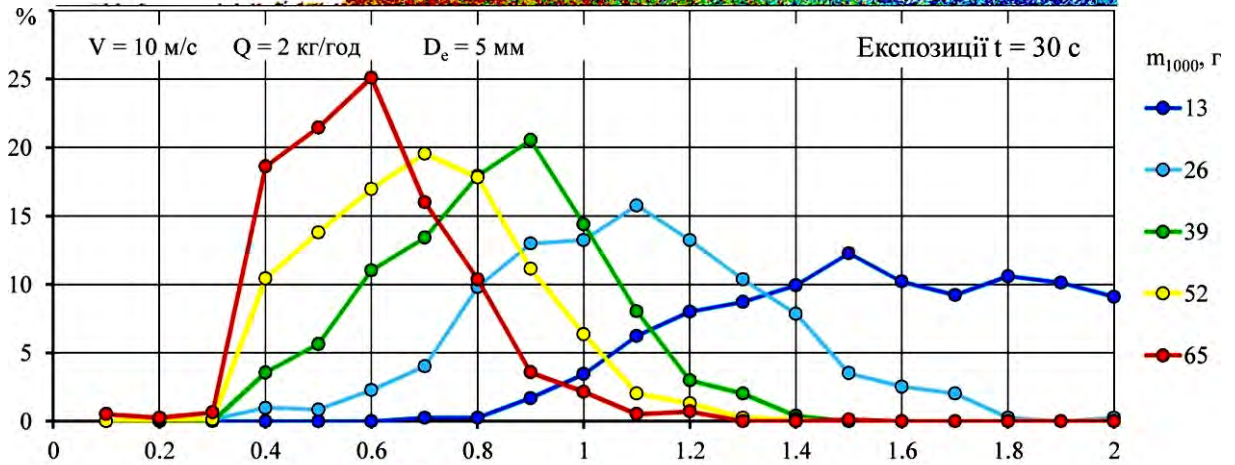
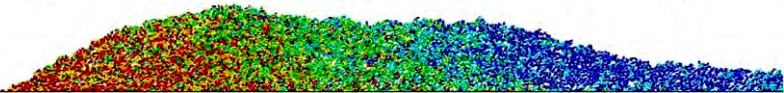
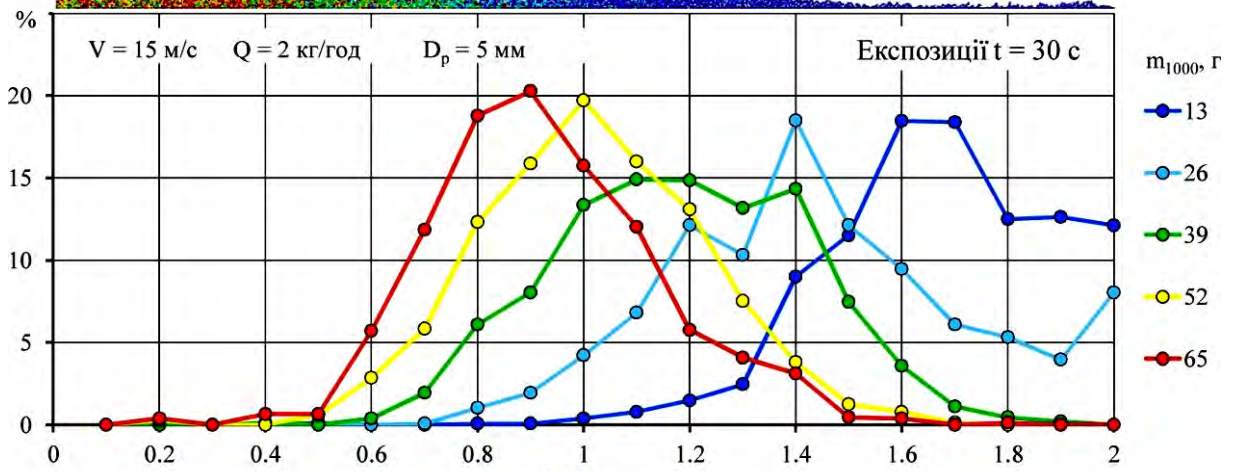
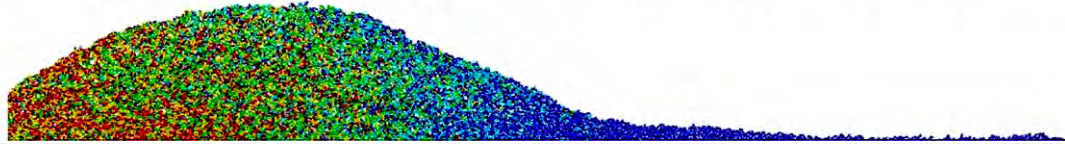
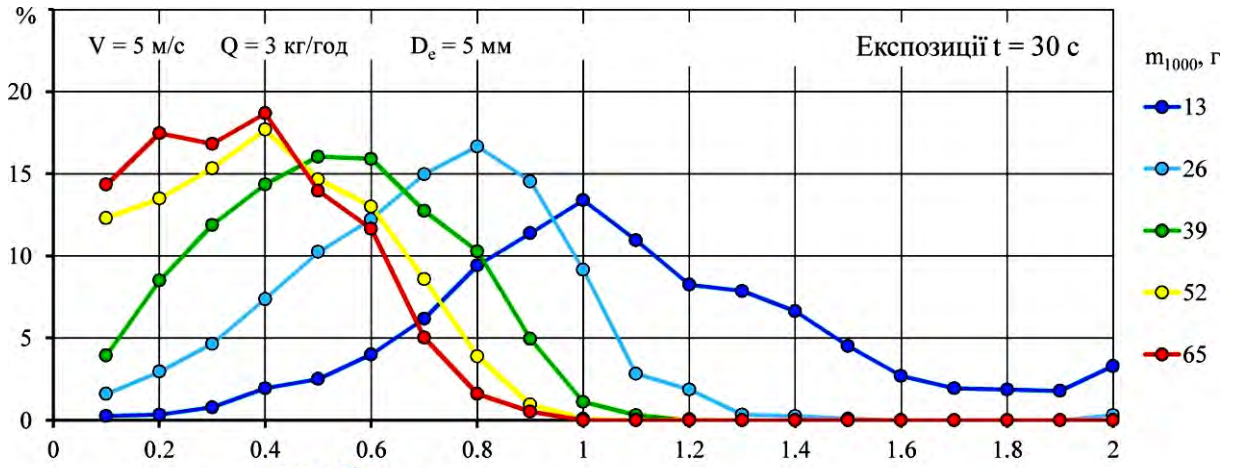
Розподіл фракцій насіння по довжині області, що утворився під впливом повітряного потоку

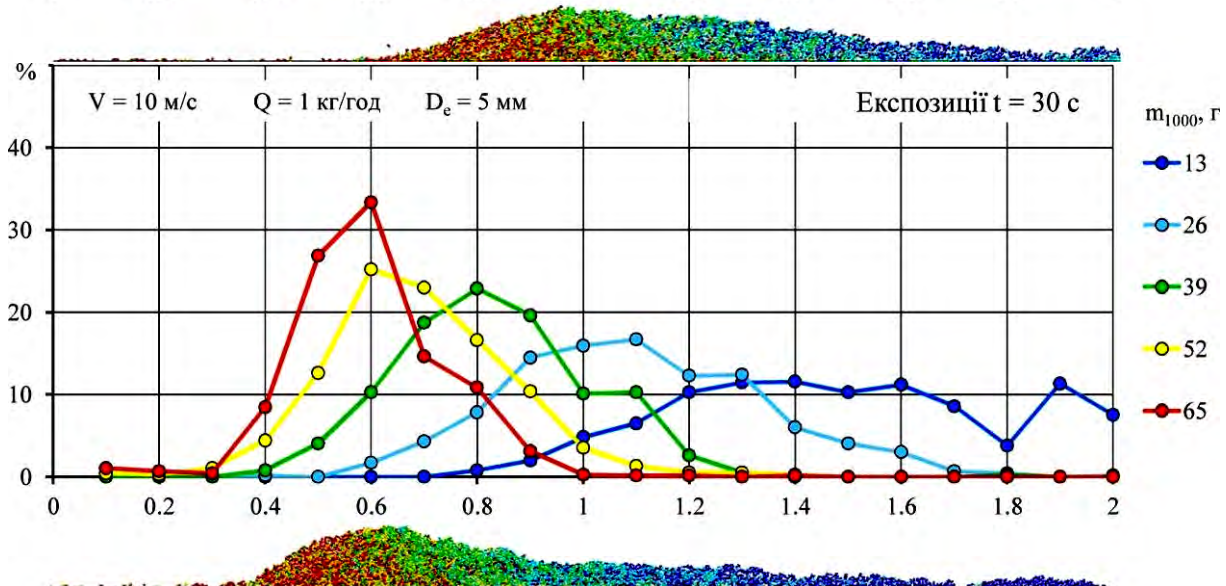
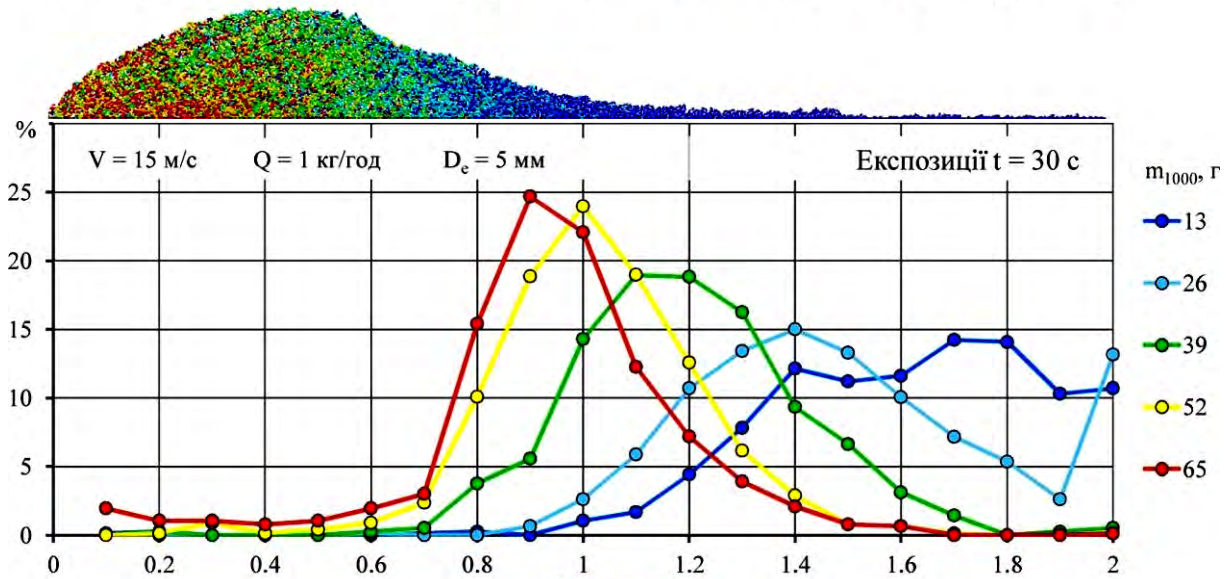
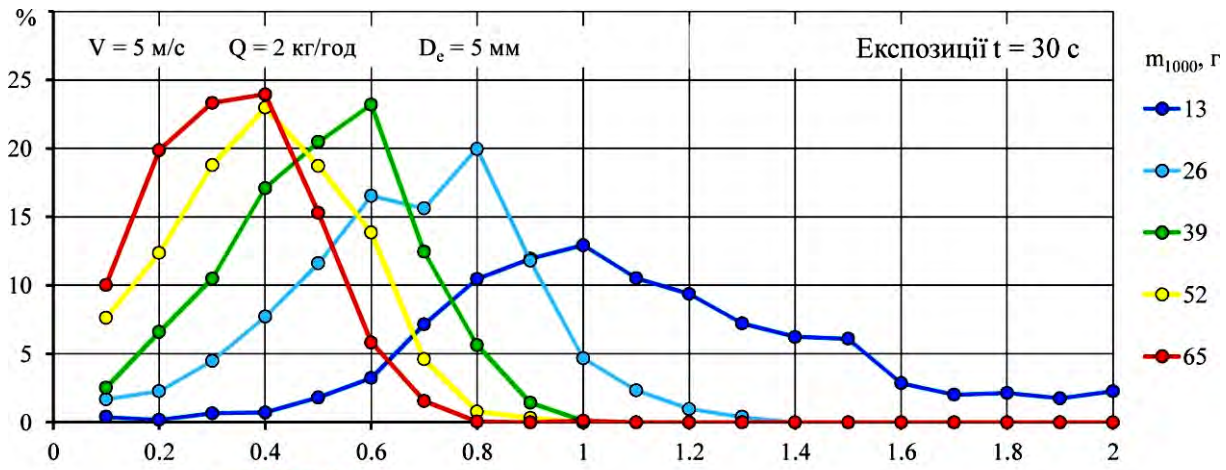


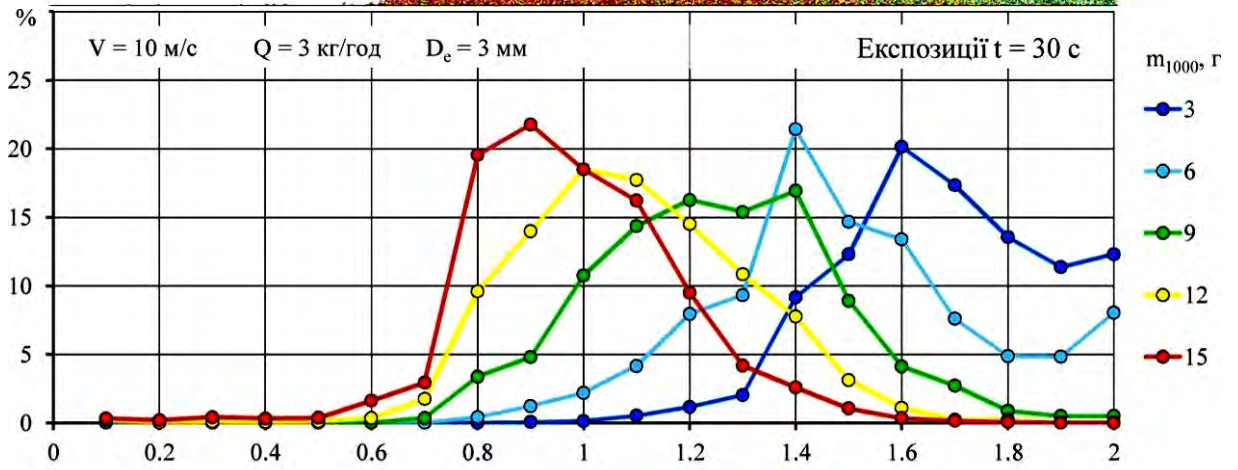
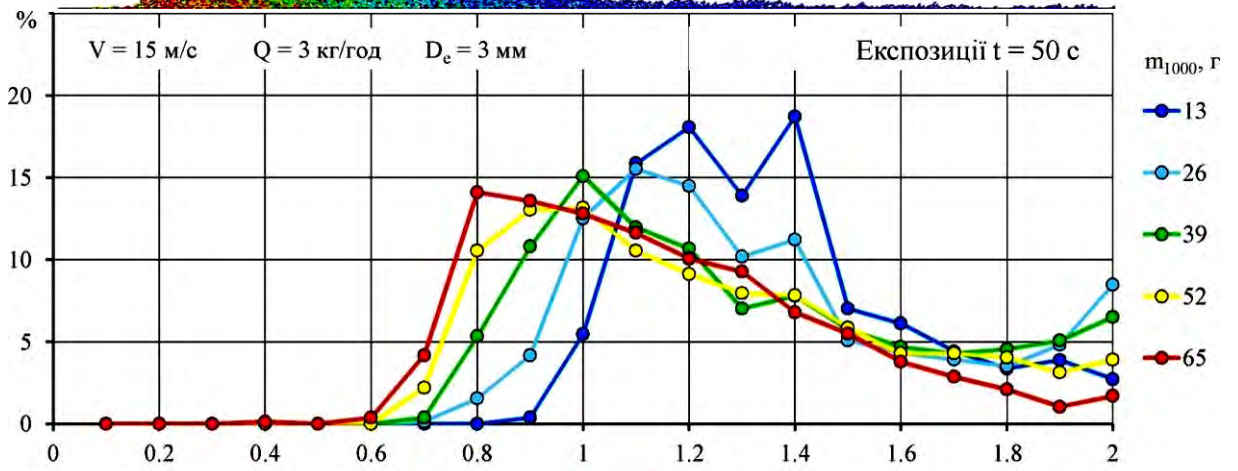
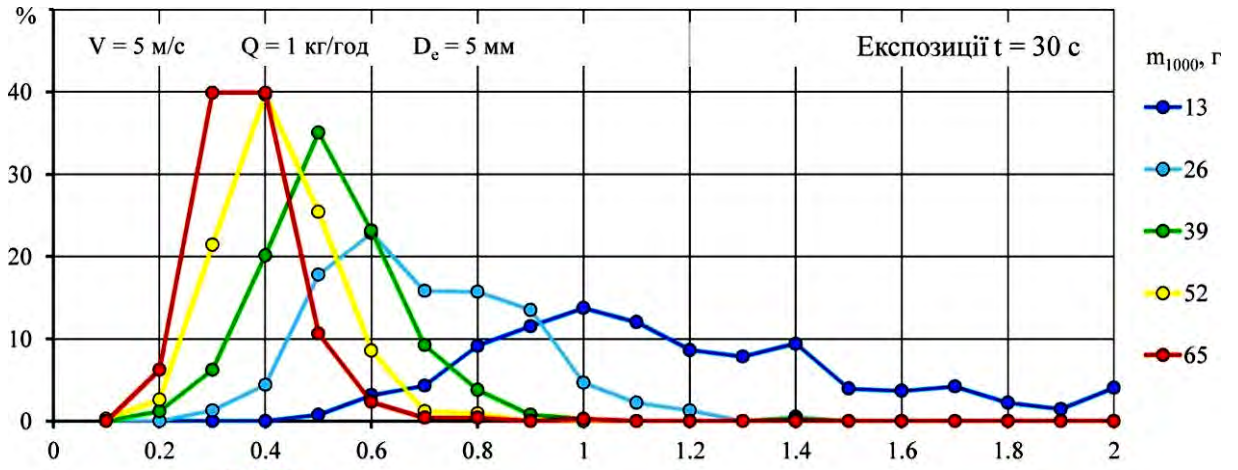


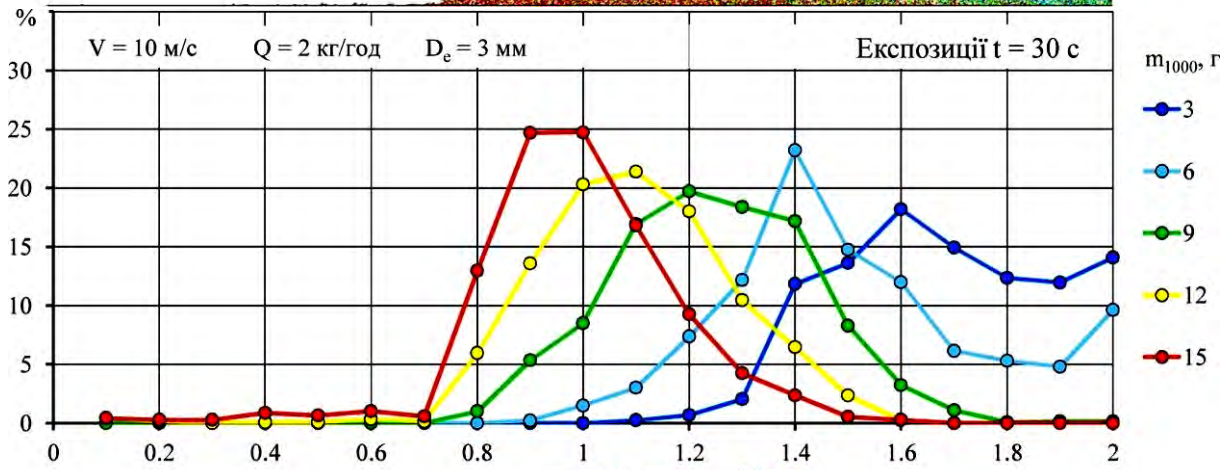
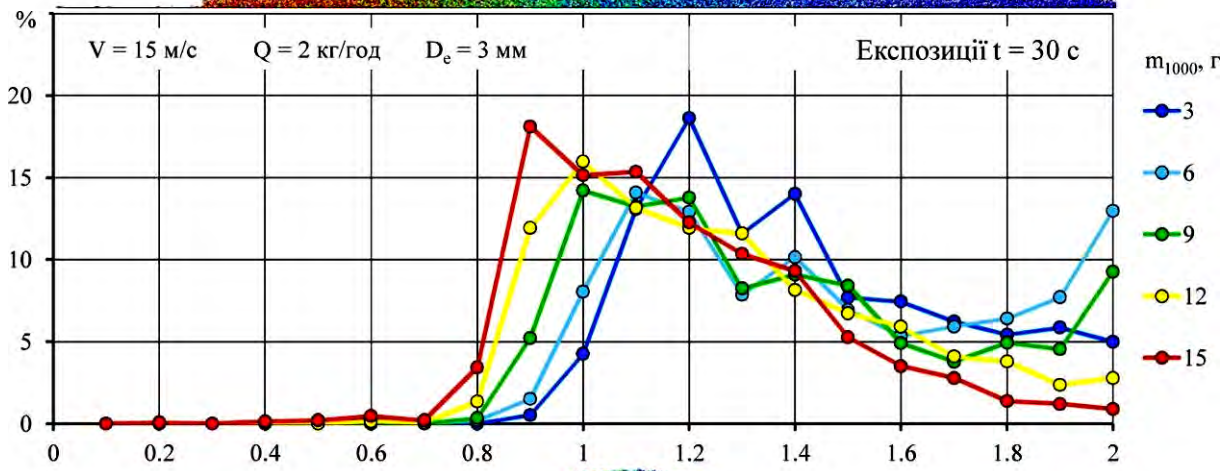
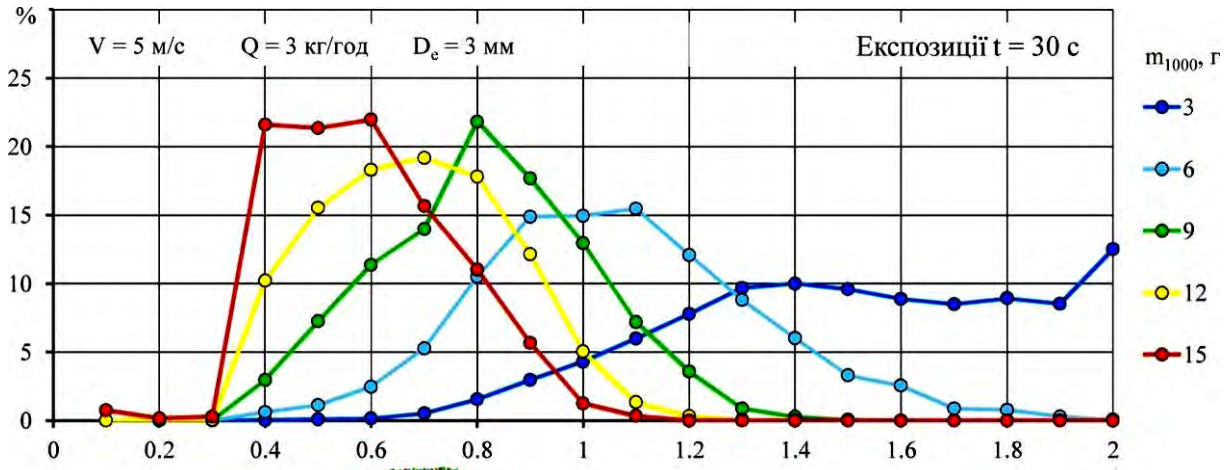


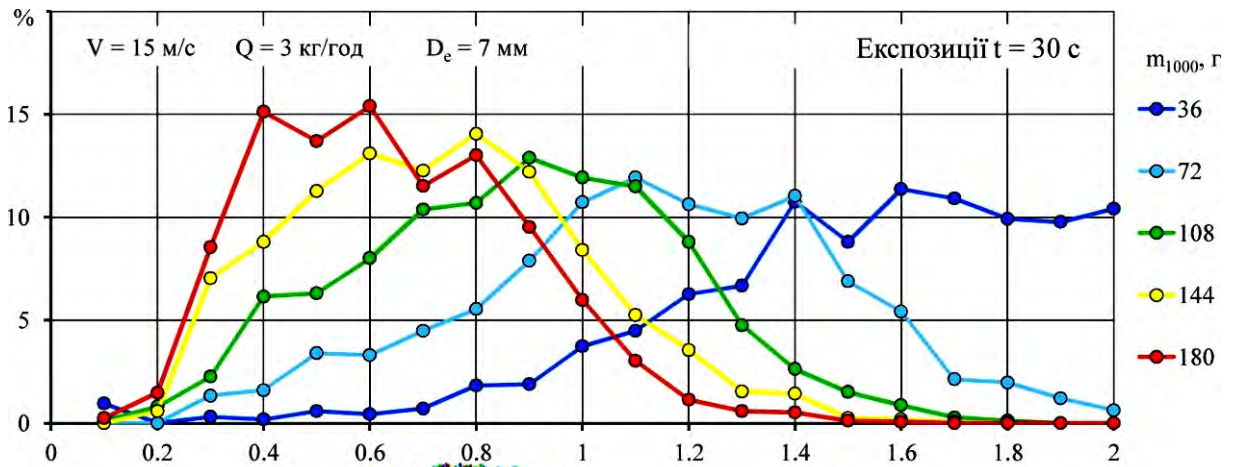
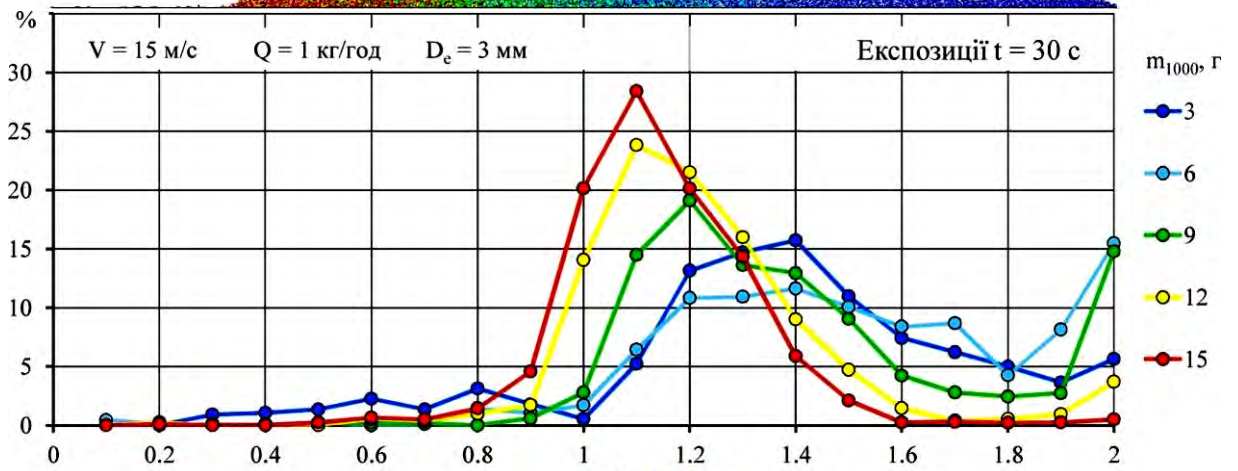
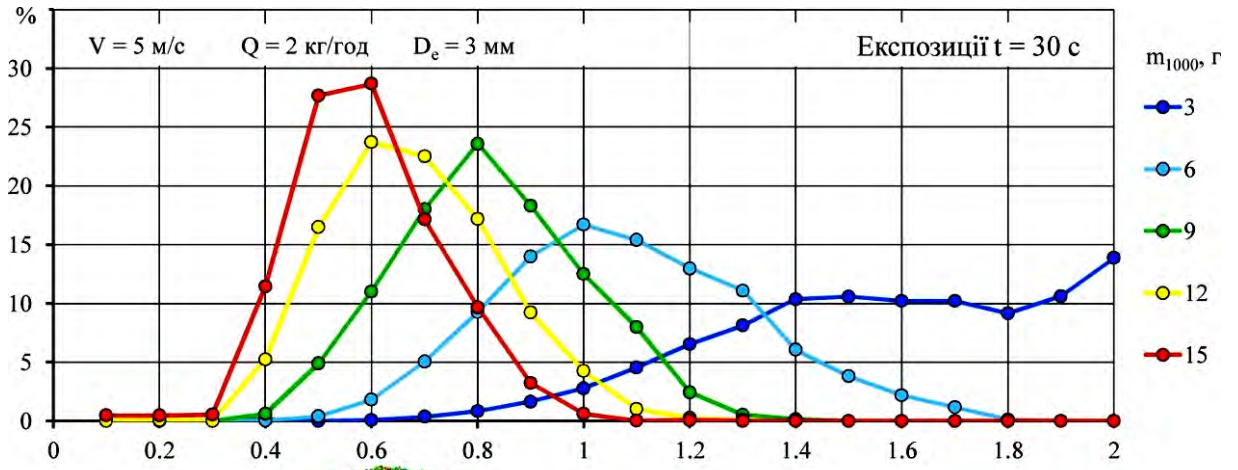












Додаток Д

Чисельне моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією вібруючого решета

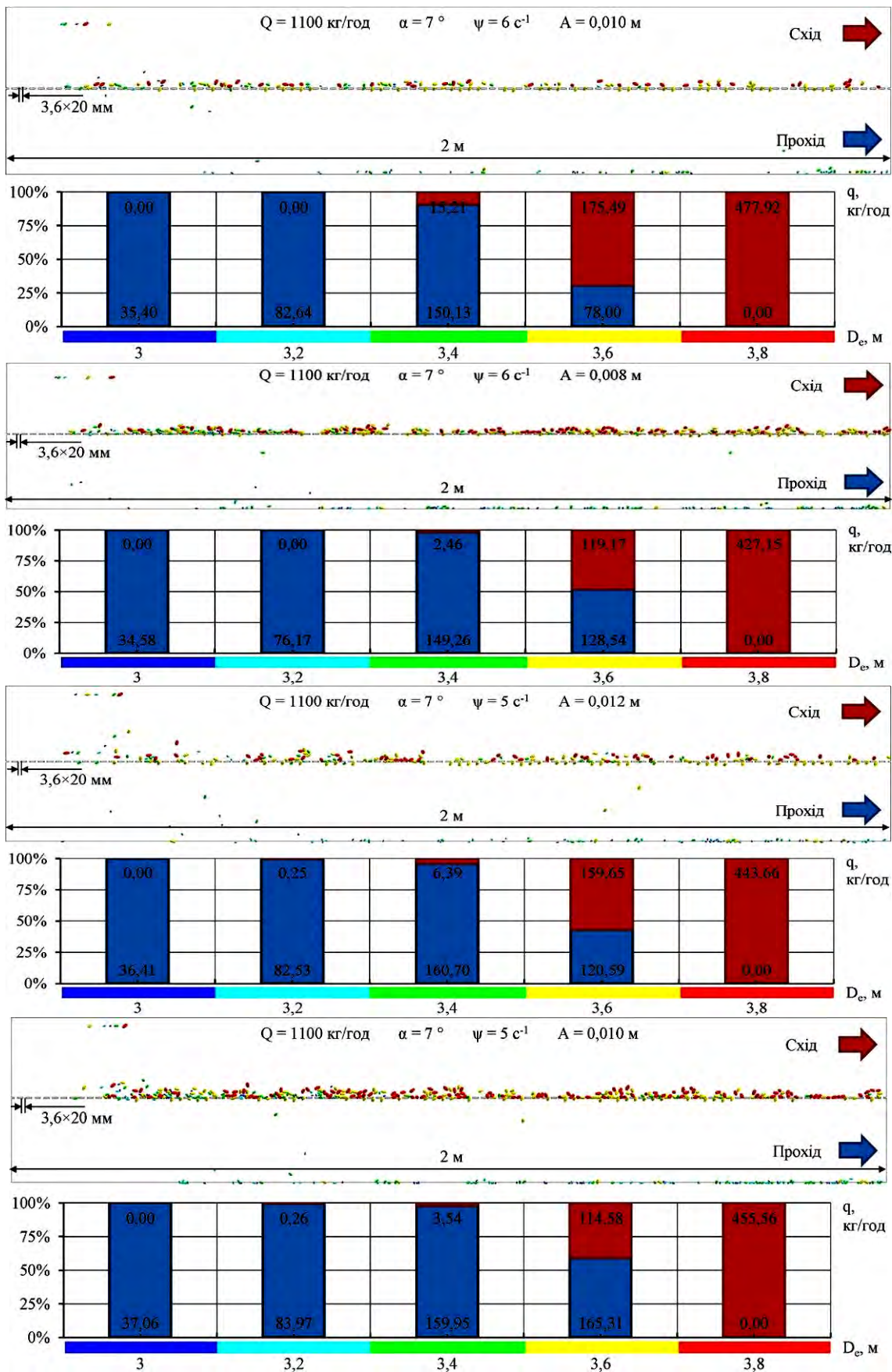
Таблиця Д.1 – Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією вібруючого решета

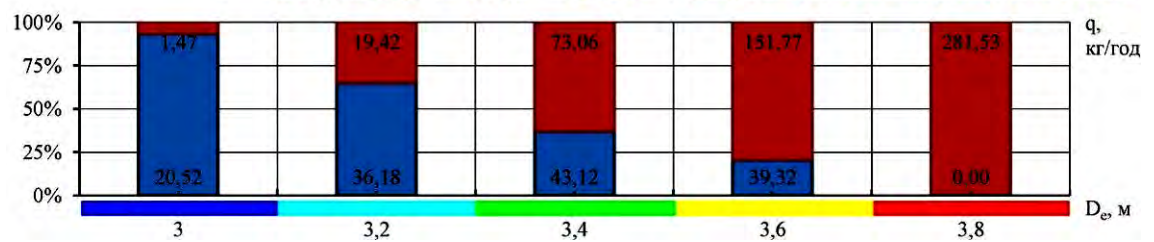
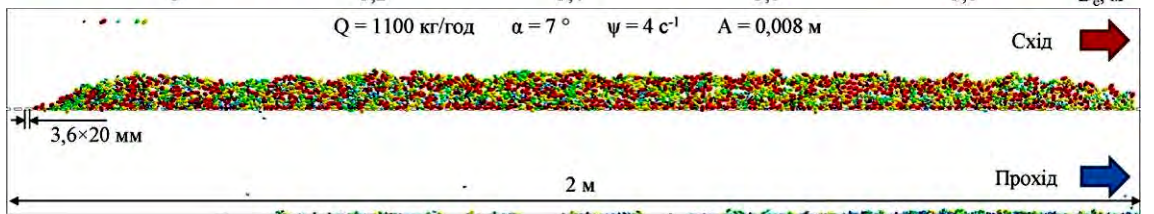
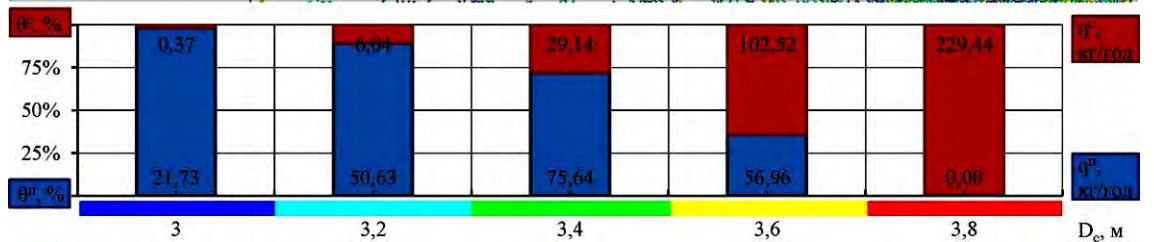
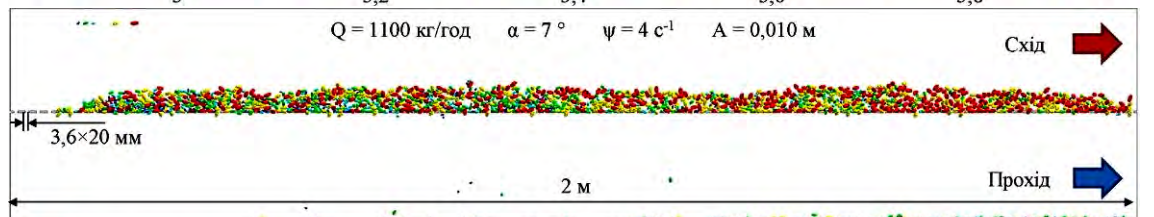
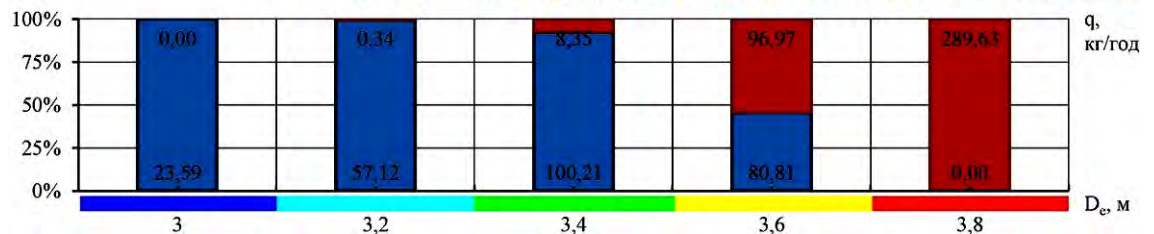
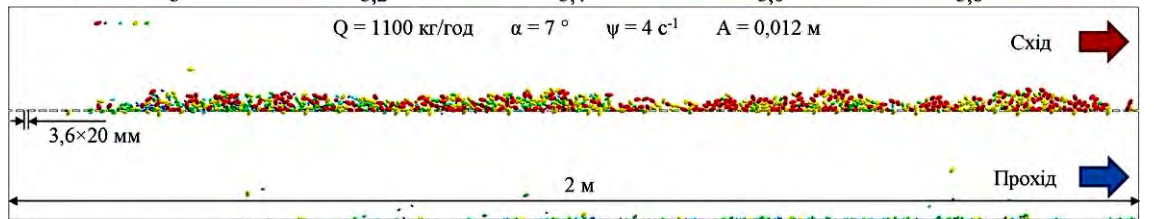
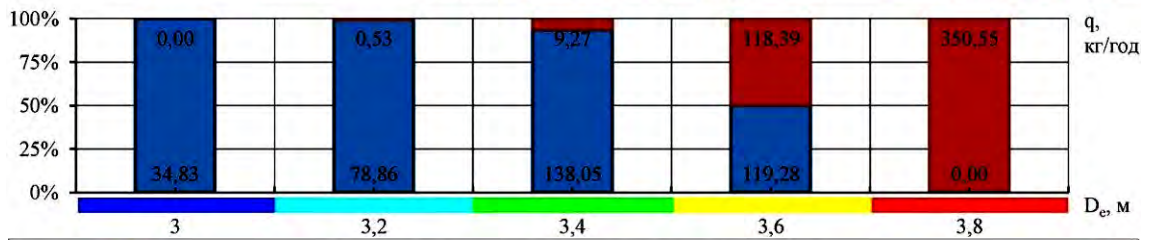
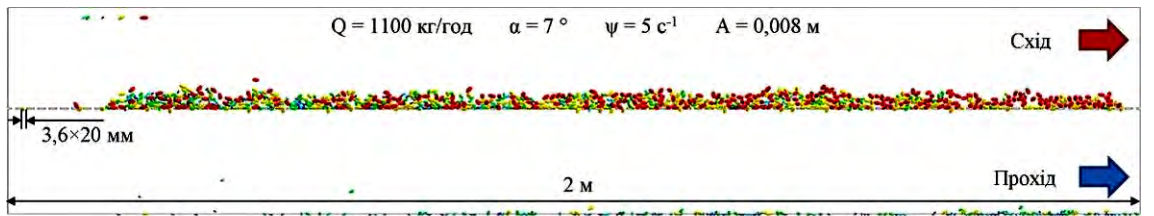
№	Подача насіння Q, кг/год	Кут нахилу α , °	Частота коливань ψ , с ⁻¹	Амплітуда коливань A, м	Продуктивність q, кг/год	Сумарна концентрація насіння θ , %
1	1600	1	4	0,008	665,3	29,45
2	1600	1	4	0,010	724,1	22,21
3	1600	1	4	0,012	856,3	13,84
4	1600	1	5	0,008	1336,2	14,13
5	1600	1	5	0,010	1115,0	12,23
6	1600	1	5	0,012	1374,9	10,46
7	1600	1	6	0,008	1173,9	11,32
8	1600	1	6	0,010	1461,9	8,81
9	1600	1	6	0,012	1459,8	10,40
10	1600	4	4	0,008	691,1	27,99
11	1600	4	4	0,010	916,4	20,12
12	1600	4	4	0,012	850,1	13,86
13	1600	4	5	0,008	1142,2	17,87
14	1600	4	5	0,010	1391,1	12,40
15	1600	4	5	0,012	1371,6	10,62
16	1600	4	6	0,008	1370,4	11,79
17	1600	4	6	0,010	1396,6	11,71
18	1600	4	6	0,012	1448,0	9,79
19	1600	7	4	0,008	1124,9	26,53
20	1600	7	4	0,010	1225,1	17,26
21	1600	7	4	0,012	1300,9	12,11
22	1600	7	5	0,008	1314,1	13,56
23	1600	7	5	0,010	1342,7	12,51
24	1600	7	5	0,012	1409,0	12,64
25	1600	7	6	0,008	699,8	12,66
26	1600	7	6	0,010	720,4	9,67
27	1600	7	6	0,012	767,3	10,34
28	2100	1	4	0,008	977,7	31,73
29	2100	1	4	0,010	1012,6	23,14
30	2100	1	4	0,012	1264,2	16,92
31	2100	1	5	0,008	1525,2	16,1
32	2100	1	5	0,010	1814,8	10,6
33	2100	1	5	0,012	1359,7	11,3
34	2100	1	6	0,008	1739,4	10,5
35	2100	1	6	0,010	1827,5	8,5
36	2100	1	6	0,012	1865,7	9,7
37	2100	4	4	0,008	1124,2	27,0
38	2100	4	4	0,010	1058,4	21,2
39	2100	4	4	0,012	1117,4	15,8

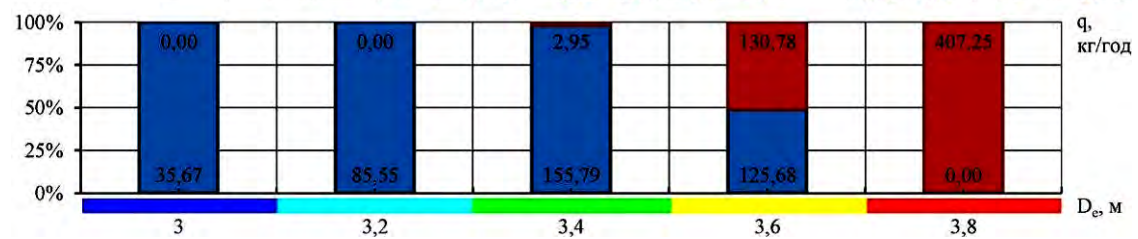
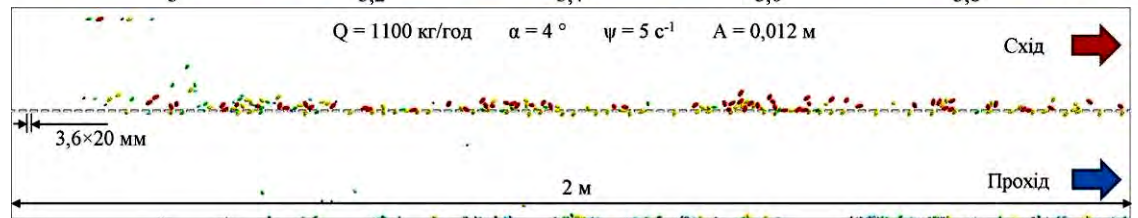
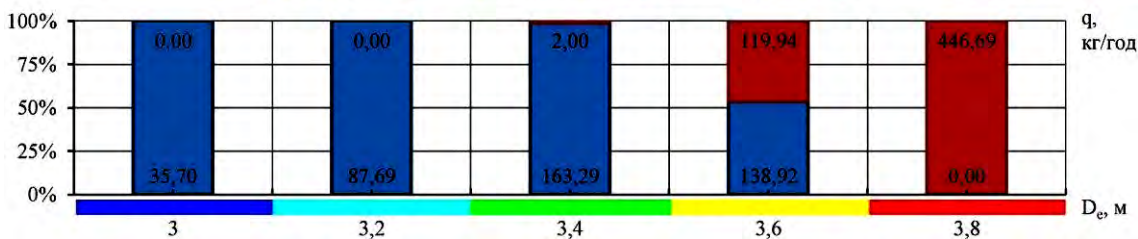
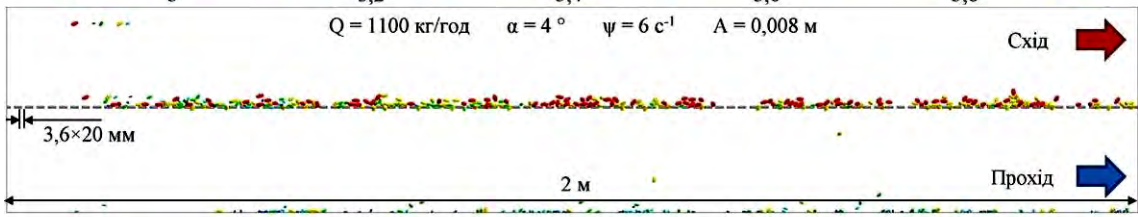
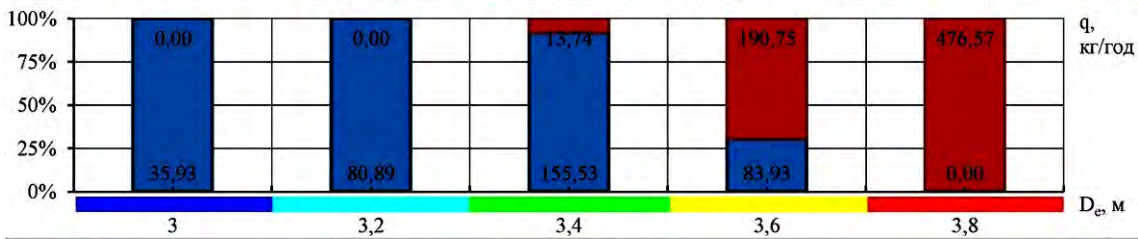
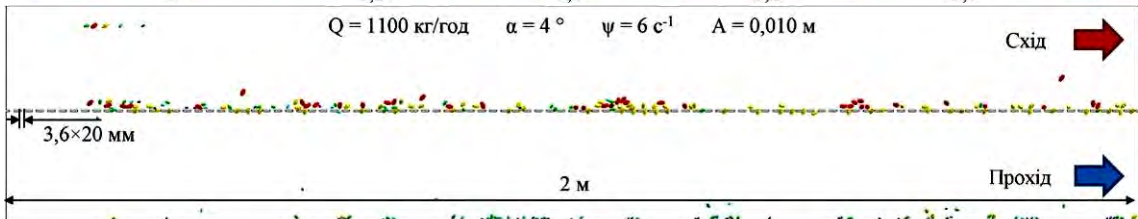
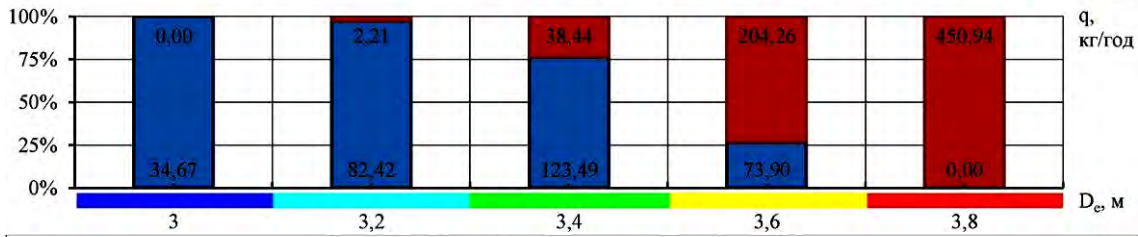
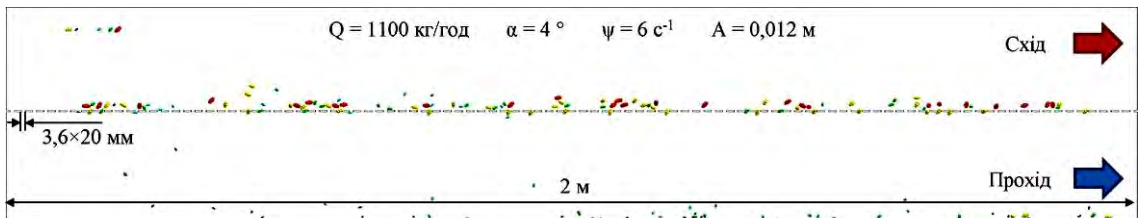
№	Подача насіння Q, кг/год	Кут нахилу α , °	Частота коливань ψ , с ⁻¹	Амплітуда коливань A, м	Продуктивність q, кг/год	Сумарна концентрація насіння θ , %
40	2100	4	5	0,008	1587,6	17,7
41	2100	4	5	0,010	1740,6	11,1
42	2100	4	5	0,012	1789,5	10,4
43	2100	4	6	0,008	1783,6	10,7
44	2100	4	6	0,010	1811,9	9,3
45	2100	4	6	0,012	1847,8	10,2
46	2100	7	4	0,008	540,4	24,3
47	2100	7	4	0,010	1079,9	18,0
48	2100	7	4	0,012	1209,0	13,6
49	2100	7	5	0,008	1803,6	14,3
50	2100	7	5	0,010	1740,2	11,4
51	2100	7	5	0,012	1763,3	10,6
52	2100	7	6	0,008	1791,6	11,3
53	2100	7	6	0,010	1857,6	9,8
54	2100	7	6	0,012	1898,8	10,0
55	1100	1	4	0,008	248,0	26,4
56	1100	1	4	0,010	457,4	19,5
57	1100	1	4	0,012	495,7	14,1
58	1100	1	5	0,008	808,5	14,2
59	1100	1	5	0,010	1011,3	13,9
60	1100	1	5	0,012	986,5	13,8
61	1100	1	6	0,008	980,4	13,9
62	1100	1	6	0,010	998,5	10,5
63	1100	1	6	0,012	998,4	10,8
64	1100	4	4	0,008	337,2	24,5
65	1100	4	4	0,010	497,9	18,8
66	1100	4	4	0,012	509,9	14,2
67	1100	4	5	0,008	714,3	17,1
68	1100	4	5	0,010	906,5	12,5
69	1100	4	5	0,012	943,7	12,2
70	1100	4	6	0,008	994,2	12,8
71	1100	4	6	0,010	1037,3	8,9
72	1100	4	6	0,012	1010,3	11,4
73	1100	7	4	0,008	666,4	23,5
74	1100	7	4	0,010	572,5	16,3
75	1100	7	4	0,012	657,0	12,6
76	1100	7	5	0,008	849,8	13,7
77	1100	7	5	0,010	1020,2	15,1
78	1100	7	5	0,012	1010,2	11,5
79	1100	7	6	0,008	937,3	12,7
80	1100	7	6	0,010	1014,8	8,7
81	1100	7	6	0,012	988,6	9,0

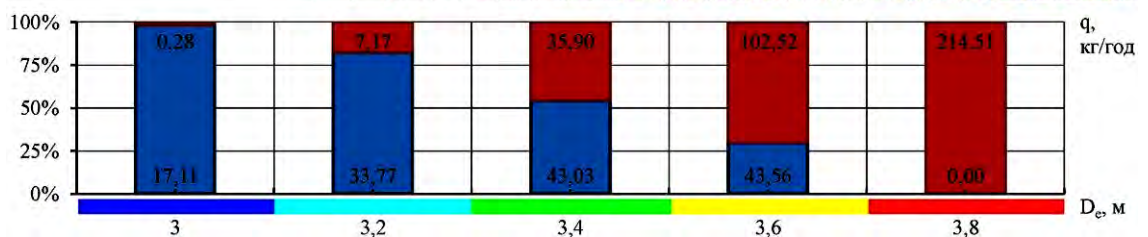
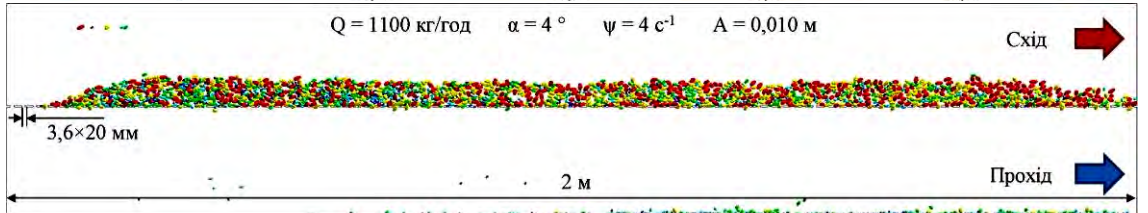
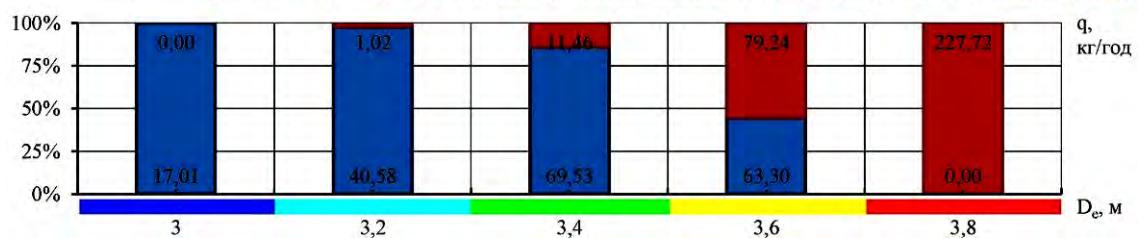
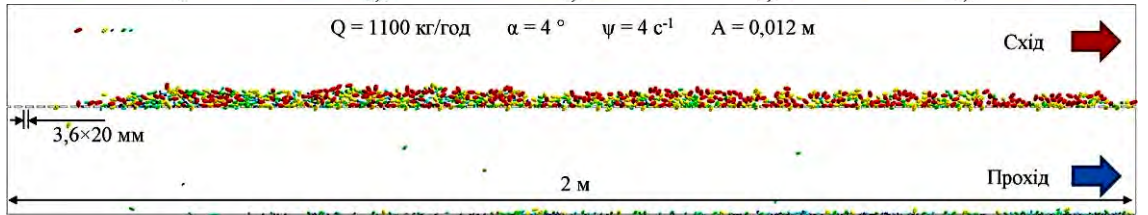
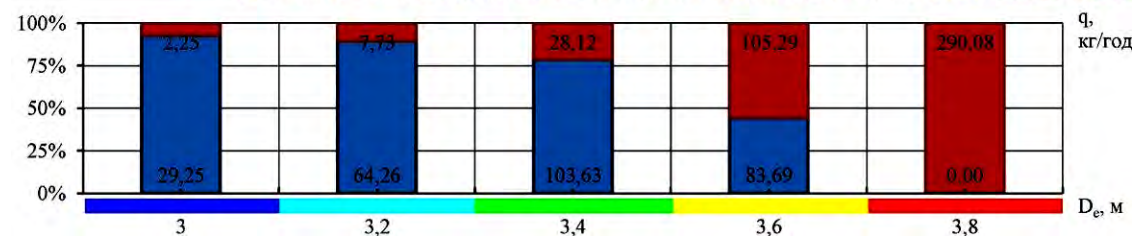
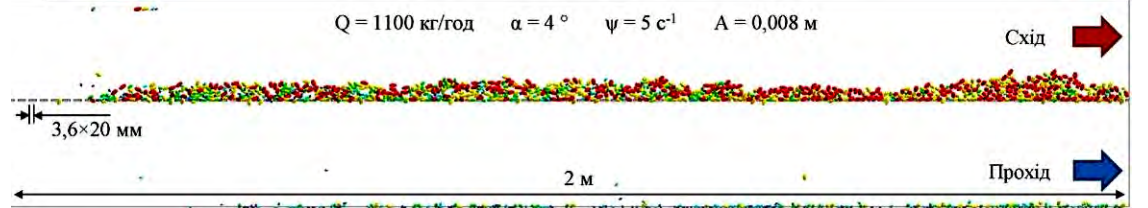
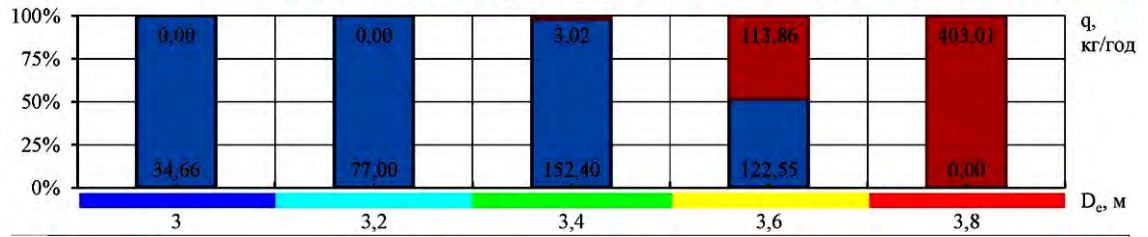
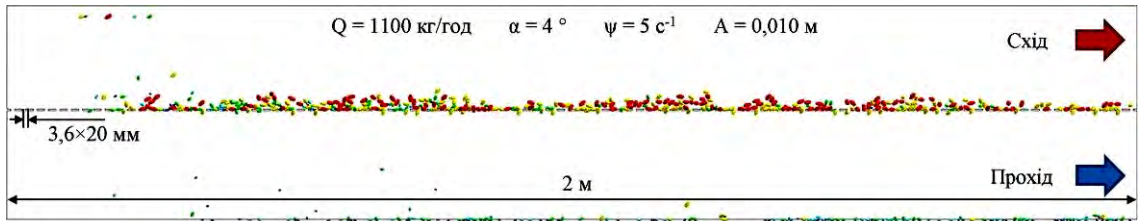
Додаток Е

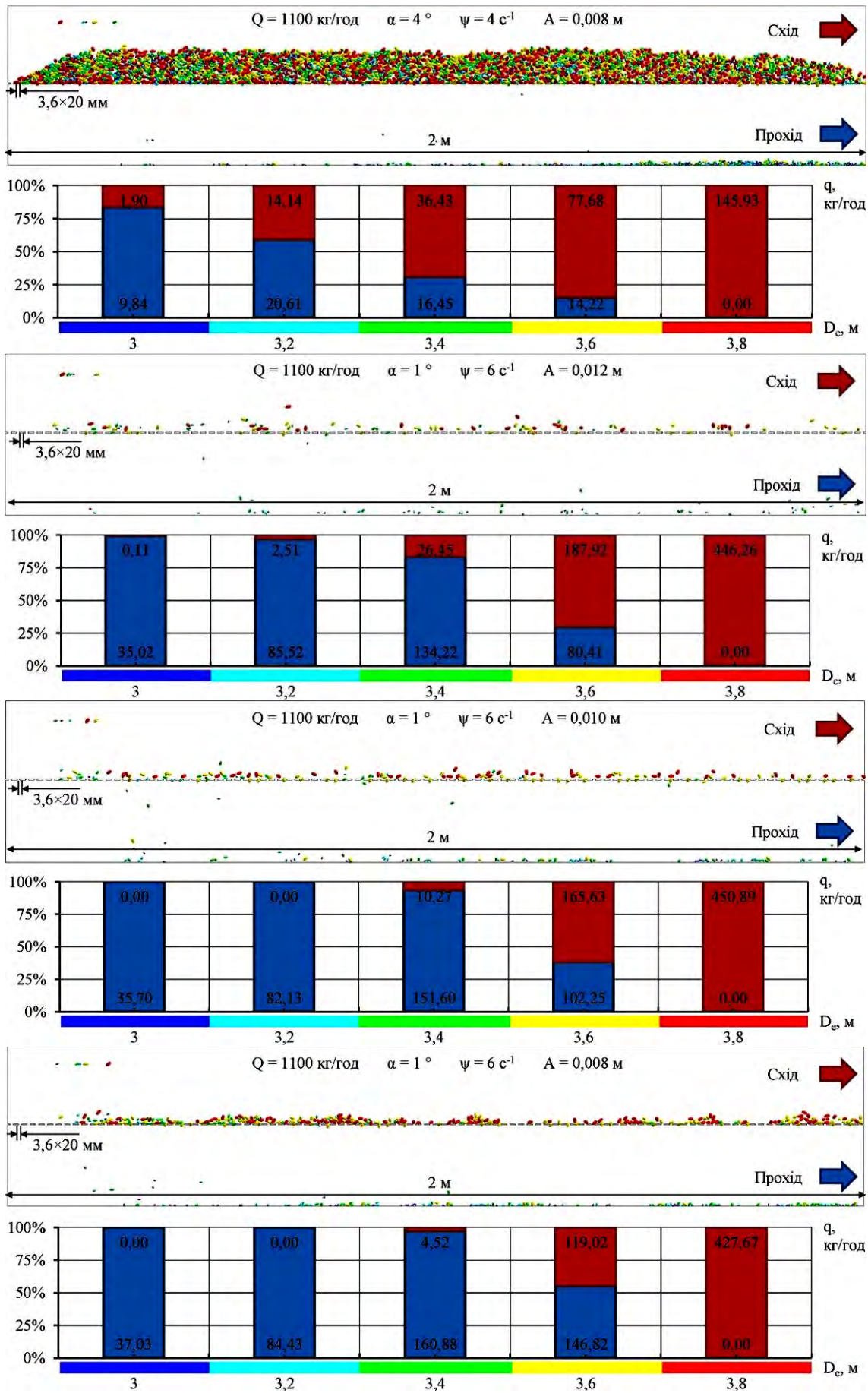
Розподіл фракцій насіння на виході сходу і проходу, що утворився під дією
вібраючого решета

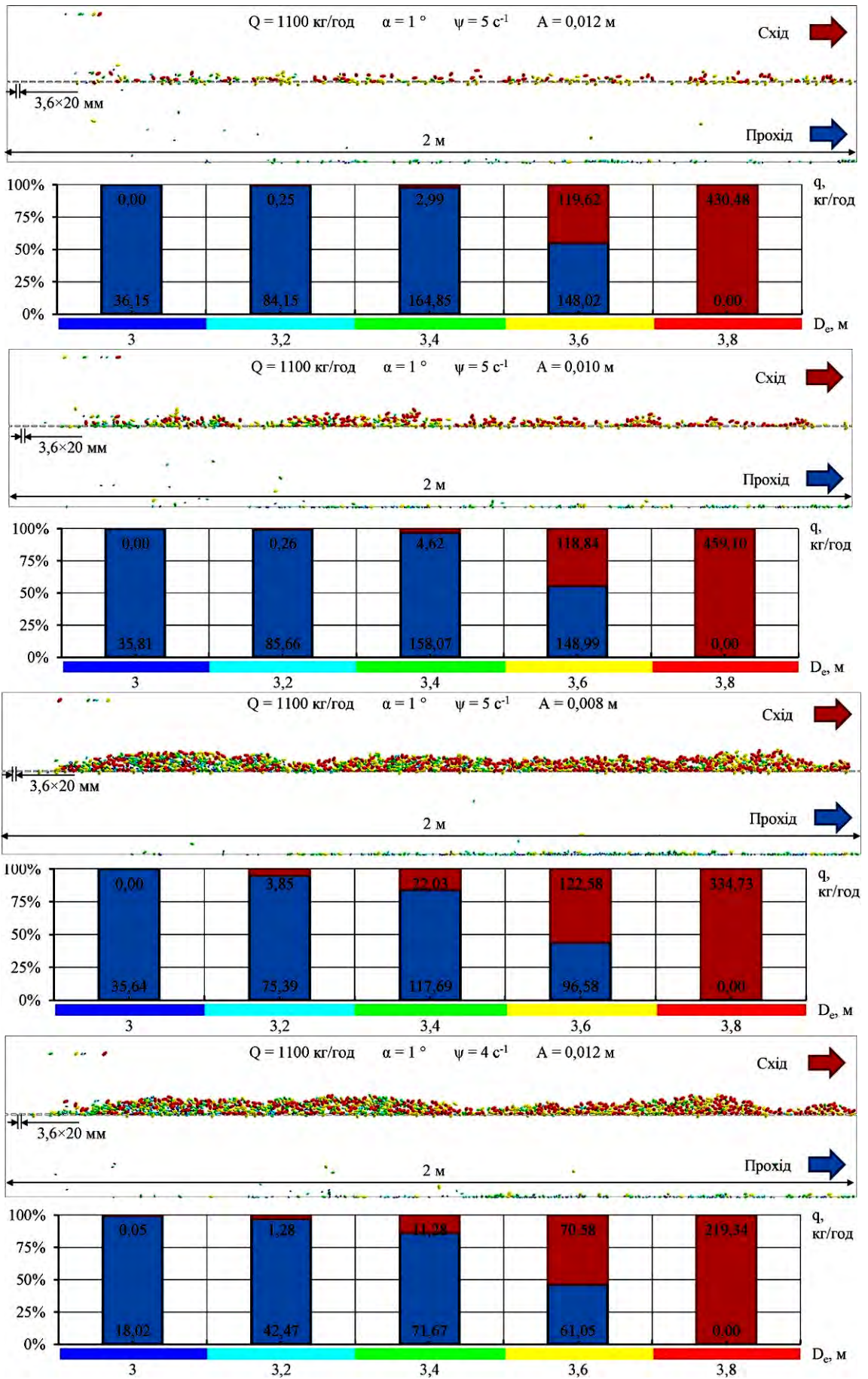


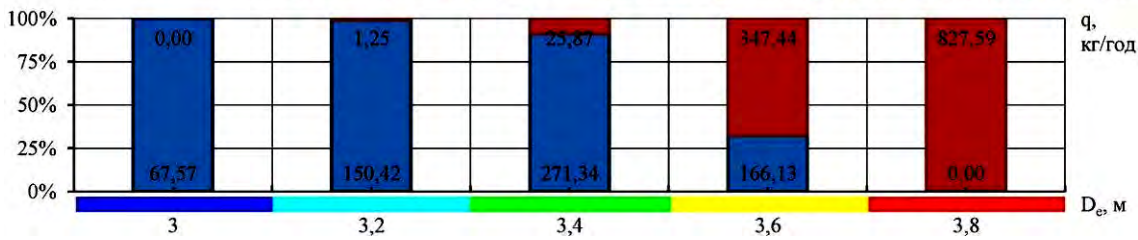
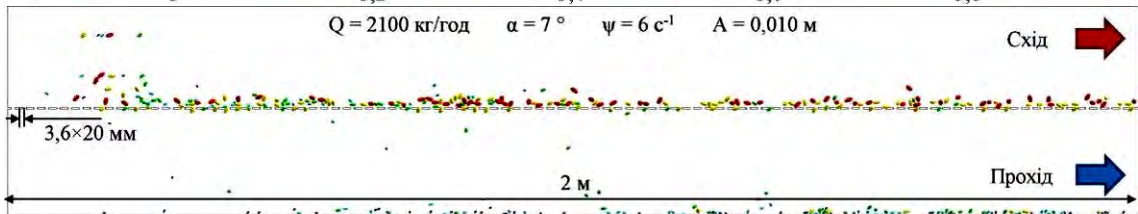
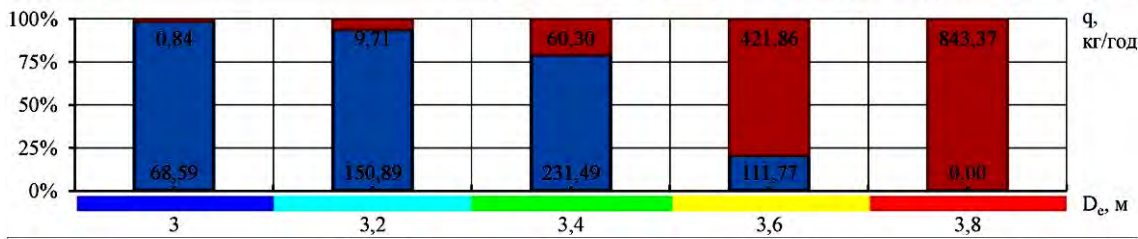
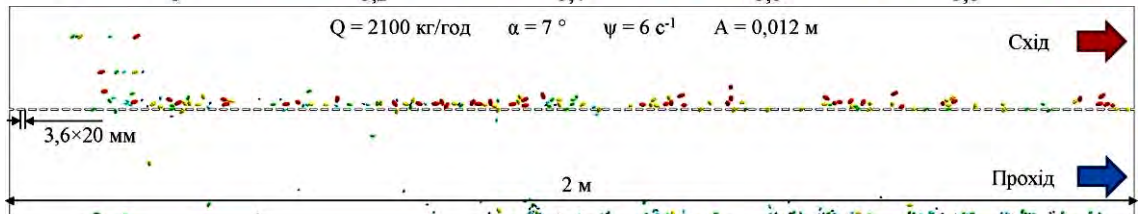
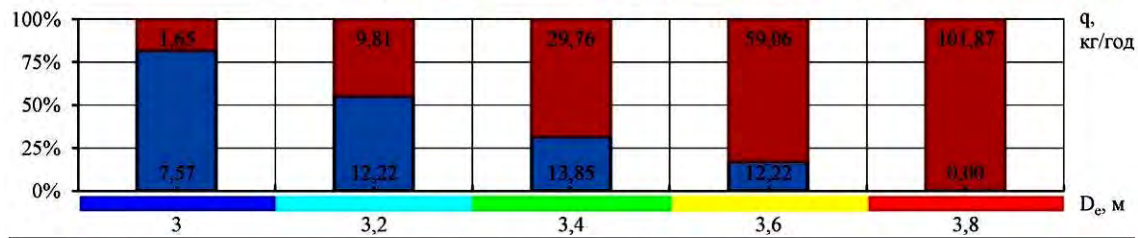
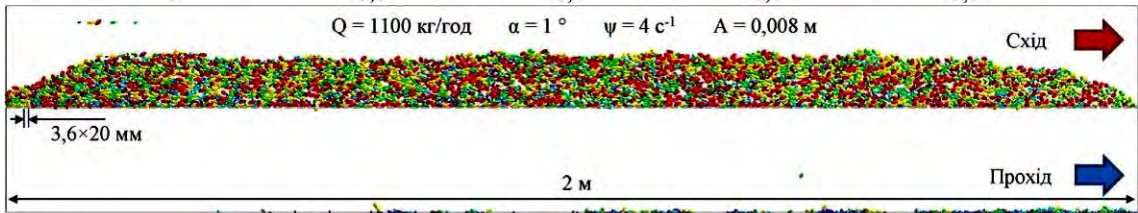
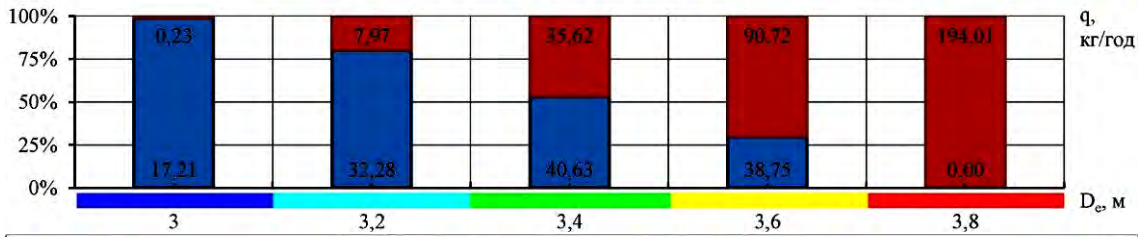
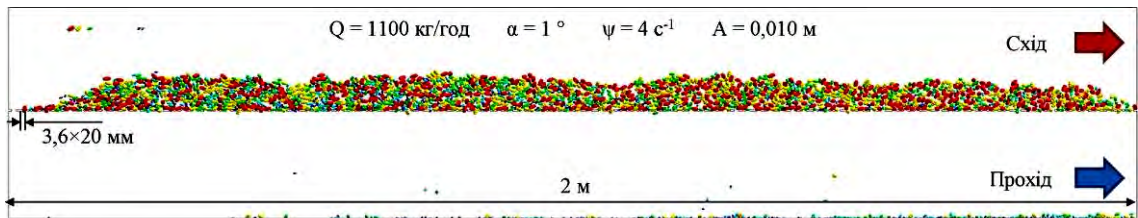


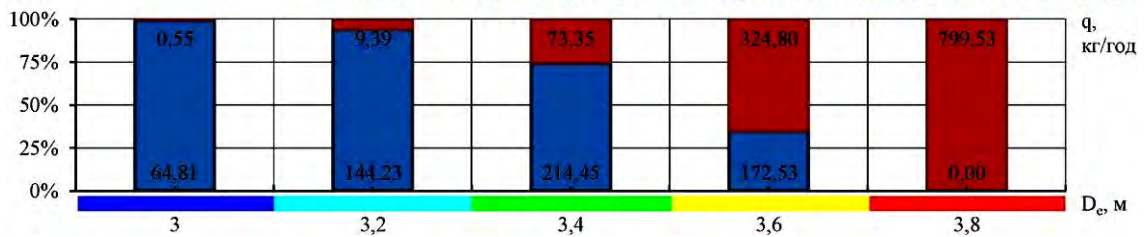
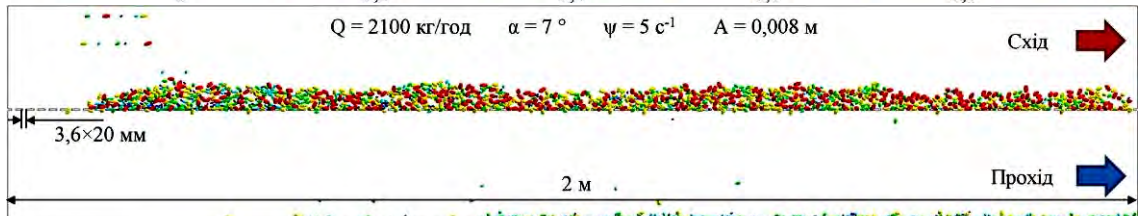
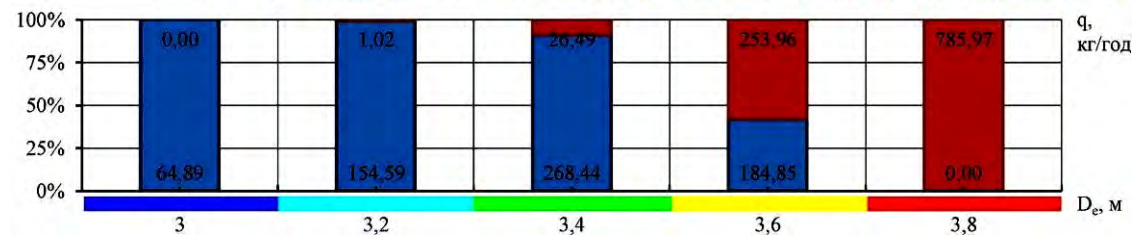
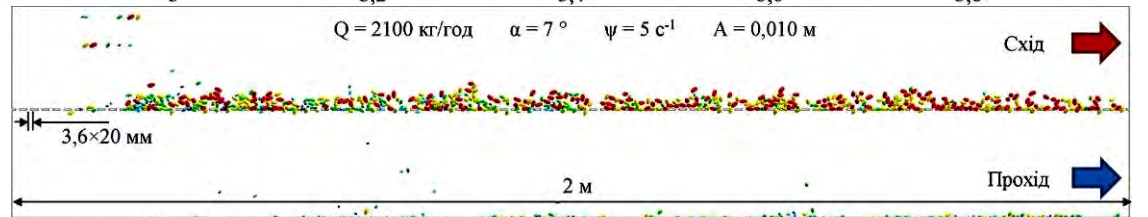
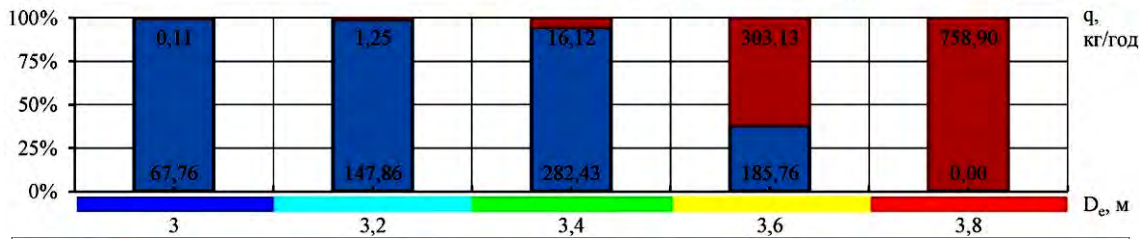
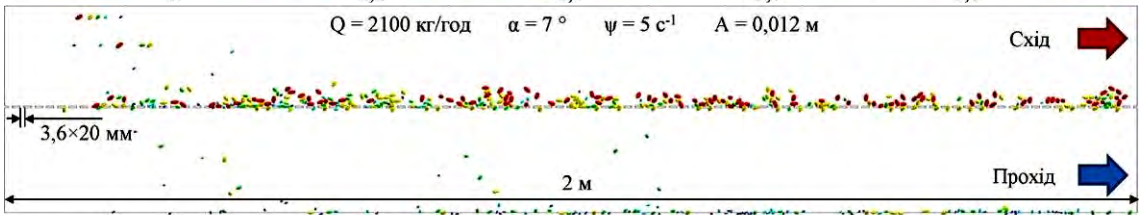
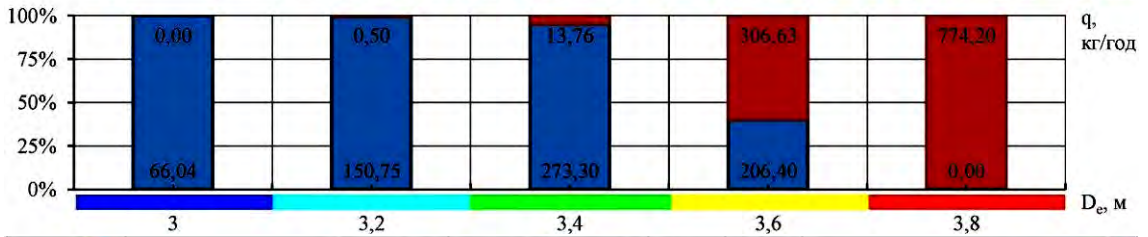
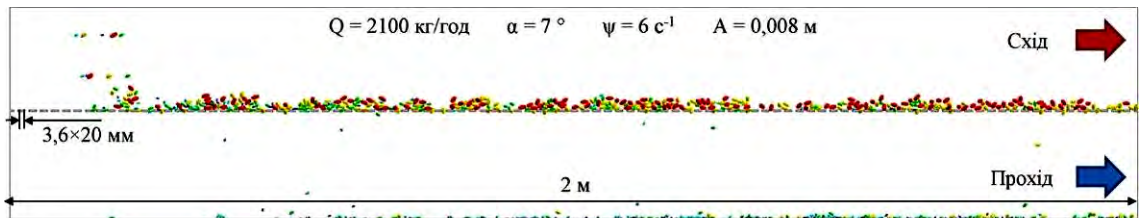


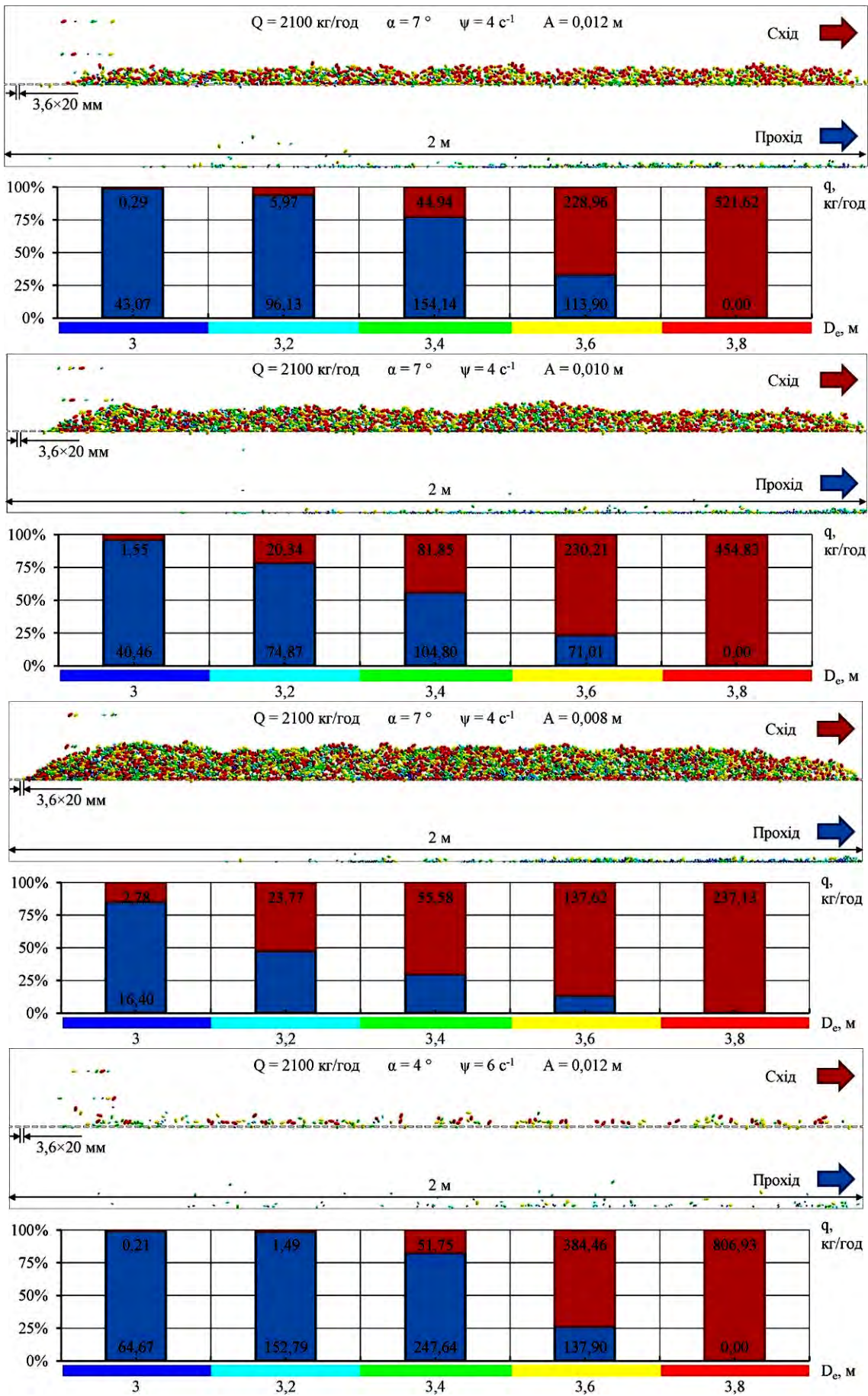


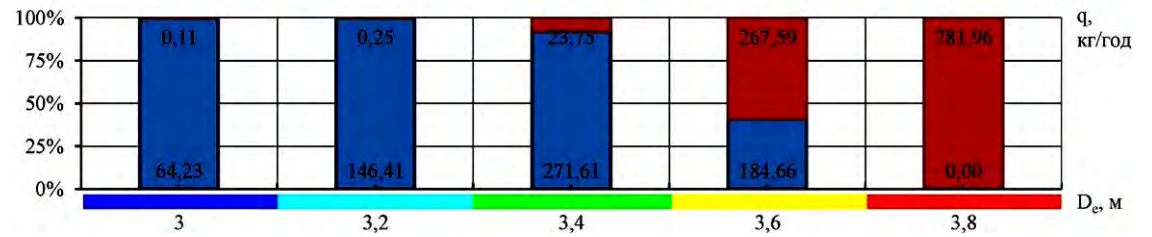
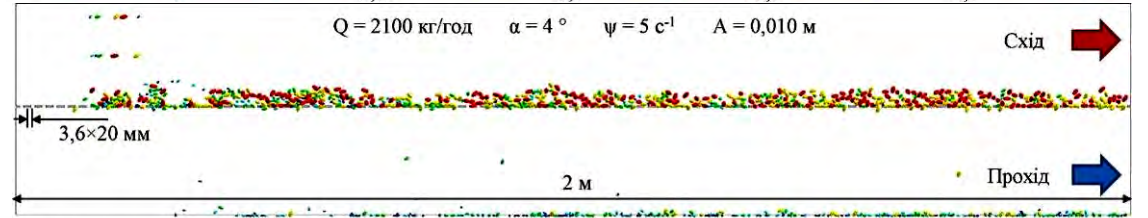
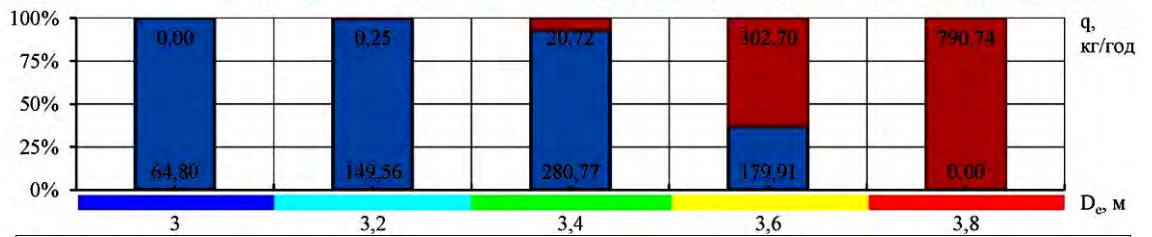
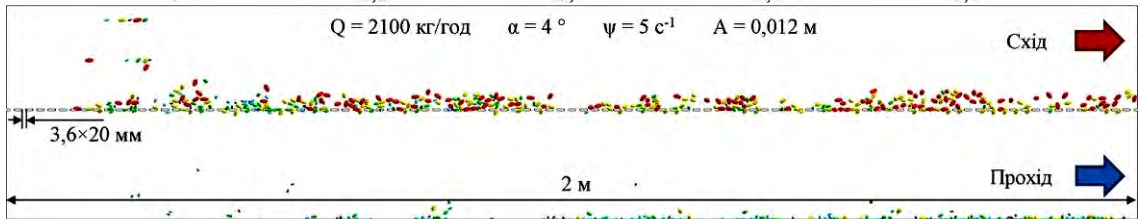
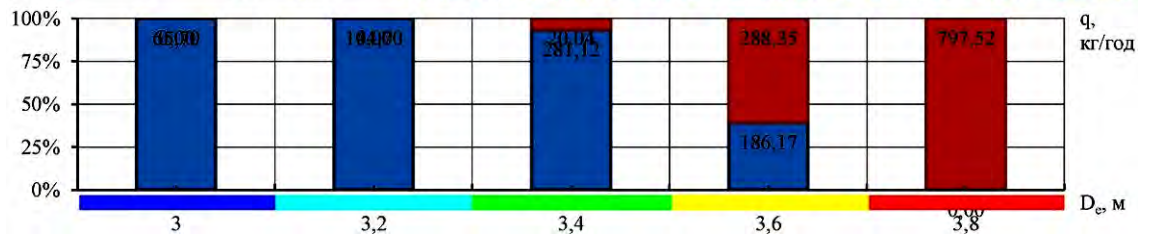
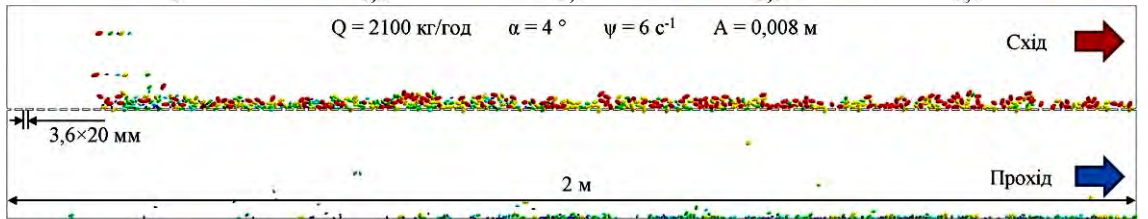
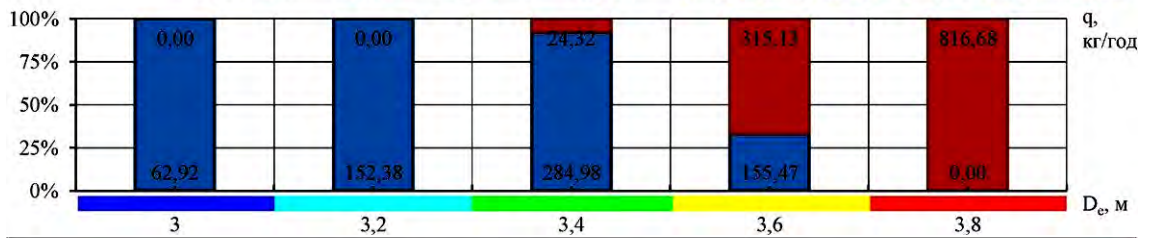
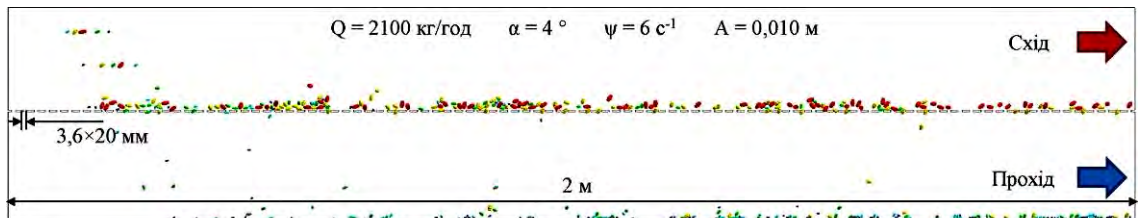


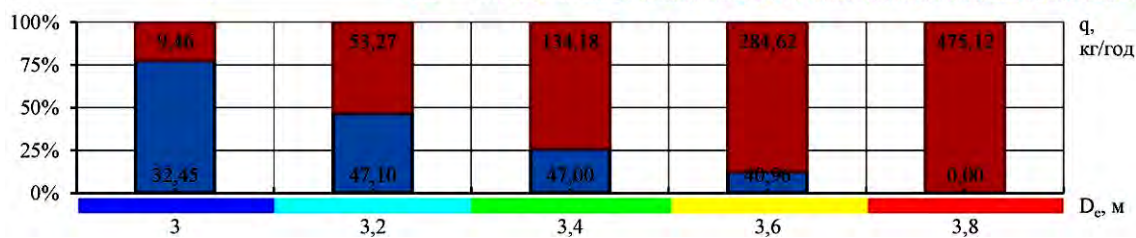
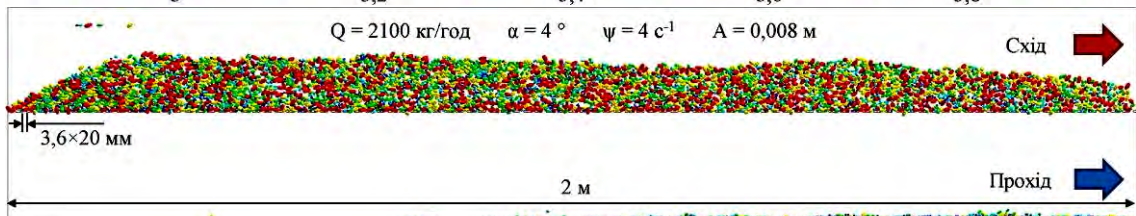
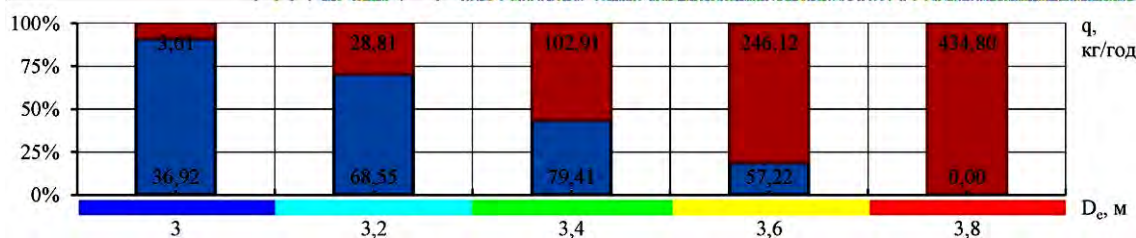
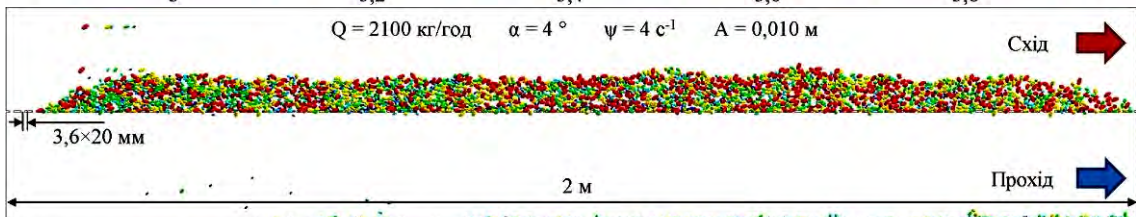
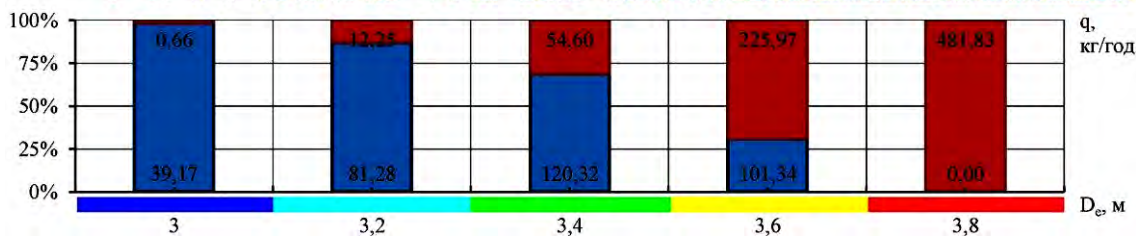
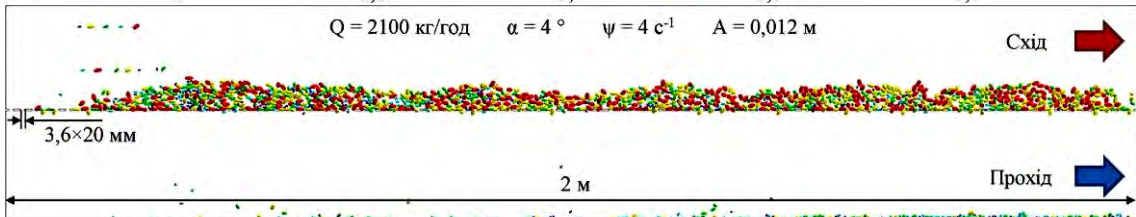
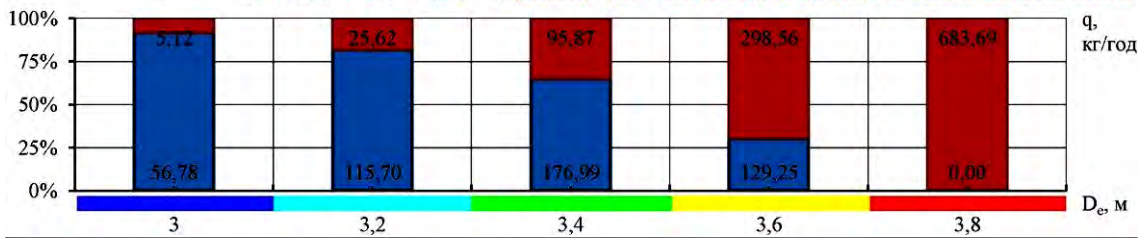
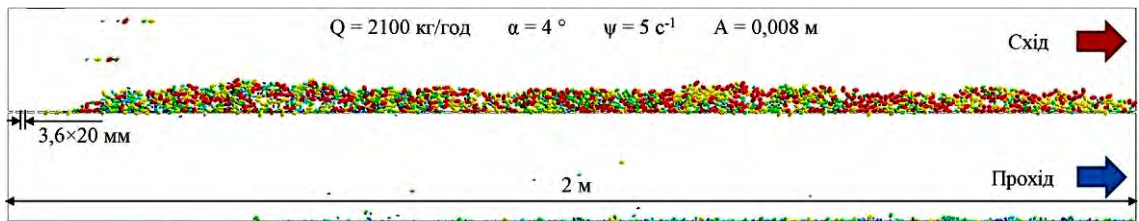


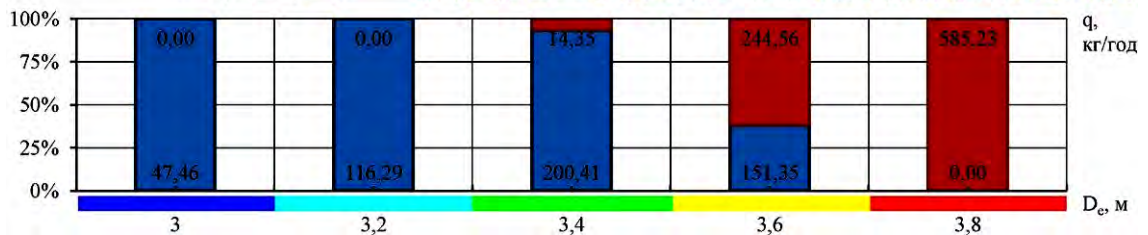
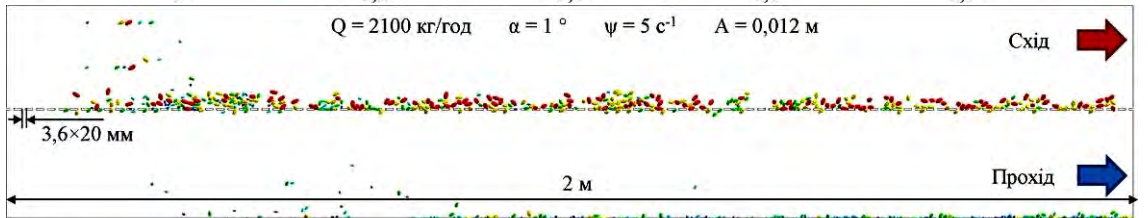
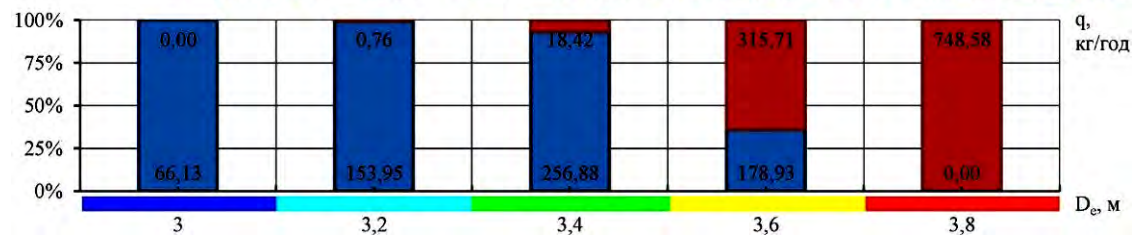
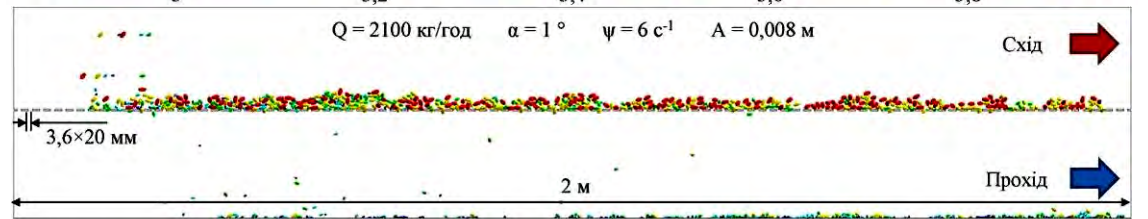
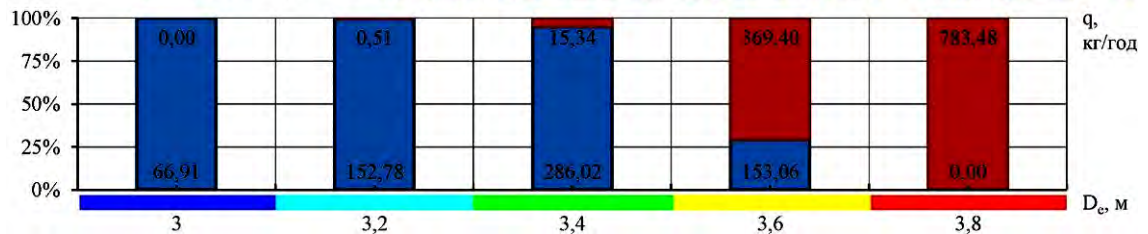
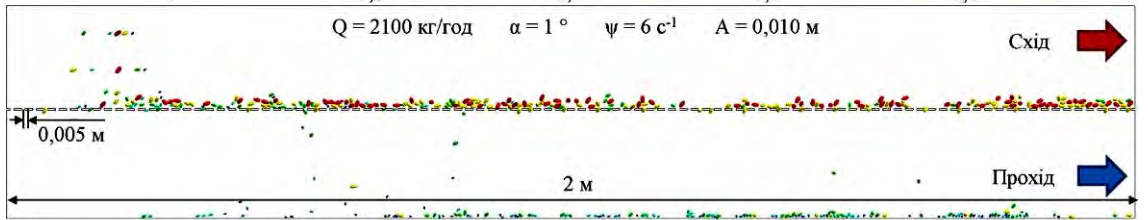
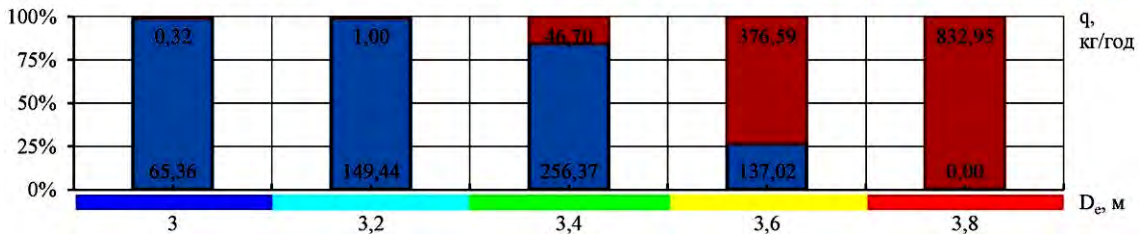
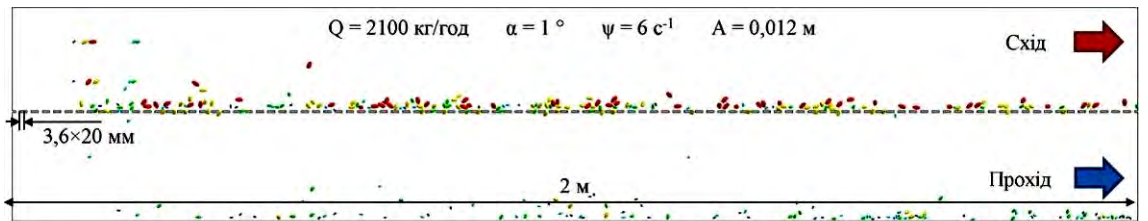


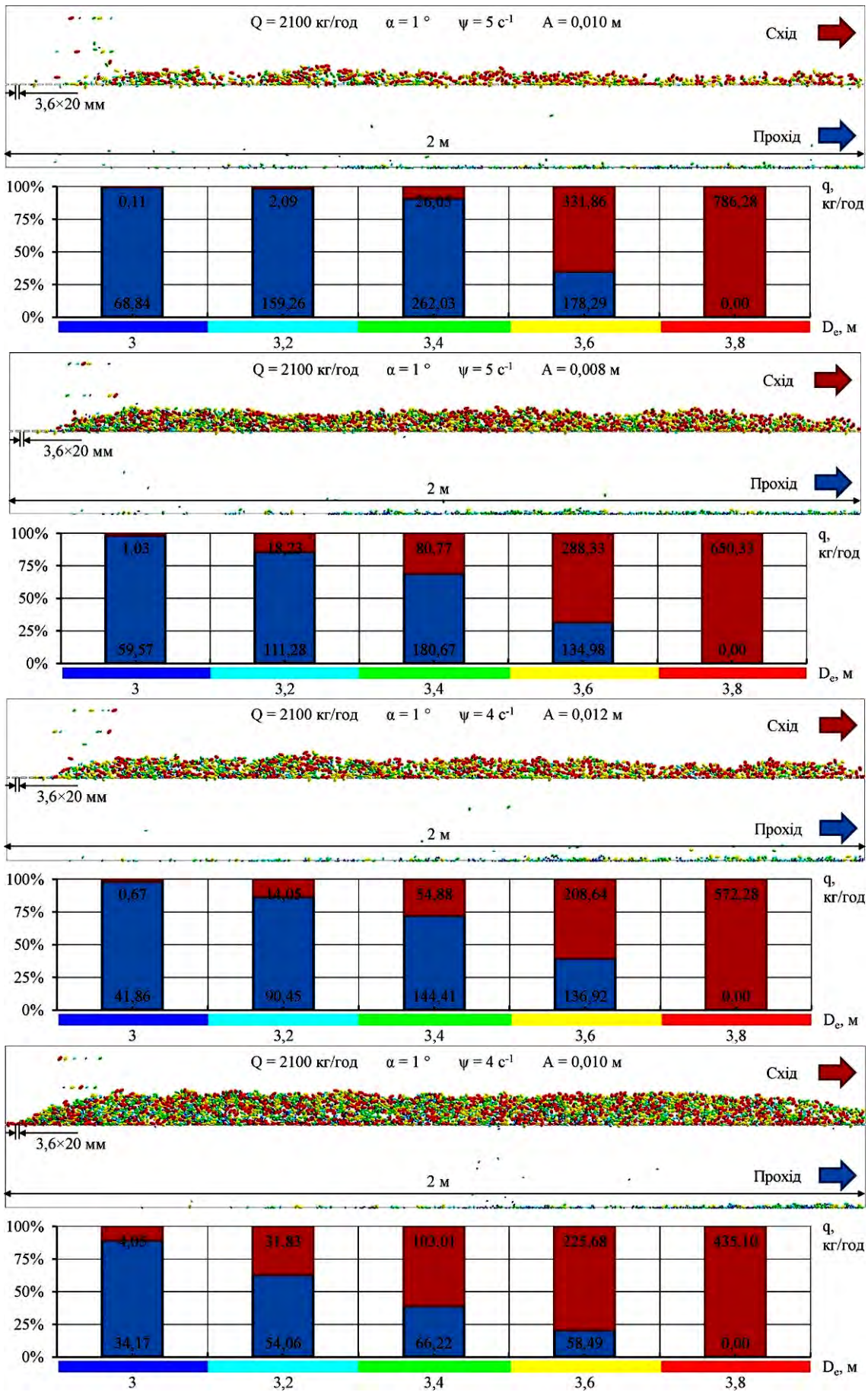


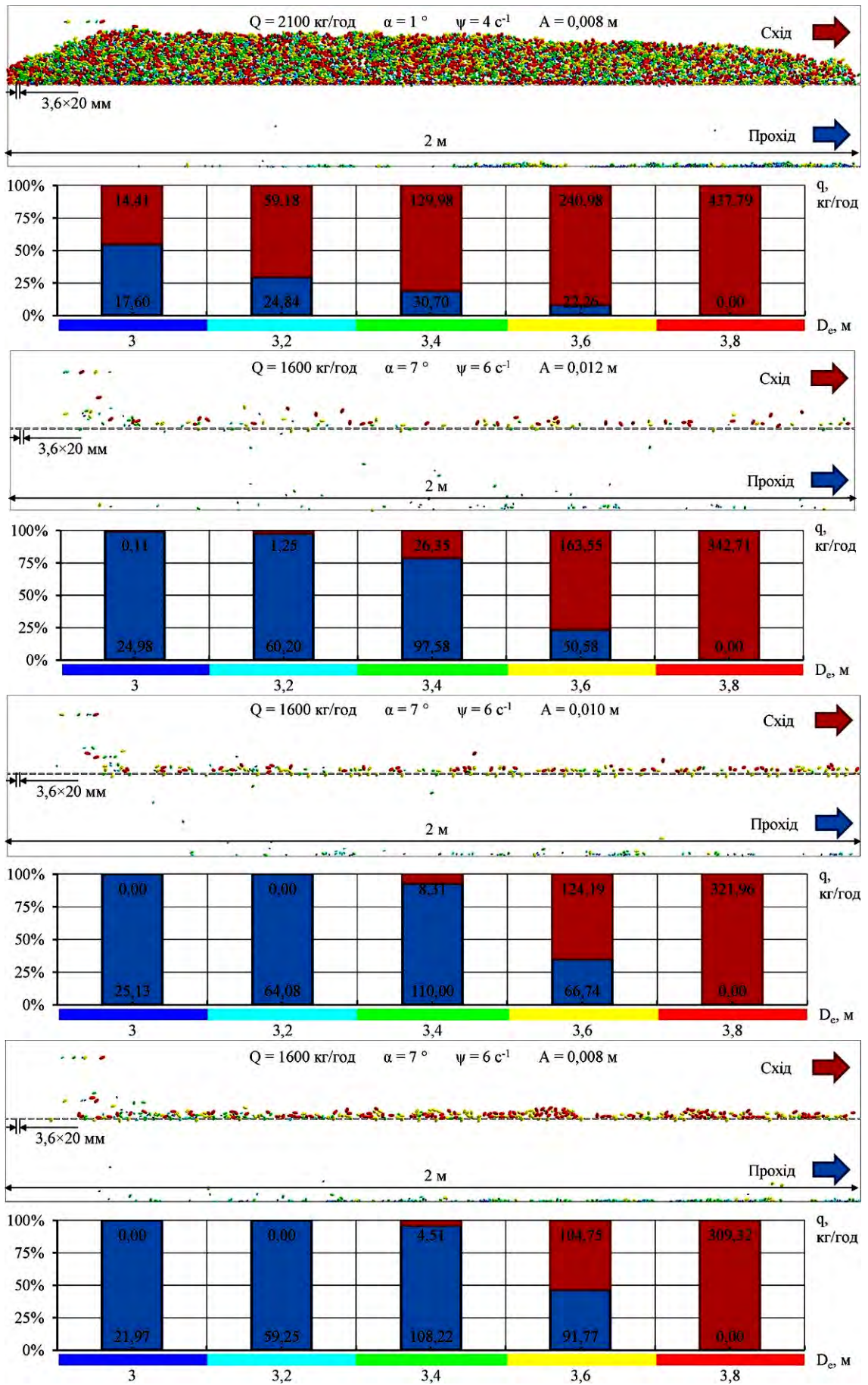


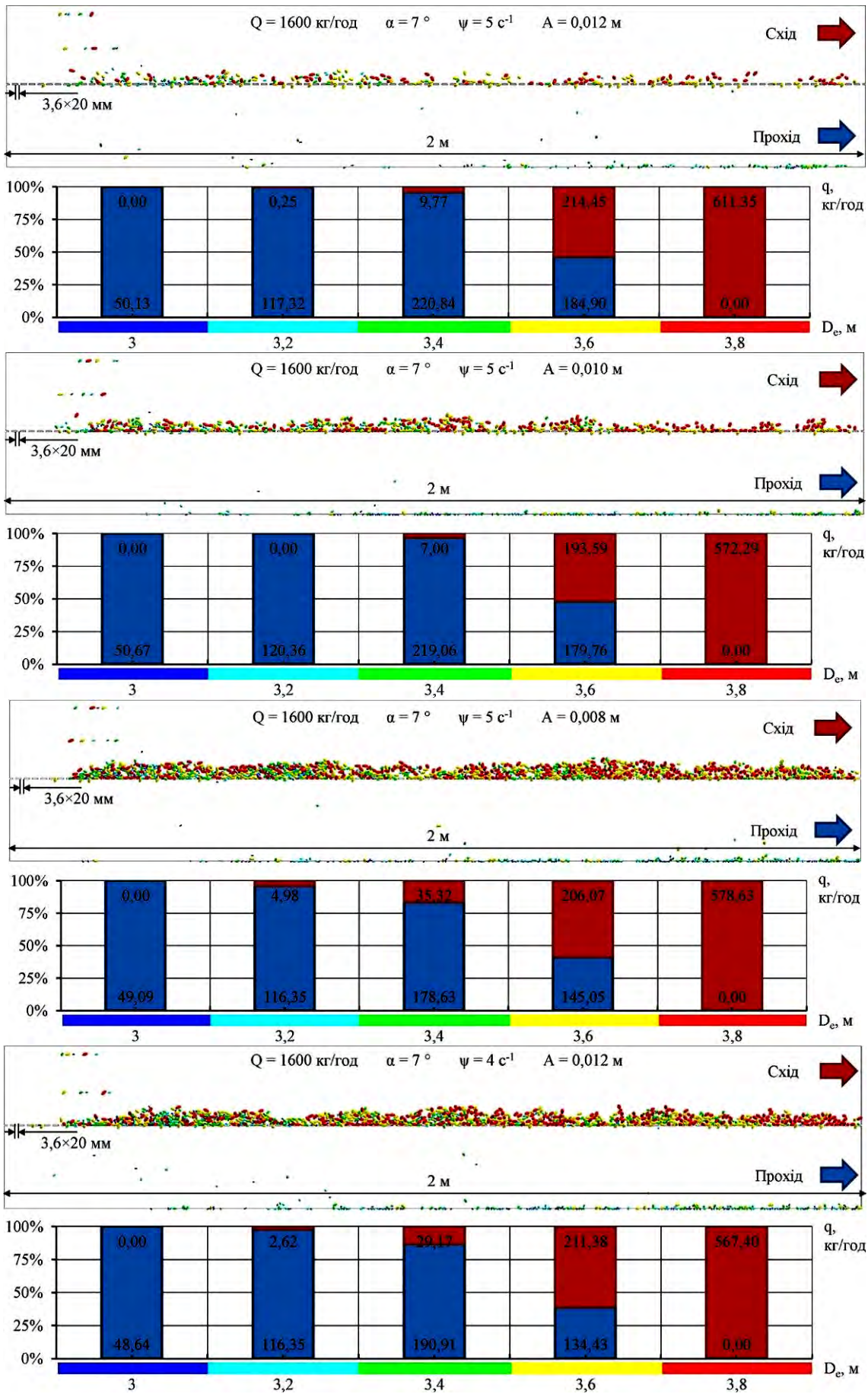


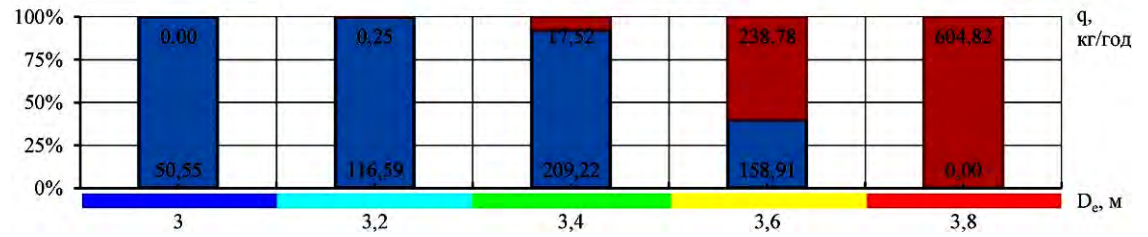
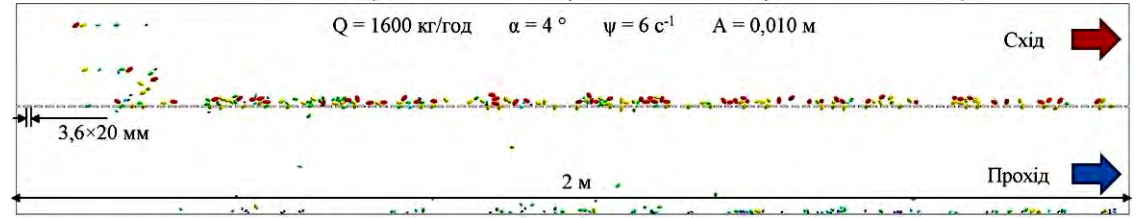
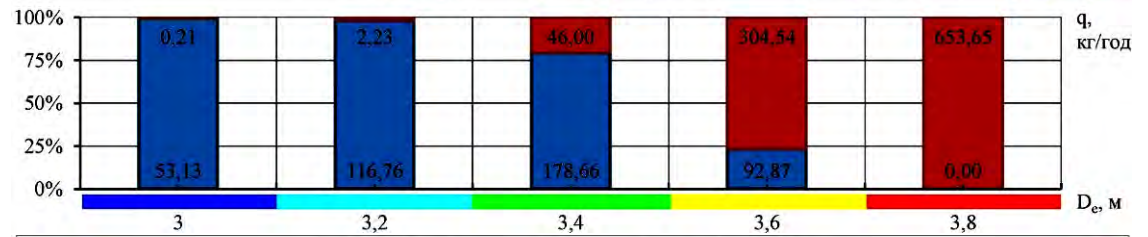
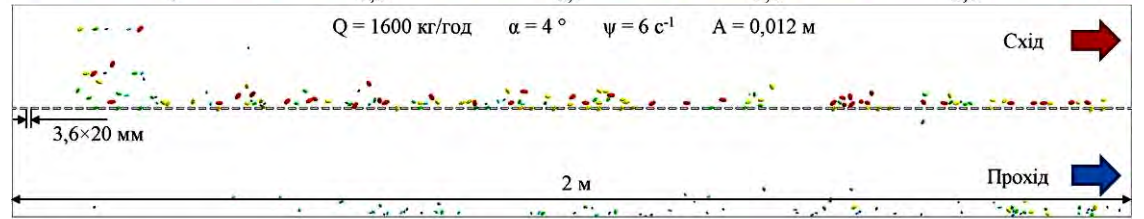
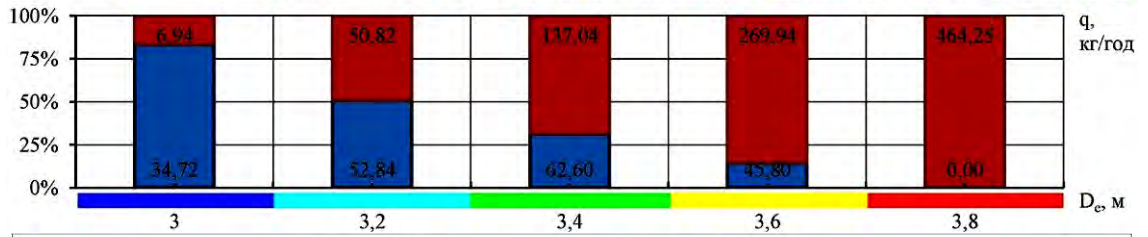
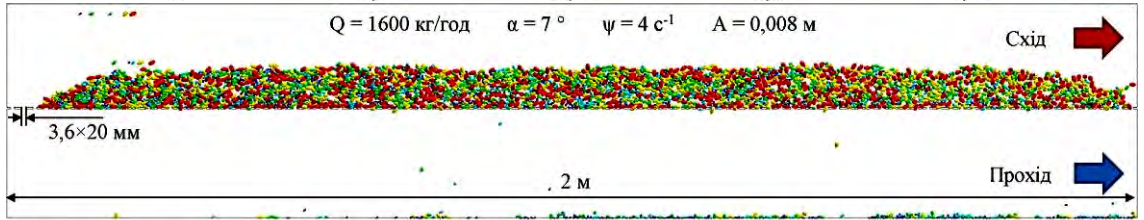
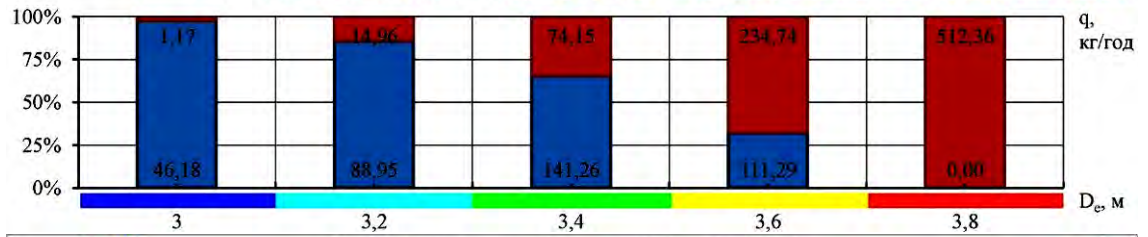
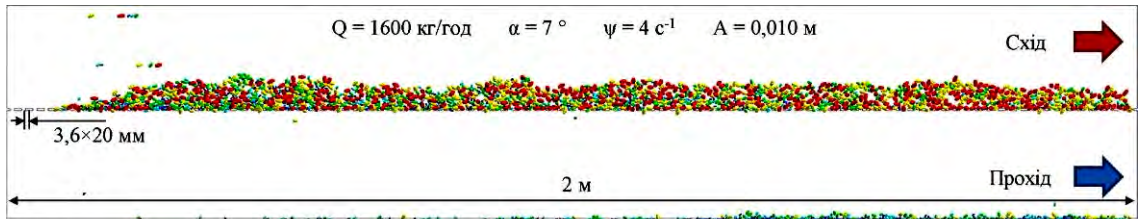


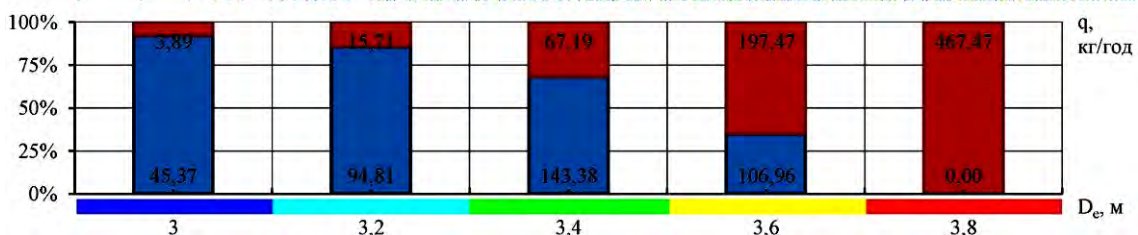
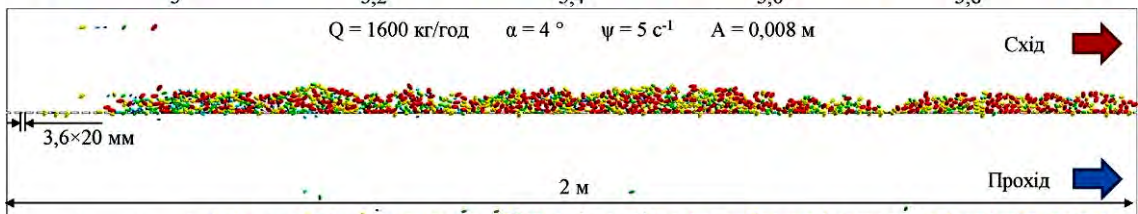
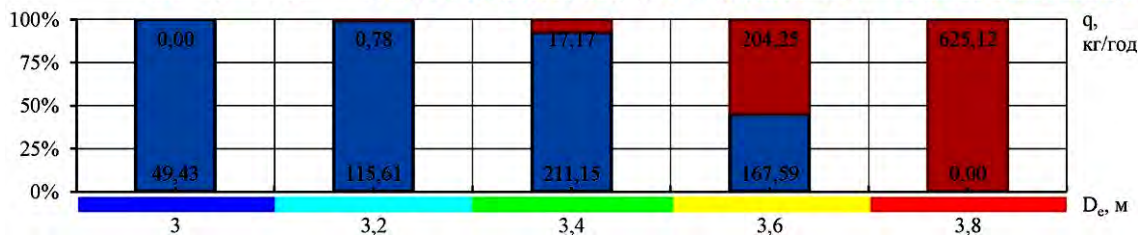
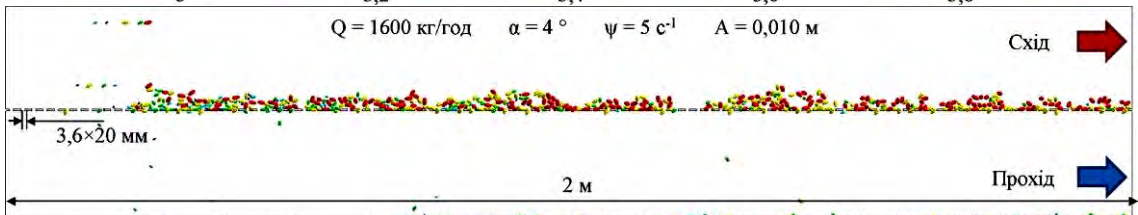
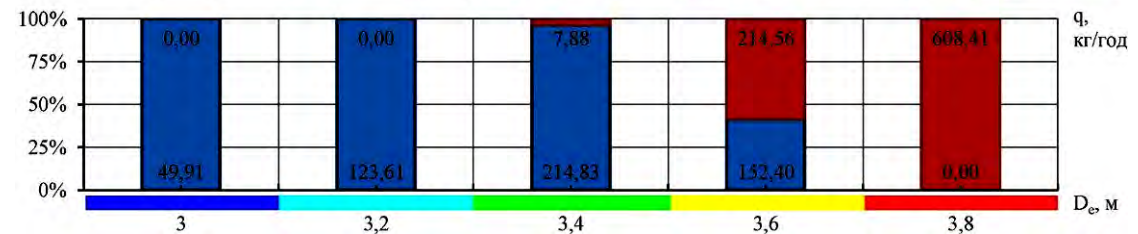
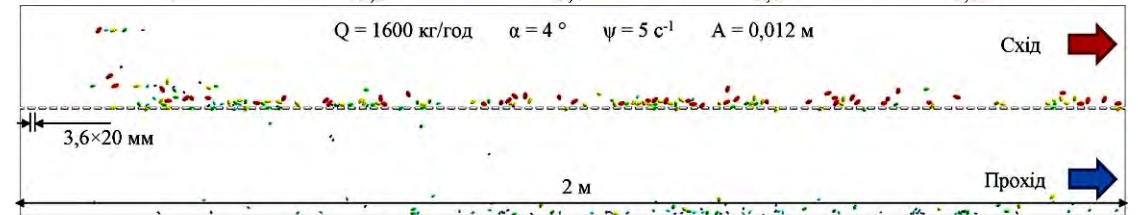
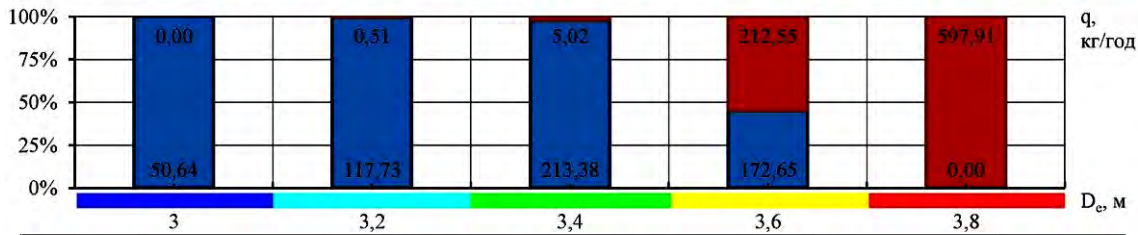
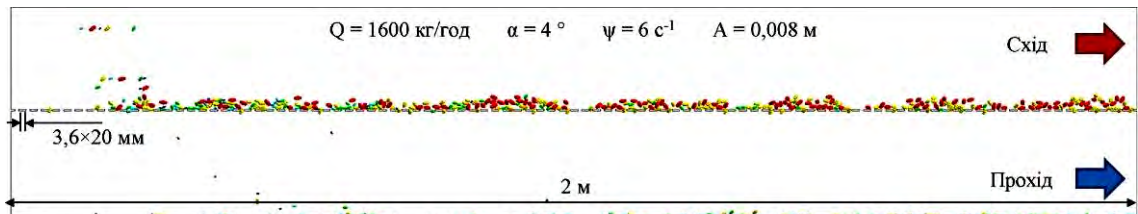


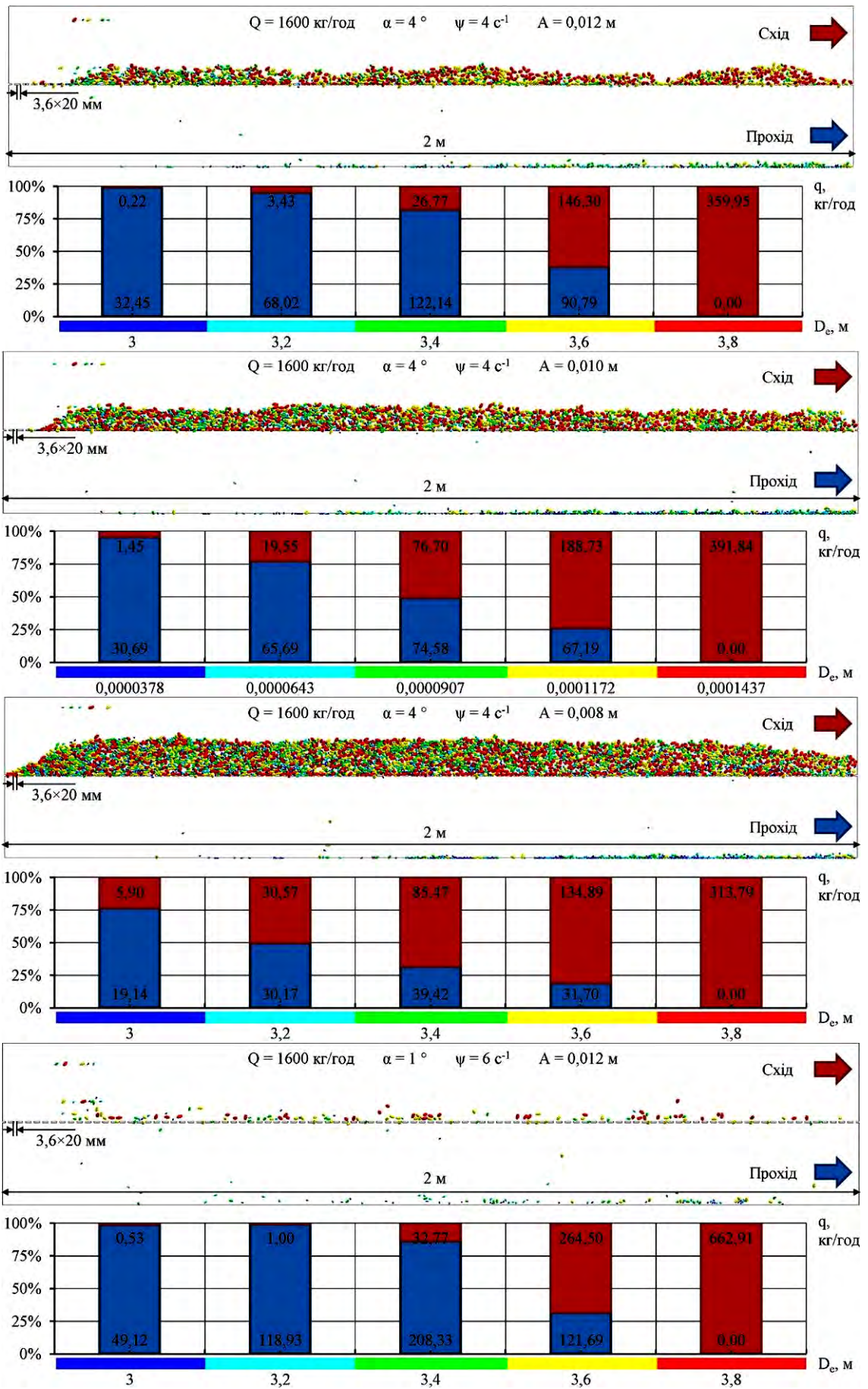


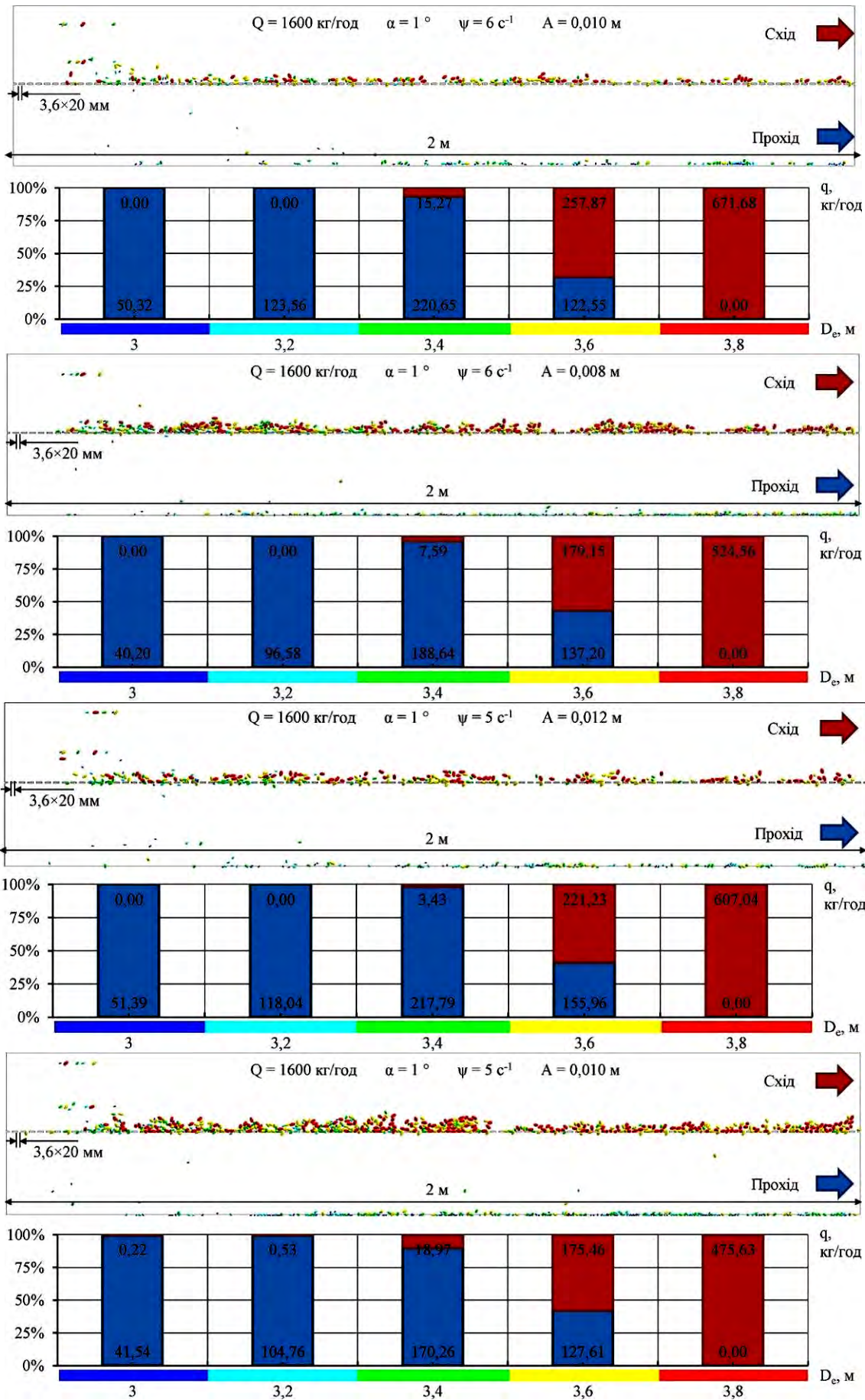


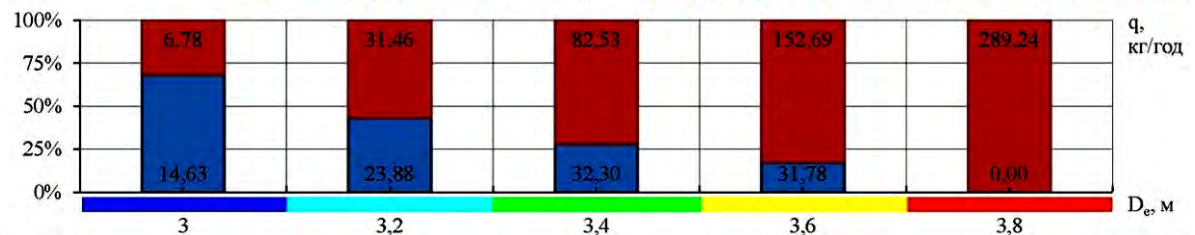
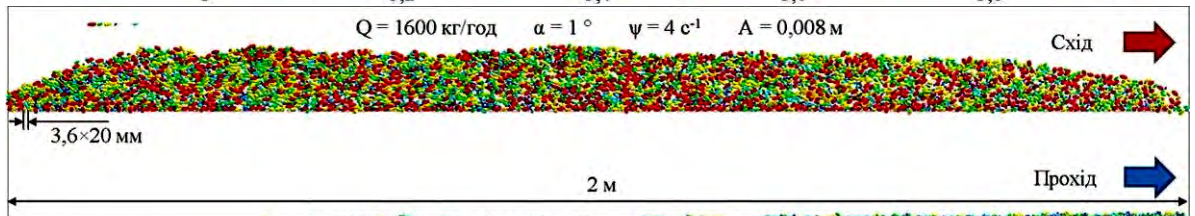
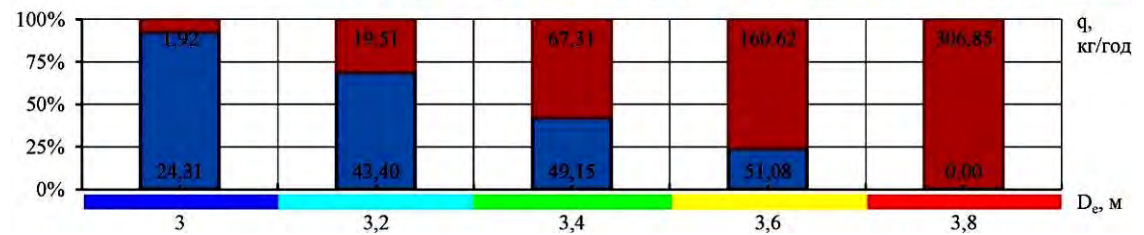
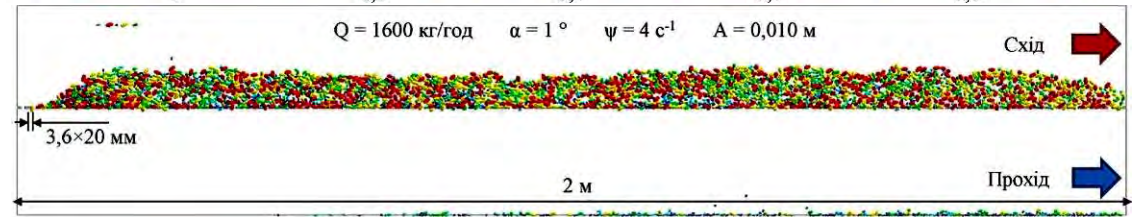
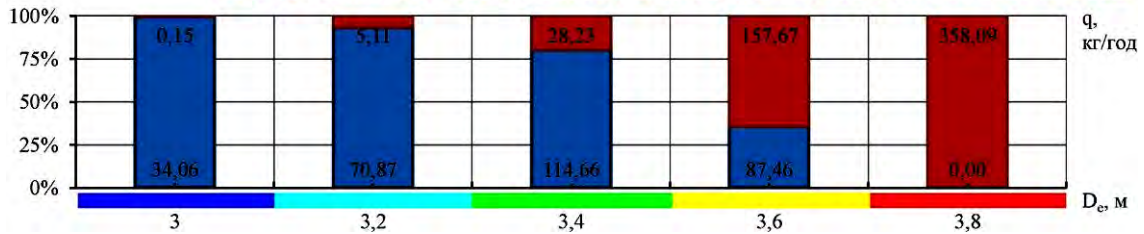
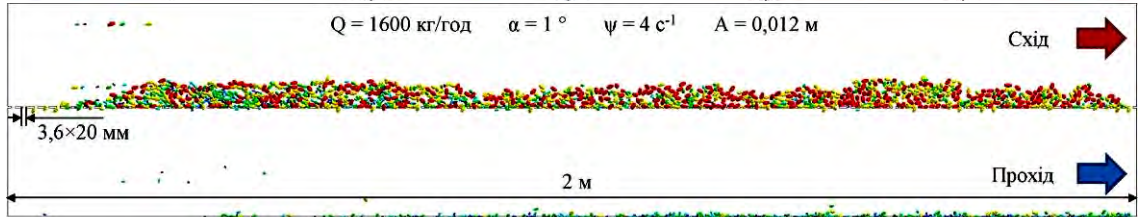
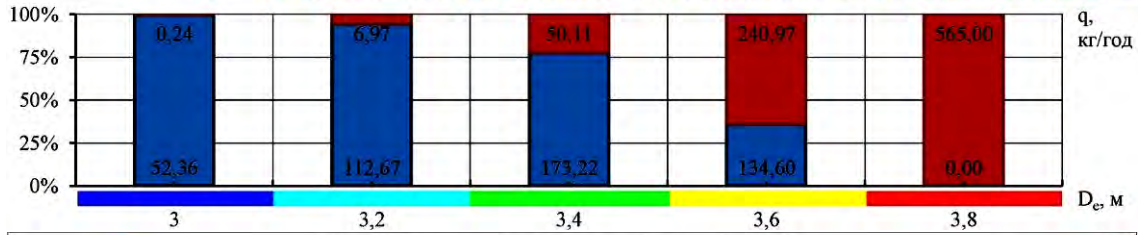
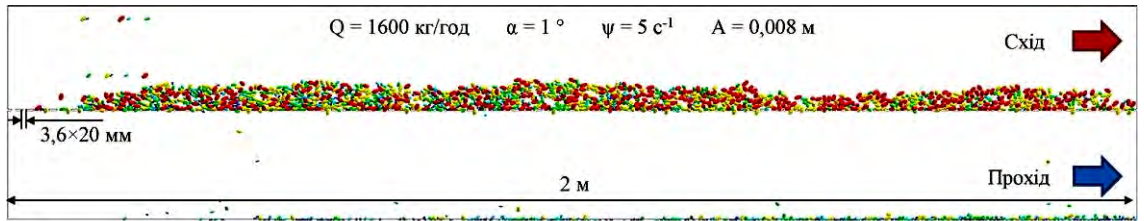












Додаток Ж

Чисельне моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу під дією віброуючої поверхні

Таблиця Ж.1 – Матриця планування експерименту за планом Бокса-Бенкіна для 6 факторів

№	Подача насіння (x ₁)	Кут нахилу (x ₂)	Кут нахилу (x ₃)	Частота коливань (x ₄)	Амплітуда коливань (x ₅)	Швидкість повітря (x ₆)
1	0	1	1	0	-1	0
2	1	0	-1	0	0	-1
3	1	0	0	-1	1	0
4	-1	0	0	1	-1	0
5	-1	0	0	-1	1	0
6	-1	0	1	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0
8	0	-1	0	0	1	1
9	1	0	0	1	-1	0
10	1	-1	0	-1	0	0
11	0	0	1	-1	0	-1
12	0	1	0	0	1	1
13	0	1	-1	0	1	0
14	-1	0	0	-1	-1	0
15	-1	-1	0	1	0	0
16	-1	0	-1	0	0	-1
17	1	0	-1	0	0	1
18	0	1	1	0	1	0
19	0	0	-1	1	0	-1
20	0	0	0	0	0	0
21	0	-1	1	0	1	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	-1	1	0	1
24	1	-1	0	1	0	0
25	0	0	1	1	0	-1
26	1	1	0	-1	0	0
27	-1	-1	0	-1	0	0
28	-1	0	1	0	0	-1
29	0	0	1	-1	0	1
30	0	-1	-1	0	1	0
31	1	0	0	1	1	0
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	1	1	0	1
34	0	-1	1	0	-1	0
35	0	1	0	0	-1	1
36	1	0	1	0	0	-1
37	1	1	0	1	0	0
38	-1	0	-1	0	0	1

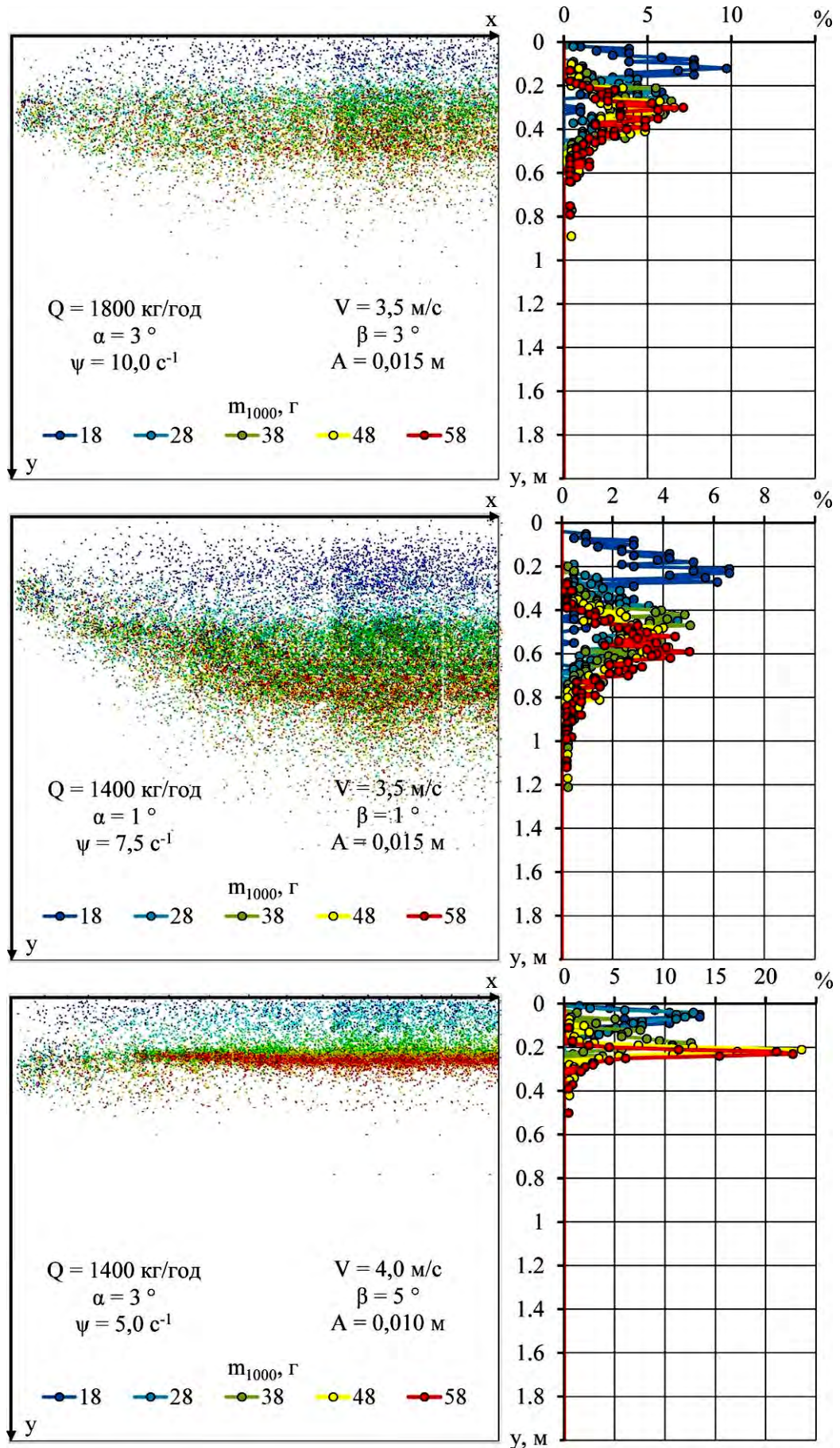
№	Подача насіння (x ₁)	Кут нахилу (x ₂)	Кут нахилу (x ₃)	Частота коливань (x ₄)	Амплітуда коливань (x ₅)	Швидкість повітря (x ₆)
39	0	1	0	0	1	-1
40	0	0	0	0	0	0
41	1	0	1	0	0	1
42	0	-1	0	0	1	-1
43	0	-1	0	0	-1	-1
44	0	1	0	0	-1	-1
45	0	0	-1	-1	0	-1
46	-1	1	0	-1	0	0
47	0	1	-1	0	-1	0
48	0	-1	0	0	-1	1
49	0	-1	-1	0	-1	0
50	-1	0	0	1	1	0
51	1	0	0	-1	-1	0
52	0	0	0	0	0	0
53	0	0	-1	-1	0	1
54	-1	1	0	1	0	0

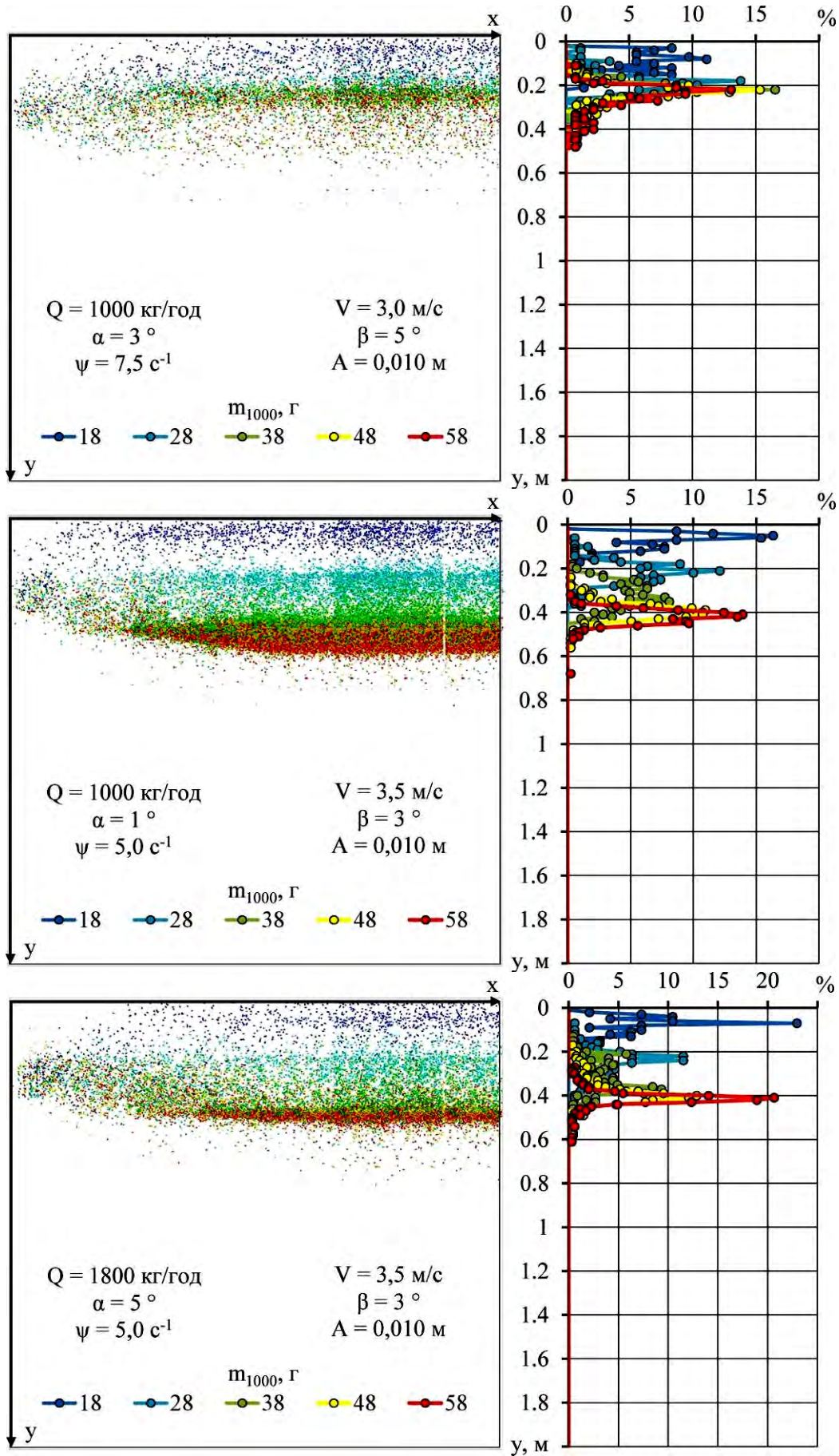
Таблиця Ж.2 – Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією віброуючої поверхні

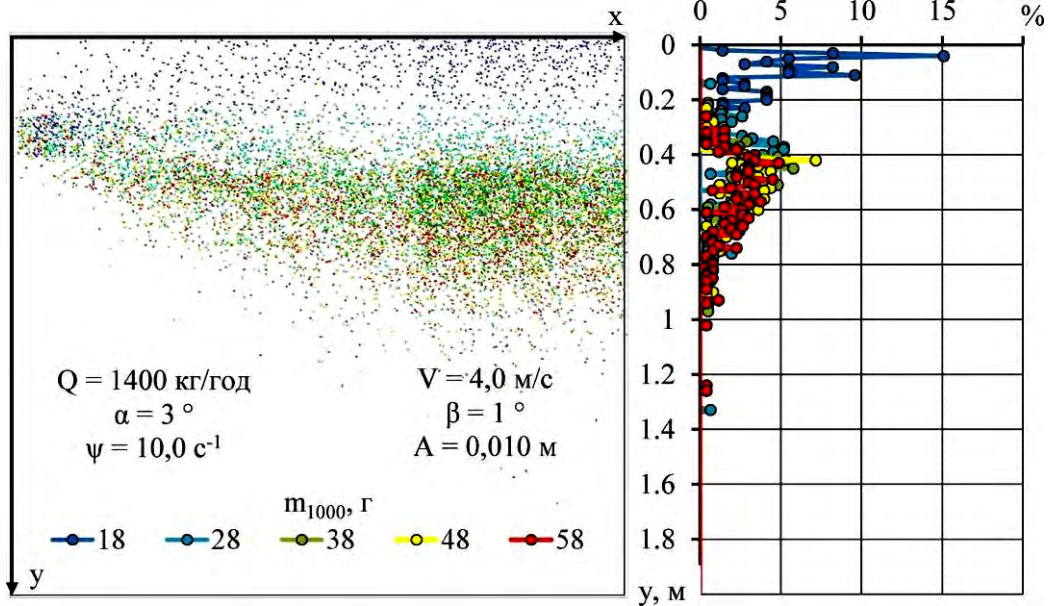
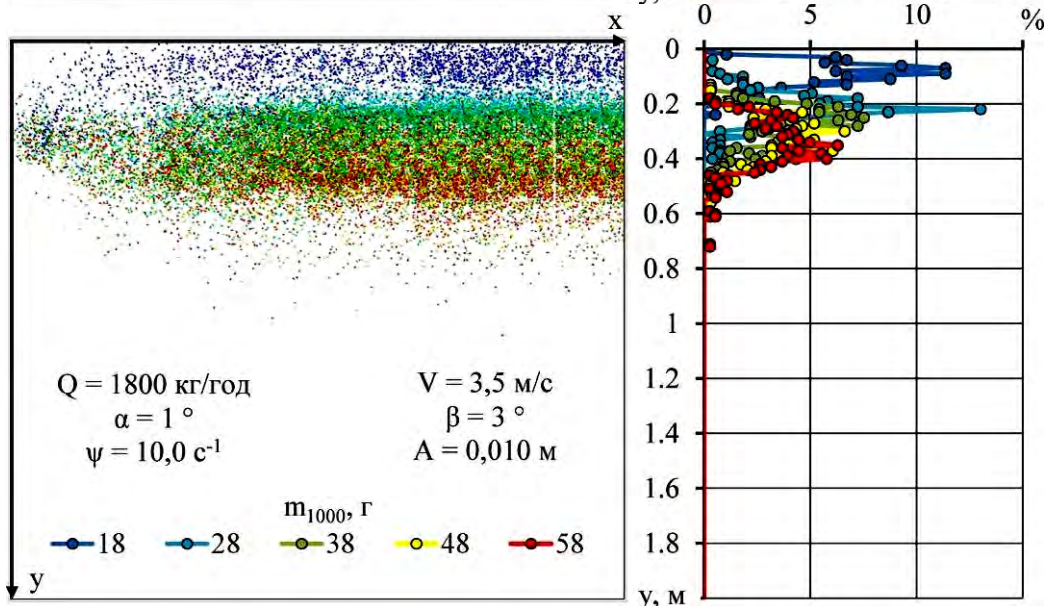
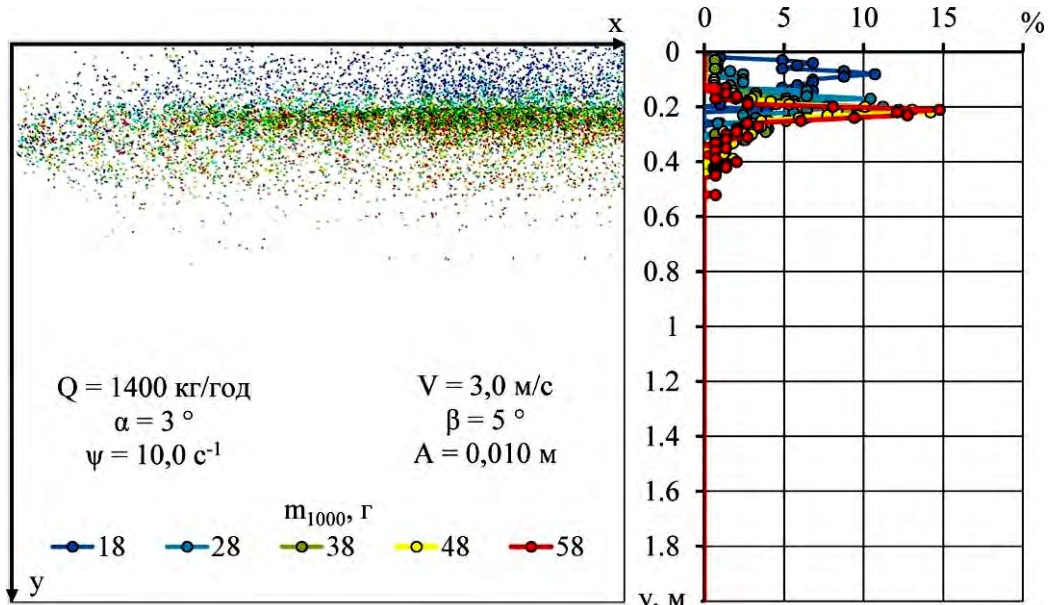
№	Подача насіння Q, кг/год	Кут нахилу α, °	Кут нахилу β, °	Частота коливань ψ, с ⁻¹	Амплітуда коливань А, м	Швидкість повітря V, м/с	Коефіцієнт заповнення χ, %	Коефіцієнт розподілу δ, %	Продуктивність φ, кг/год
1	1400	5	5	7,5	0,005	3,5	35,59	62,76	48,47
2	1800	3	1	7,5	0,01	3	15,36	44,72	59,29
3	1800	3	3	5	0,015	3,5	57,32	86,88	57,53
4	1000	3	3	10	0,005	3,5	33,73	62,25	36,13
5	1000	3	3	5	0,015	3,5	44,01	77,65	35,70
6	1000	3	5	7,5	0,01	4	28,77	54,43	36,41
7	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	38,74	70,12	48,55
8	1400	1	3	7,5	0,015	4	36,16	63,01	29,43
9	1800	3	3	10	0,005	3,5	36,45	70,08	1212
10	1800	1	3	5	0,01	3,5	91,79	91,63	1482
11	1400	3	5	5	0,01	3	59,21	78,85	1438
12	1400	5	3	7,5	0,015	4	28,64	63,02	903
13	1400	5	1	7,5	0,015	3,5	25,65	56,24	893
14	1000	3	3	5	0,005	3,5	91,80	79,07	910
15	1000	1	3	10	0,01	3,5	33,48	68,51	1214
16	1000	3	1	7,5	0,01	3	14,82	47,96	736
17	1800	3	1	7,5	0,01	4	41,81	70,39	1508

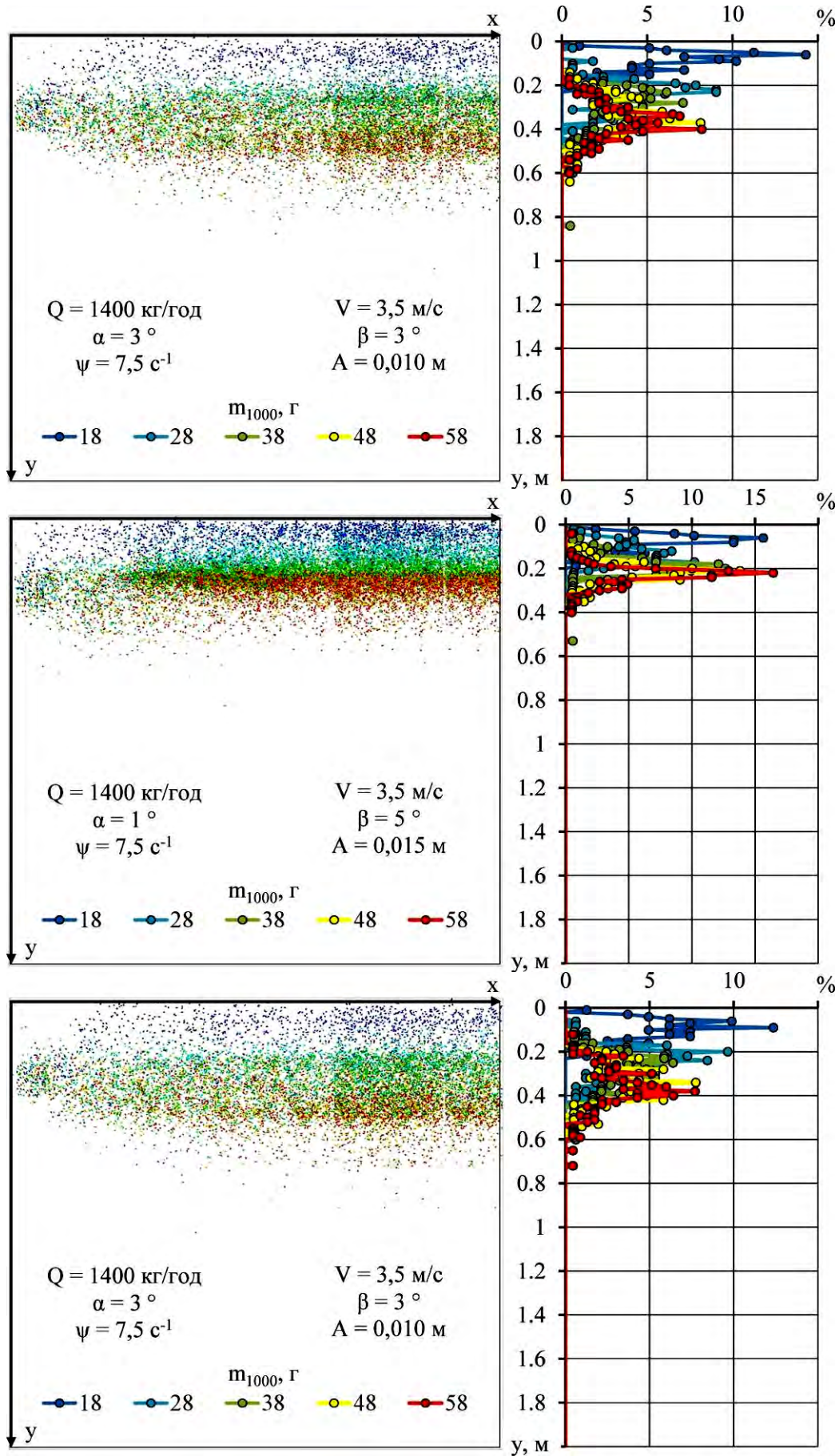
№	Подача насіння Q, кг/год	Кут нахилу α , °	Кут нахилу β , °	Частота коливань ψ , с ⁻¹	Амплітуда коливань A, м	Швидкість повітря V, м/с	Коефіцієнт заповнення χ , %	Коефіцієнт розподілу δ , %	Продуктивність q, кг/год
18	1400	5	5	7,5	0,015	3,5	27,43	59,99	831
19	1400	3	1	10	0,01	3	12,99	39,54	982
20	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	34,86	66,48	1212
21	1400	1	5	7,5	0,015	3,5	35,20	55,51	790
22	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	38,39	65,80	601
23	1400	3	1	10	0,01	4	36,84	64,75	574
24	1800	1	3	10	0,01	3,5	39,57	68,43	892
25	1400	3	5	10	0,01	3	26,06	57,28	1494
26	1800	5	3	5	0,01	3,5	60,67	85,35	1214
27	1000	1	3	5	0,01	3,5	83,31	89,46	1218
28	1000	3	5	7,5	0,01	3	30,04	58,79	1205
29	1400	3	5	5	0,01	4	47,65	71,77	889
30	1400	1	1	7,5	0,015	3,5	30,85	58,41	1209
31	1800	3	3	10	0,015	3,5	26,61	59,50	1209
32	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	40,29	68,33	894
33	1400	3	5	10	0,01	4	25,98	49,40	1214
34	1400	1	5	7,5	0,005	3,5	46,73	66,33	1502
35	1400	5	3	7,5	0,005	4	36,57	66,25	560
36	1800	3	5	7,5	0,01	3	36,76	68,03	899
37	1800	5	3	10	0,01	3,5	28,36	63,37	1158
38	1000	3	1	7,5	0,01	4	43,28	71,51	781
39	1400	5	3	7,5	0,015	3	18,40	44,24	1492
40	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	36,79	71,18	1217
41	1800	3	5	7,5	0,01	4	33,53	58,33	1219
42	1400	1	3	7,5	0,015	3	29,99	55,04	675
43	1400	1	3	7,5	0,005	3	36,97	53,94	1219
44	1400	5	3	7,5	0,005	3	26,69	47,13	1499
45	1400	3	1	5	0,01	3	35,42	54,95	1513
46	1000	5	3	5	0,01	3,5	50,76	72,71	896
47	1400	5	1	7,5	0,005	3,5	33,14	50,42	1217
48	1400	1	3	7,5	0,005	4	46,09	70,67	1204
49	1400	1	1	7,5	0,005	3,5	34,76	55,94	1497
50	1000	3	3	10	0,015	3,5	31,30	68,06	642
51	1800	3	3	5	0,005	3,5	85,88	87,74	457
52	1400	3	3	7,5	0,01	3,5	36,56	69,63	1221
53	1400	3	1	5	0,01	4	56,44	77,96	861
54	1000	5	3	10	0,01	3,5	28,64	59,83	913

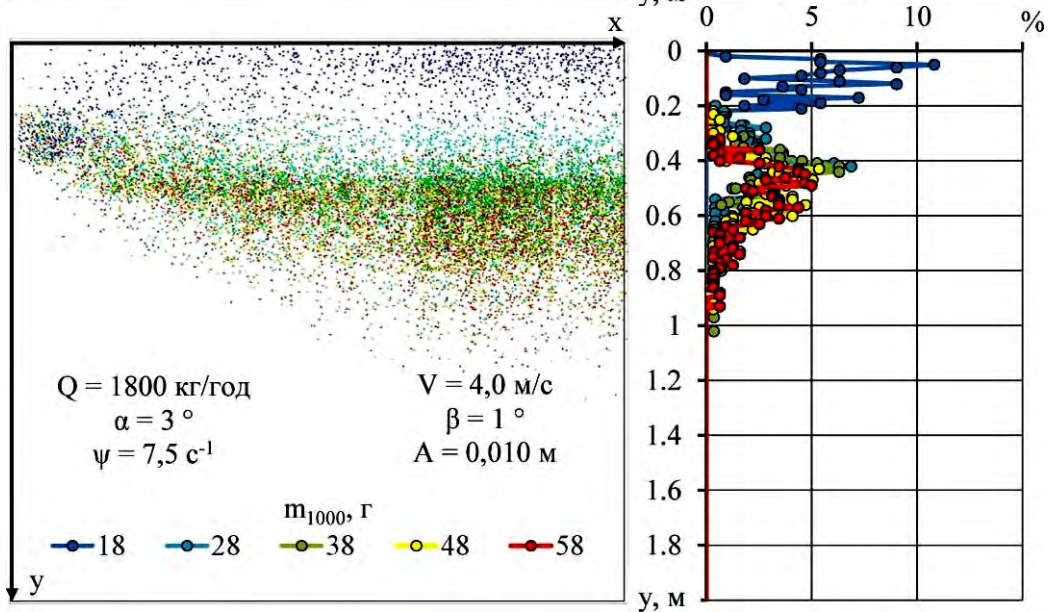
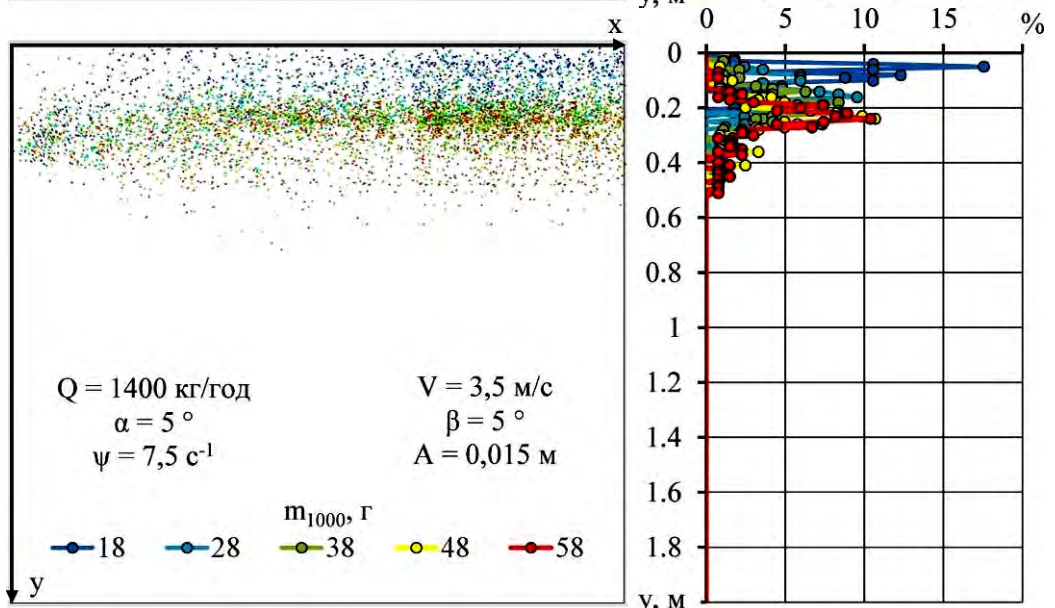
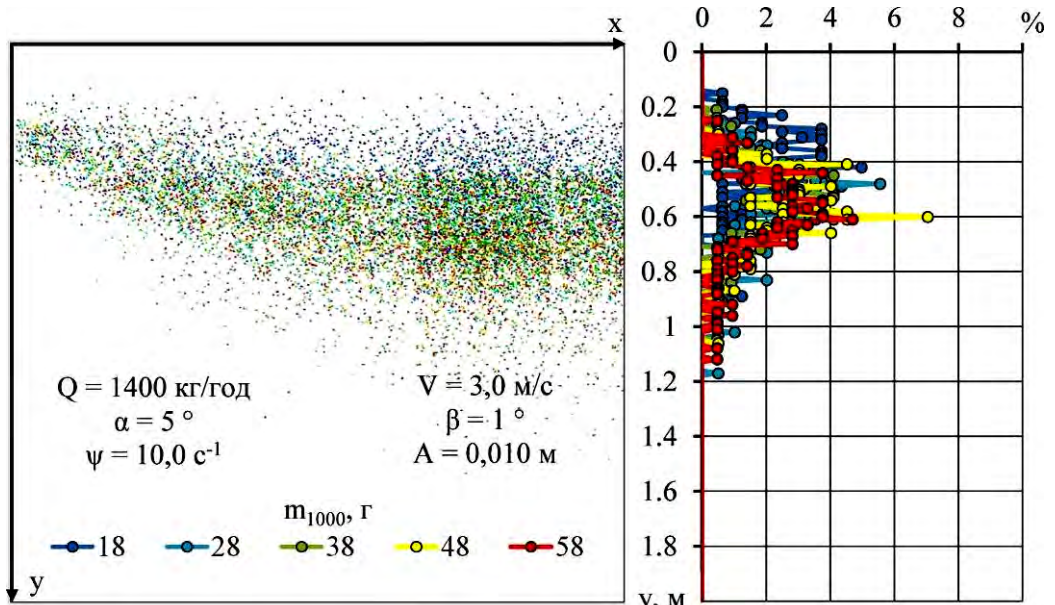
Додаток И

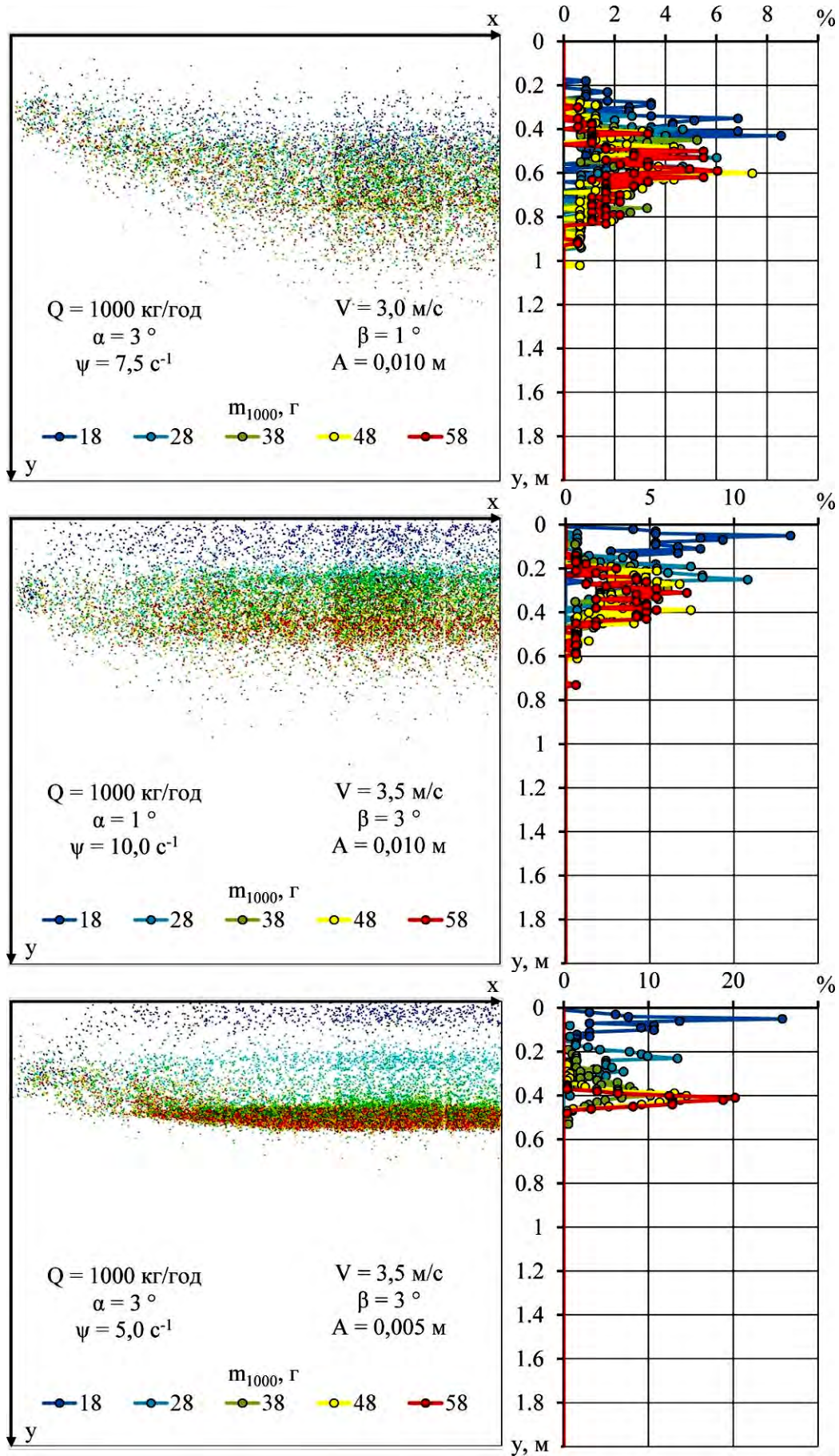
Розподіл фракцій насіння на виході при $x = 2$ м під дією віброуючої поверхні

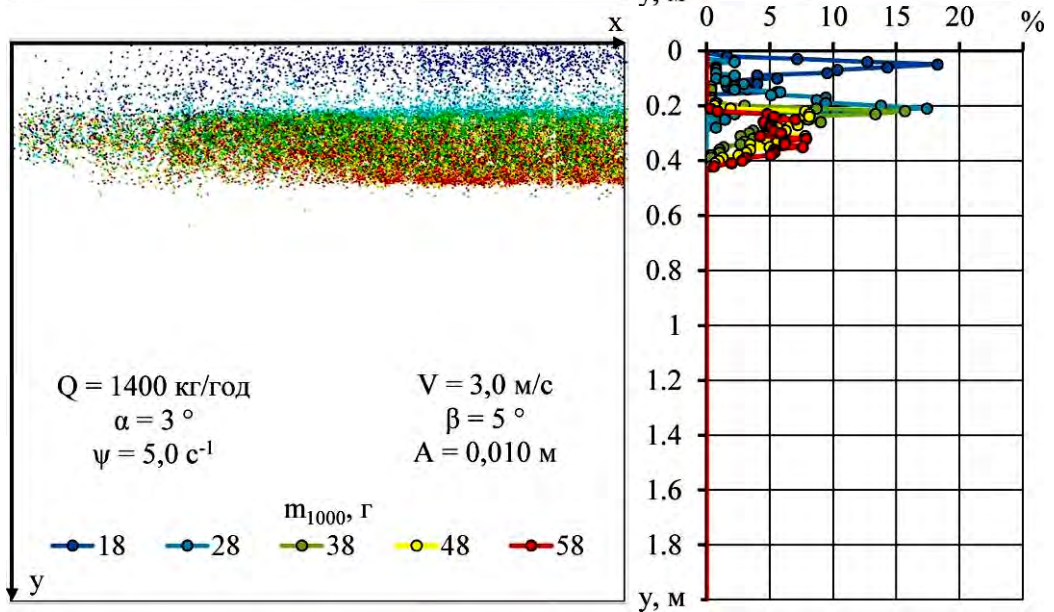
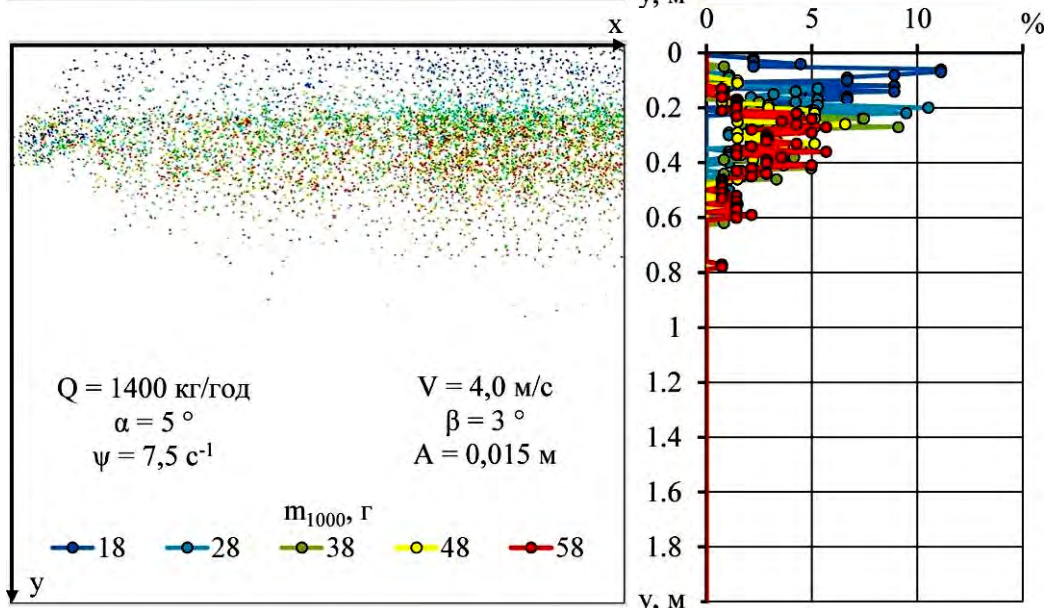
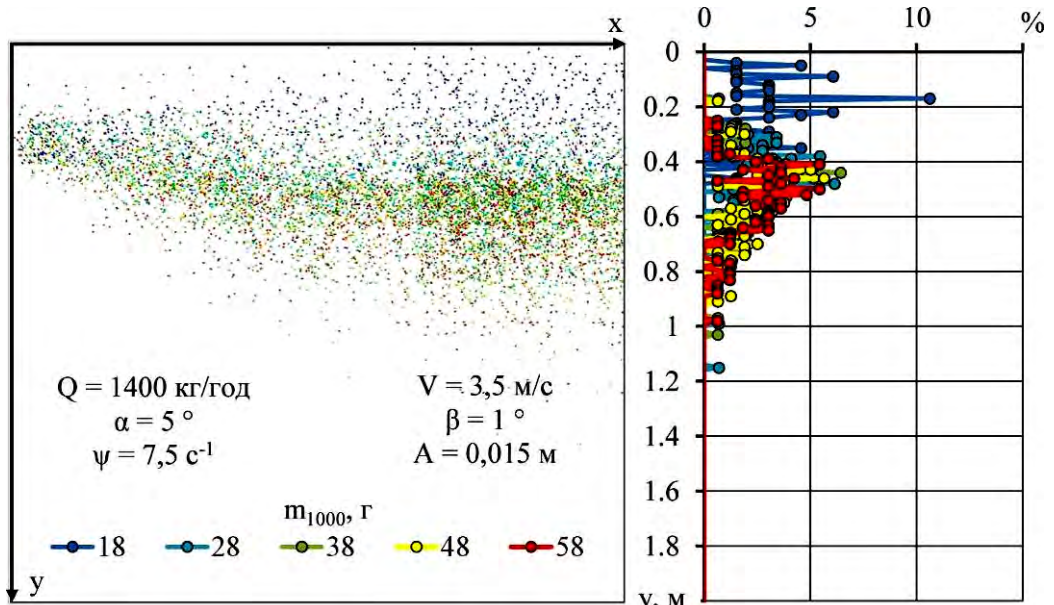


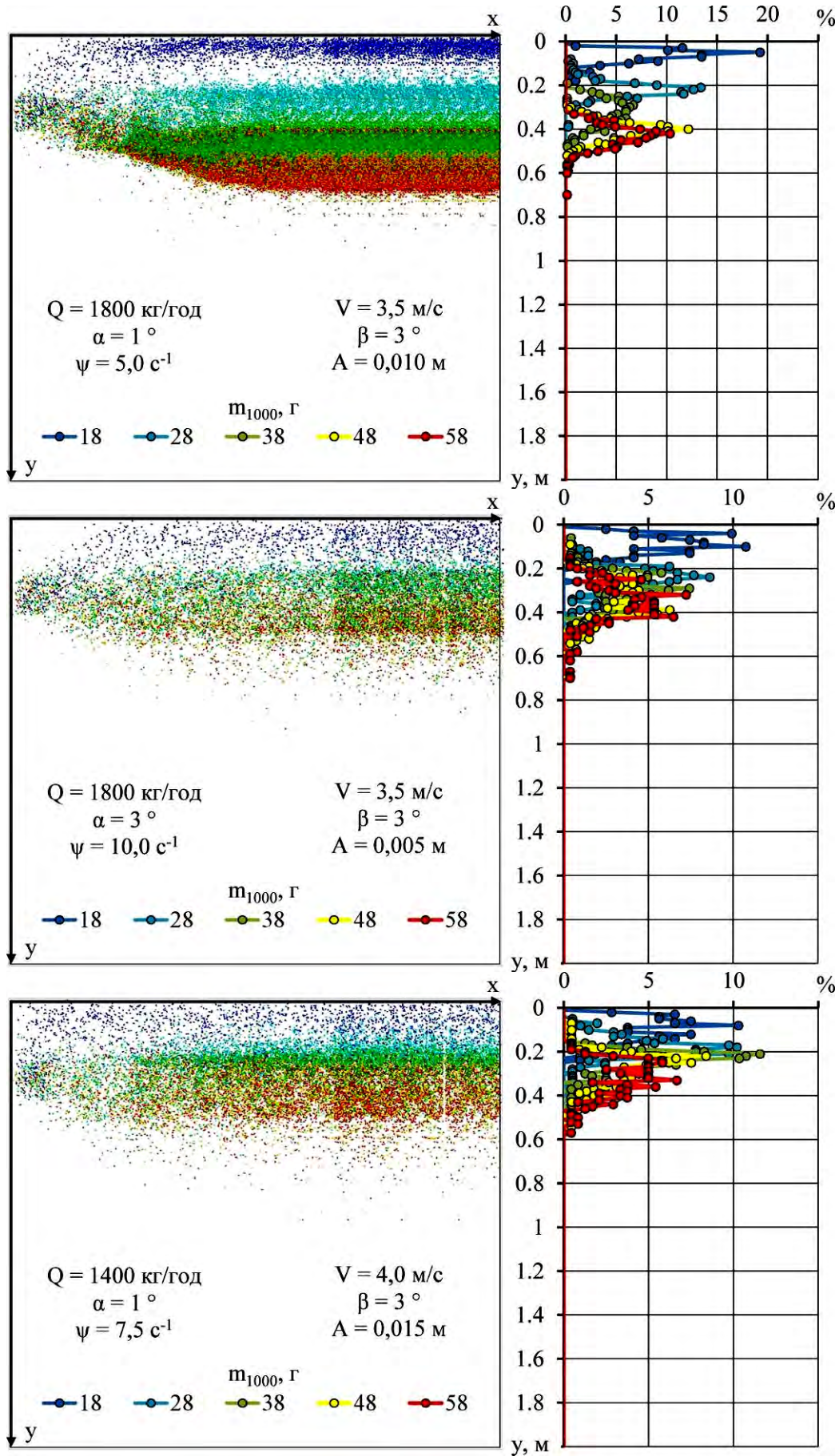


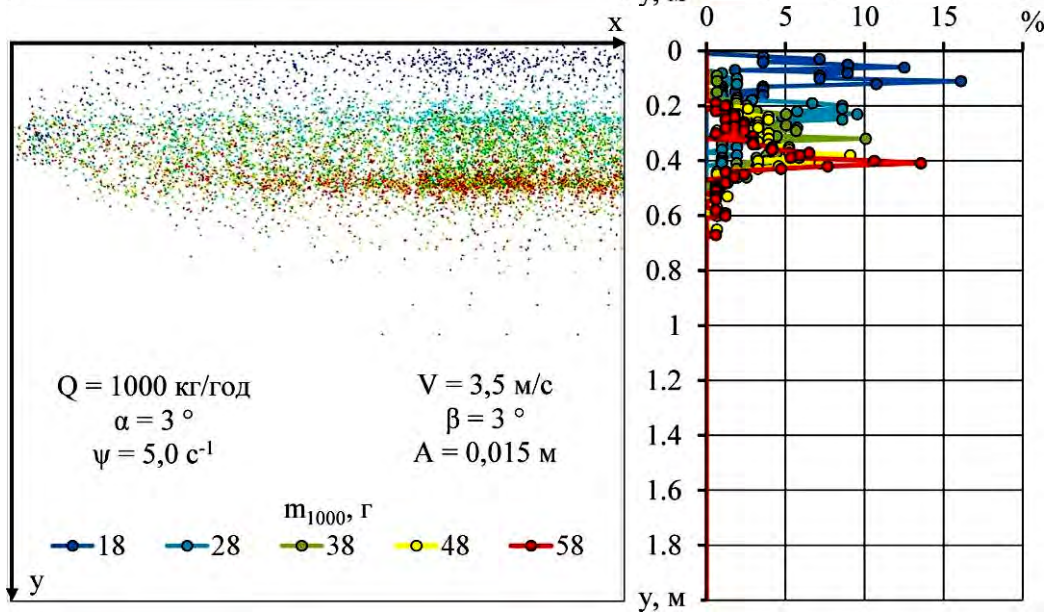
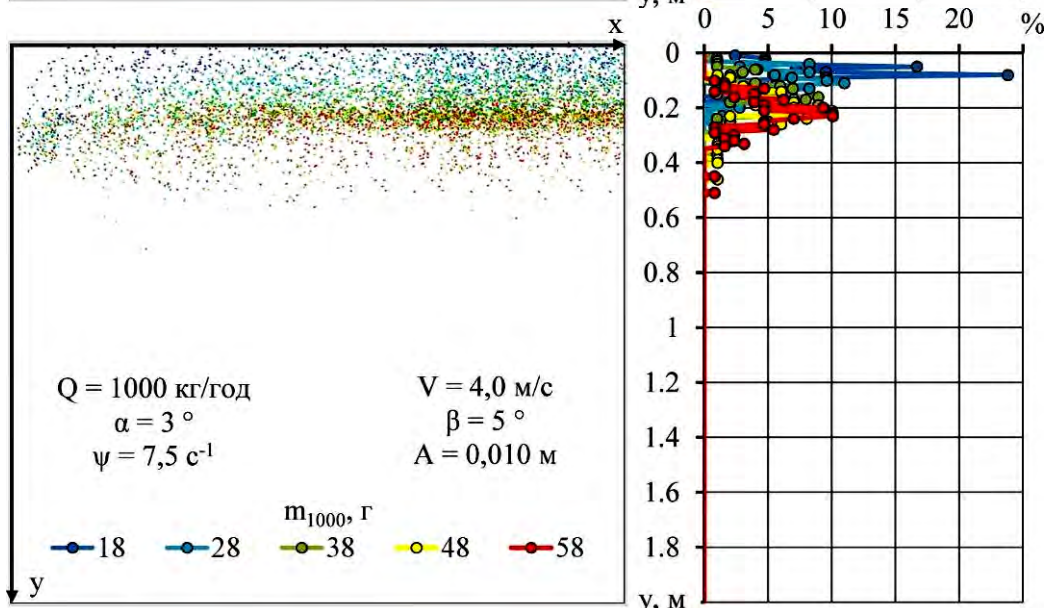
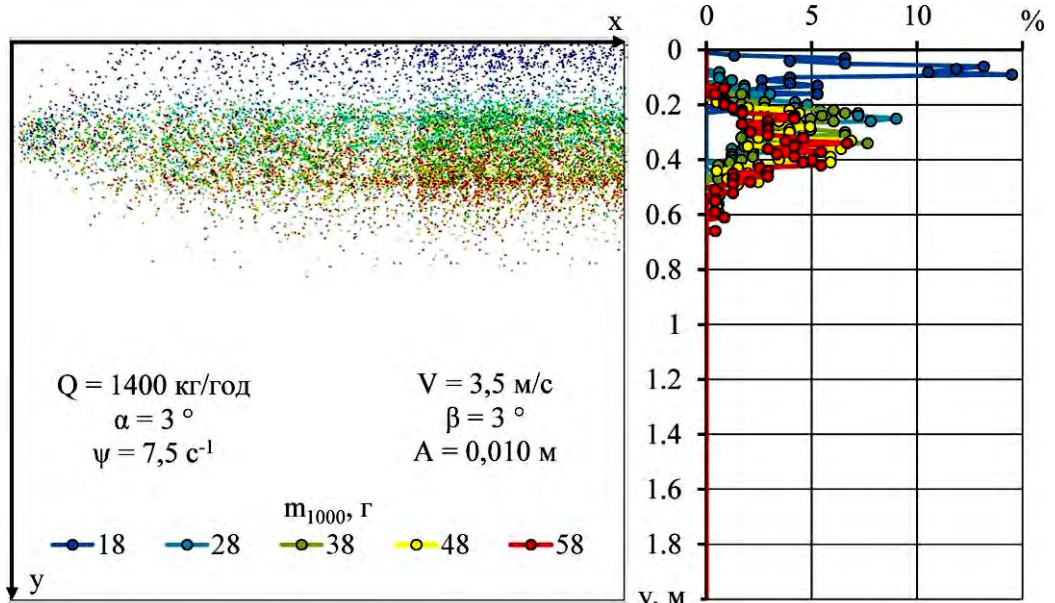


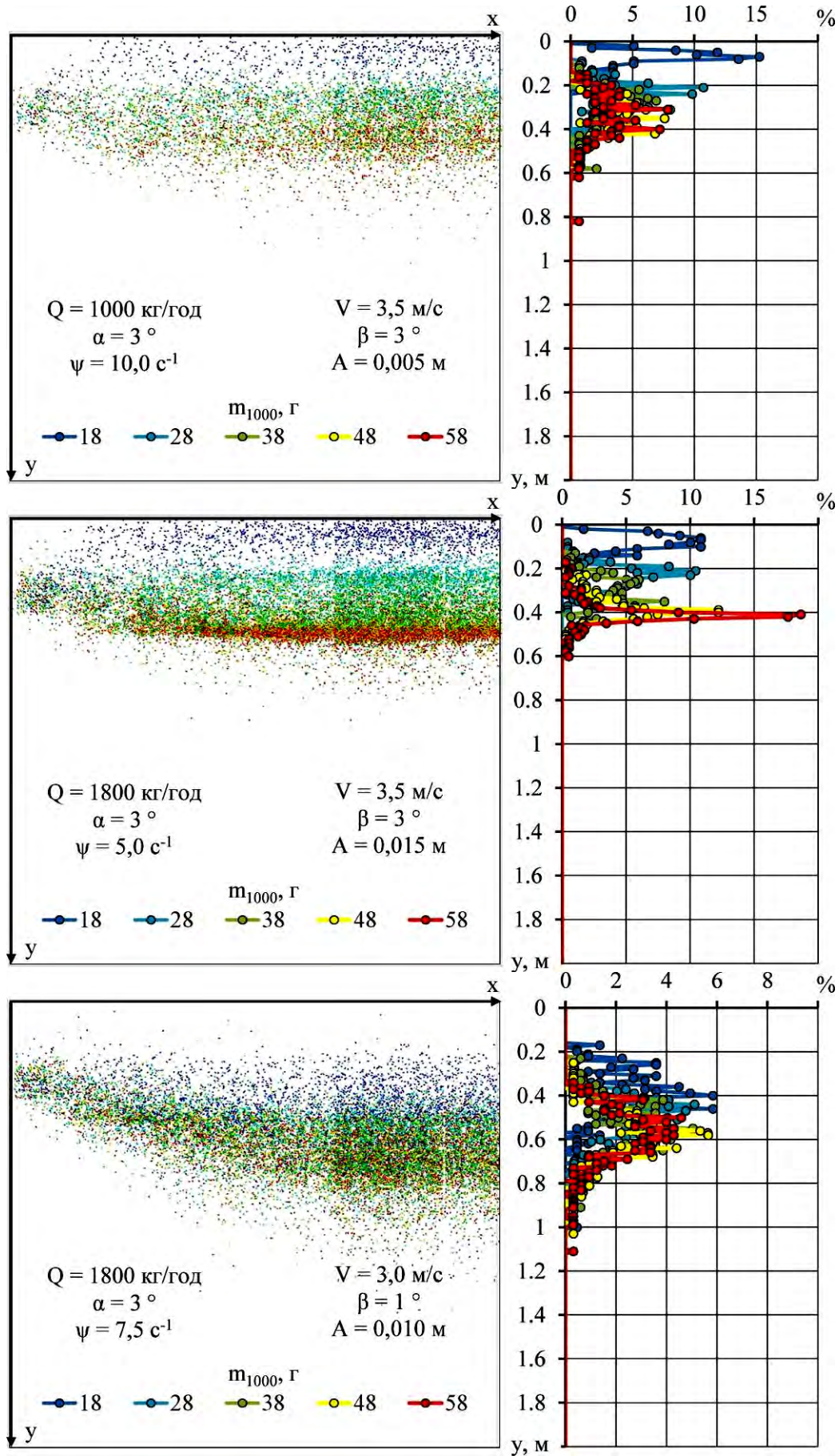


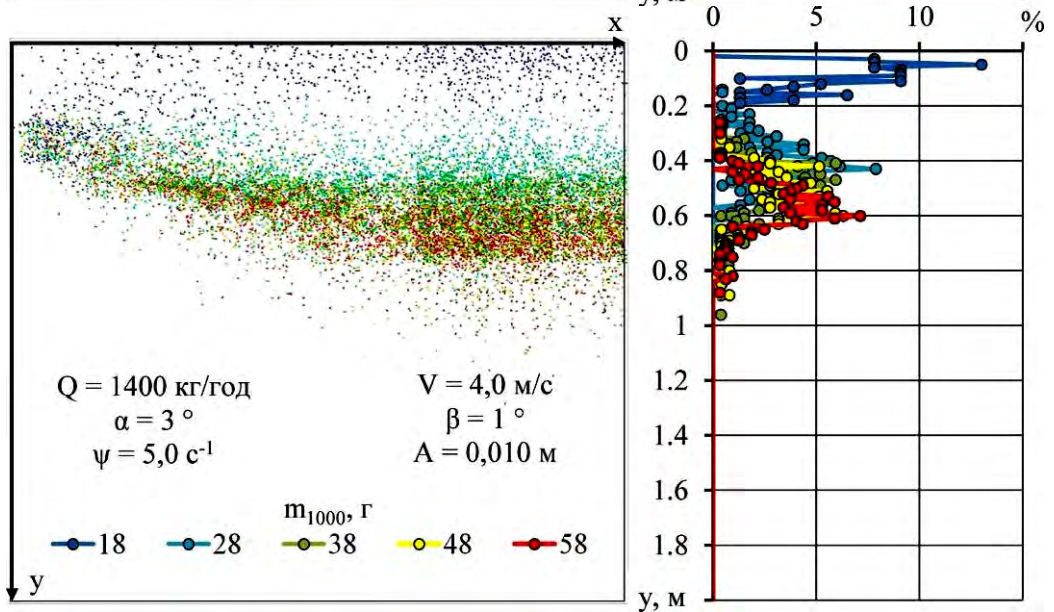
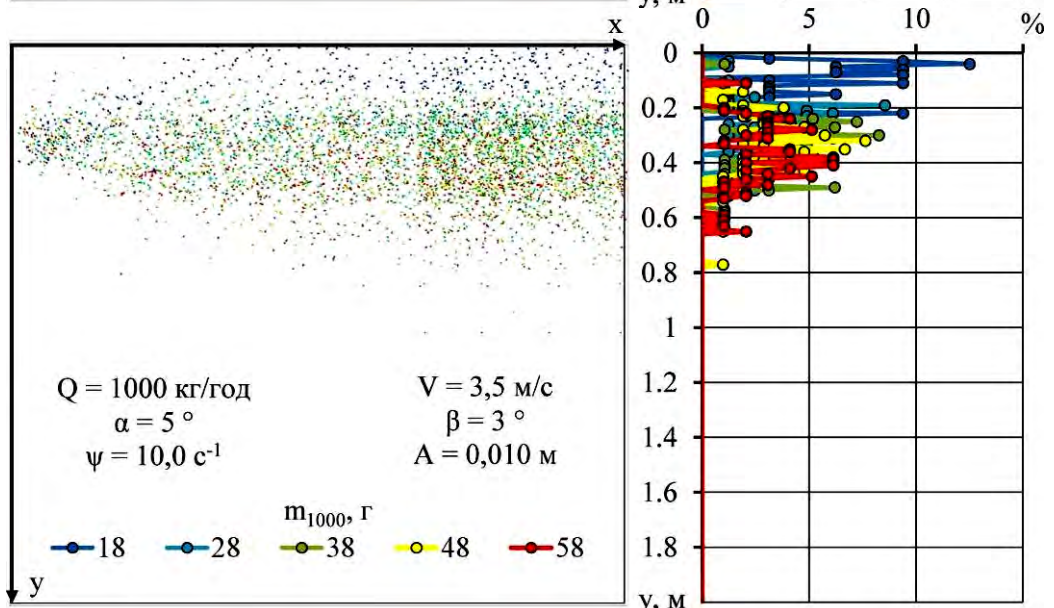
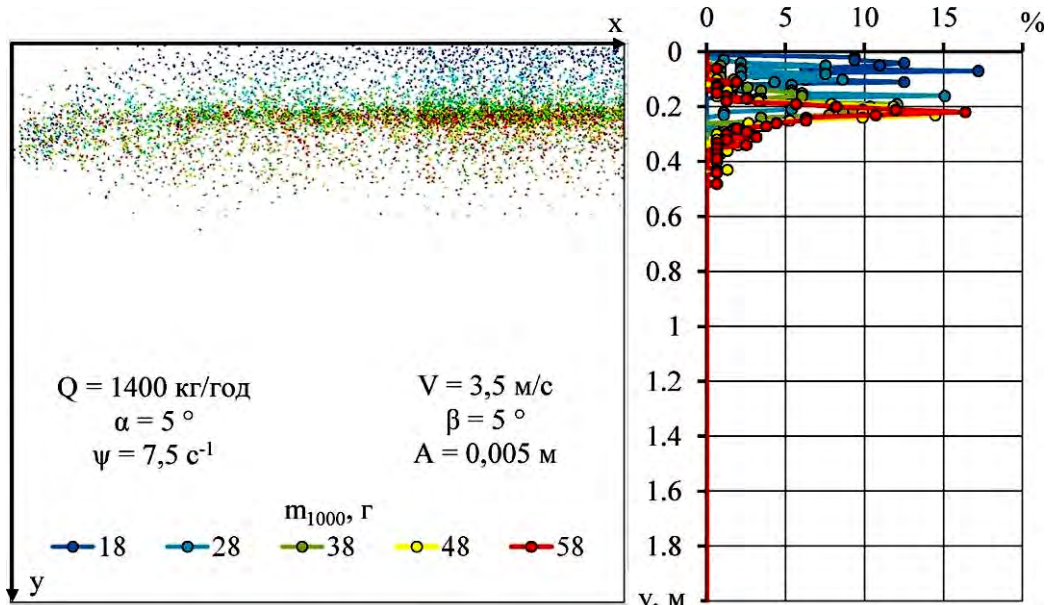


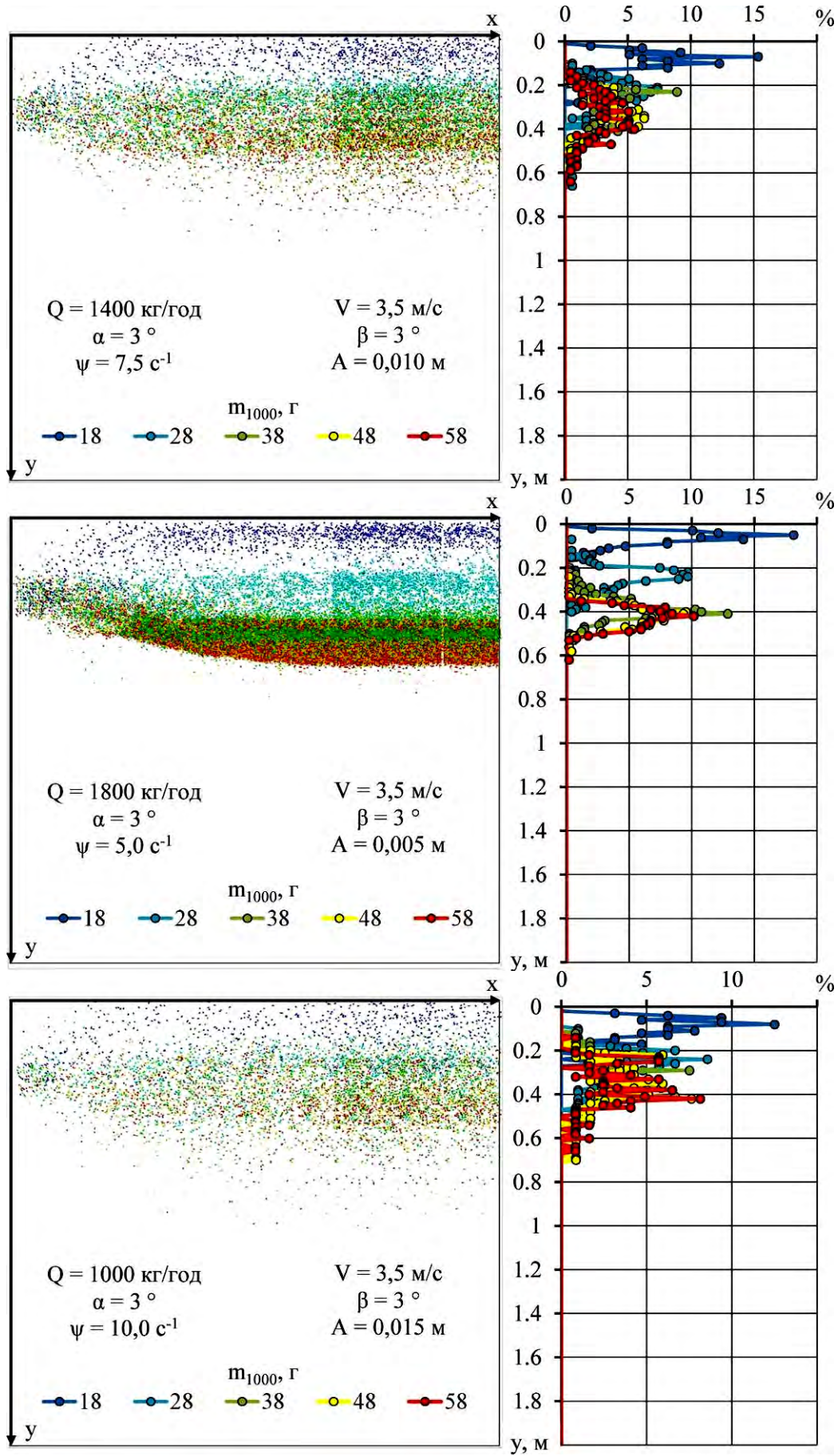


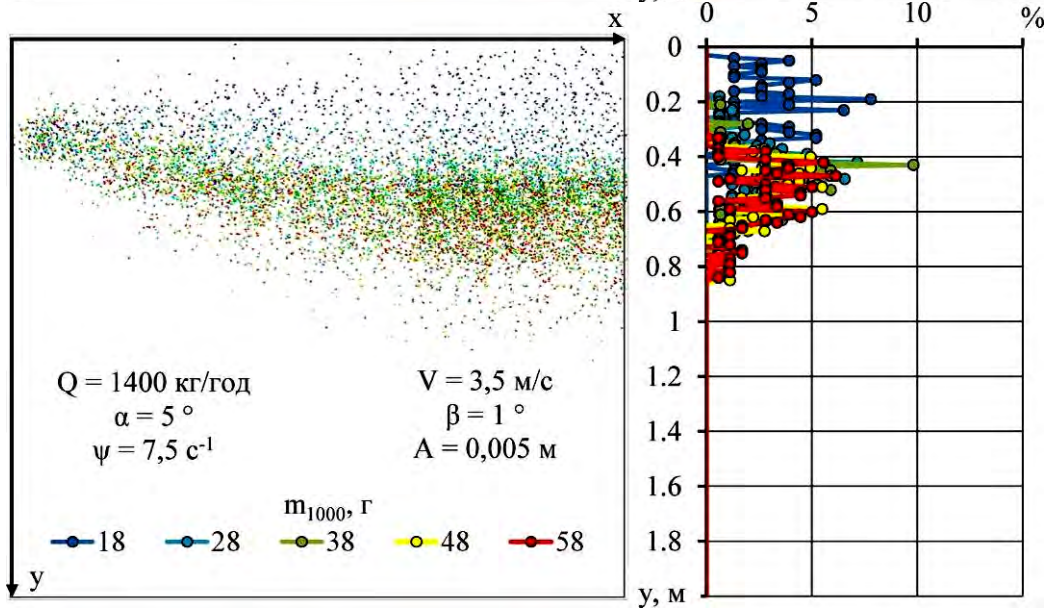
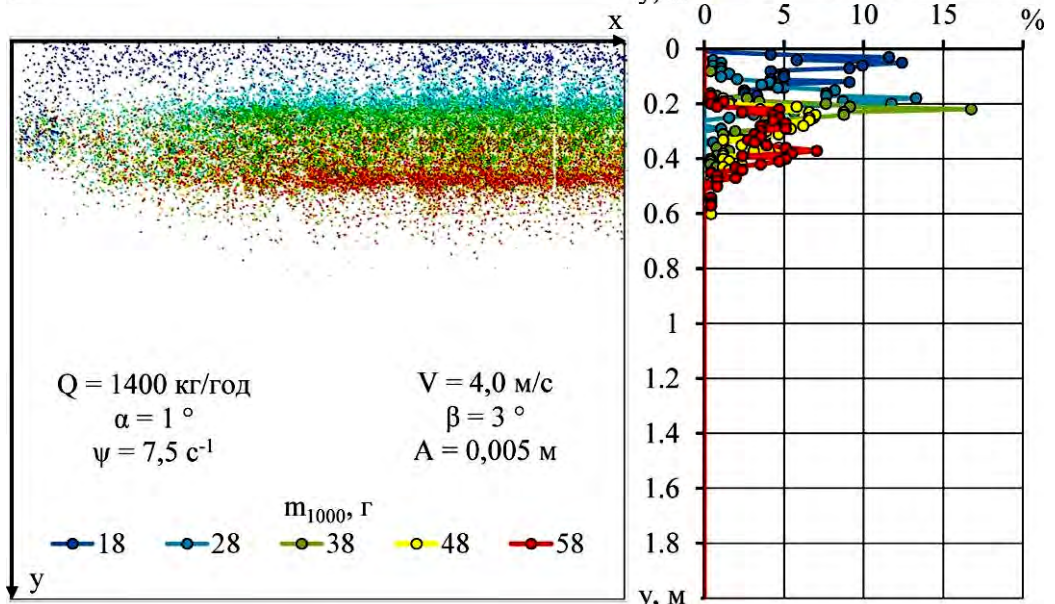
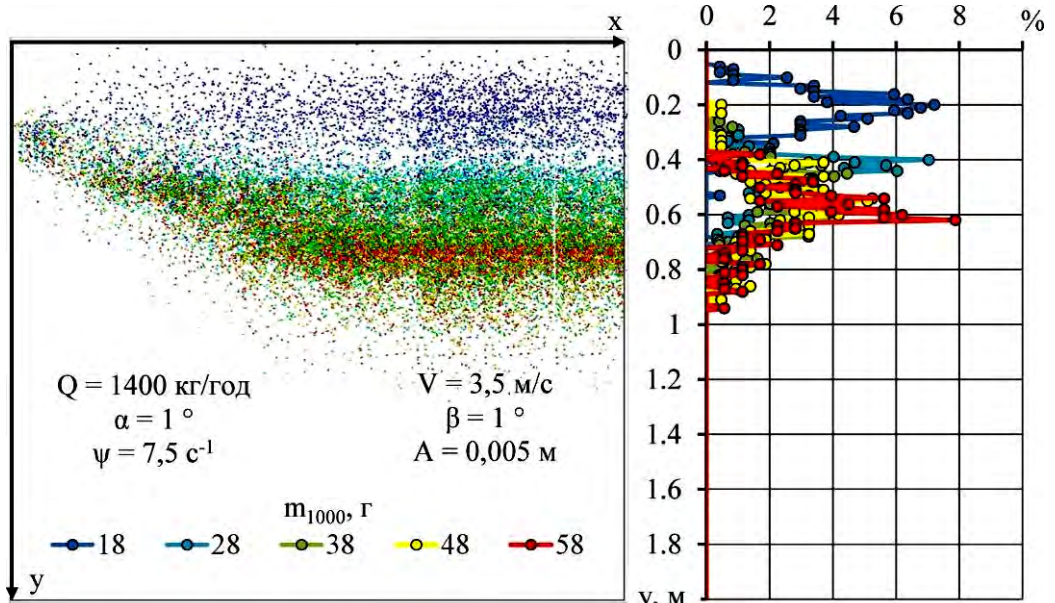


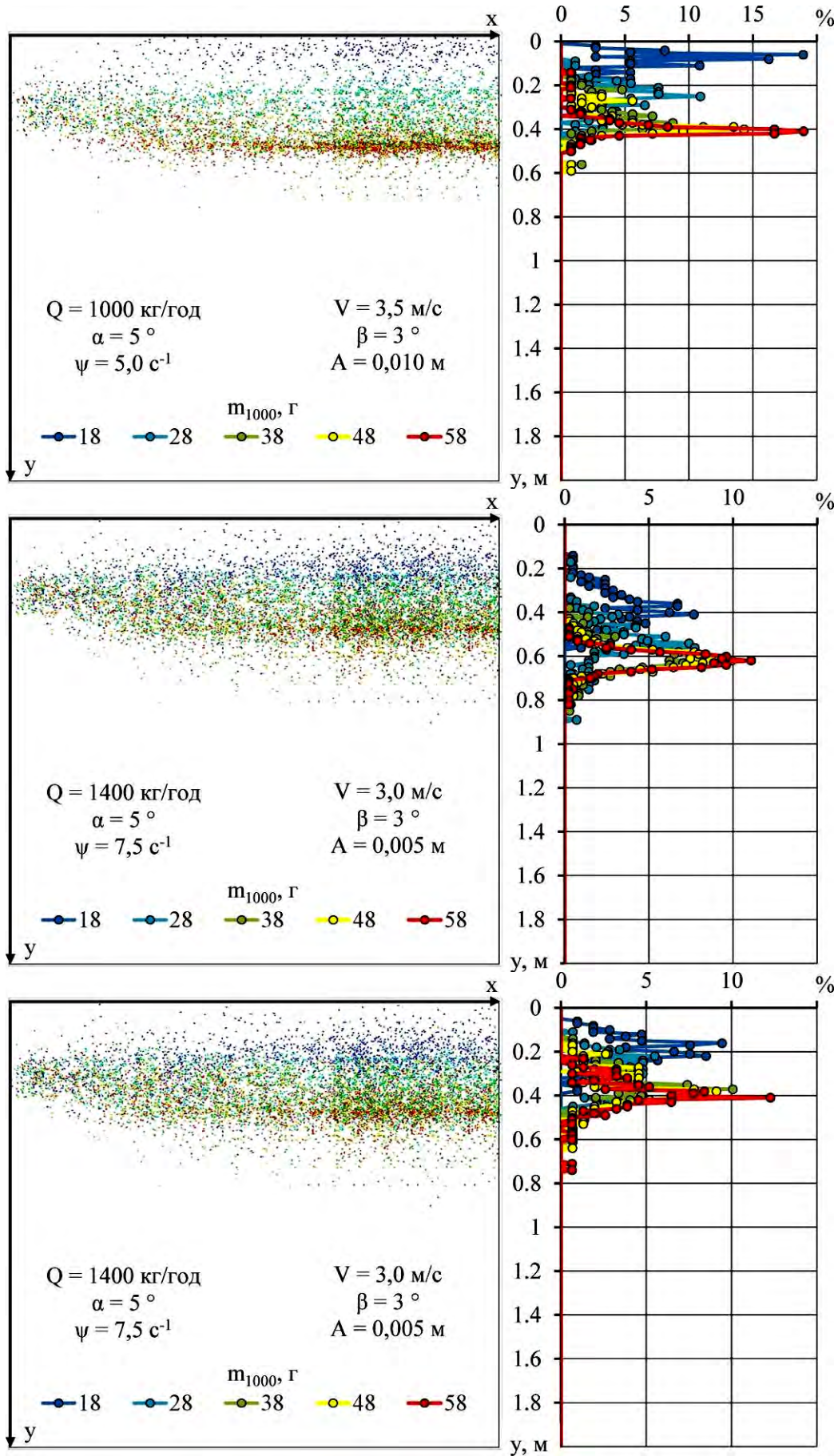


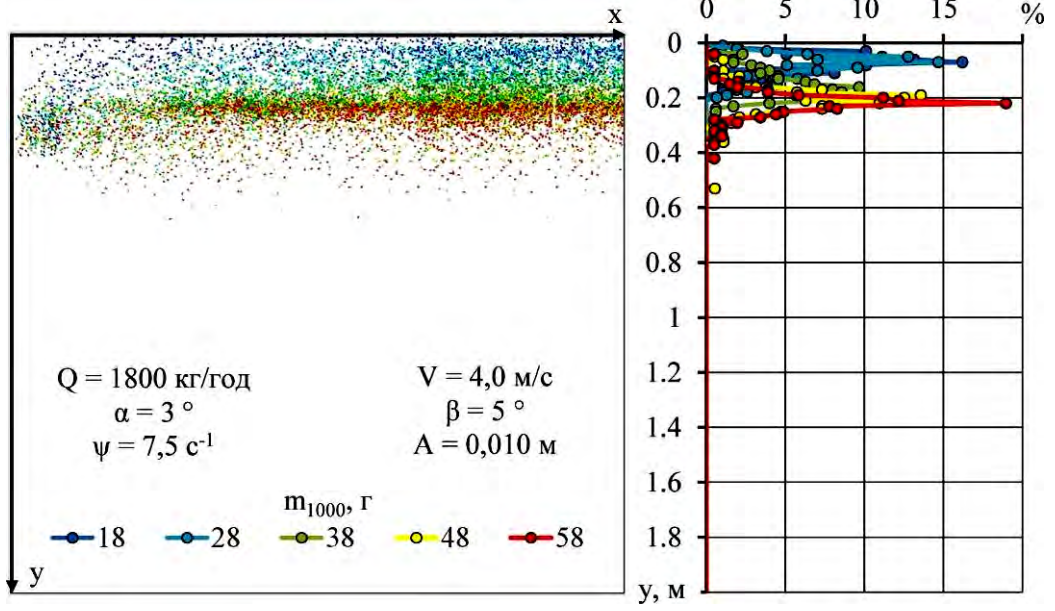
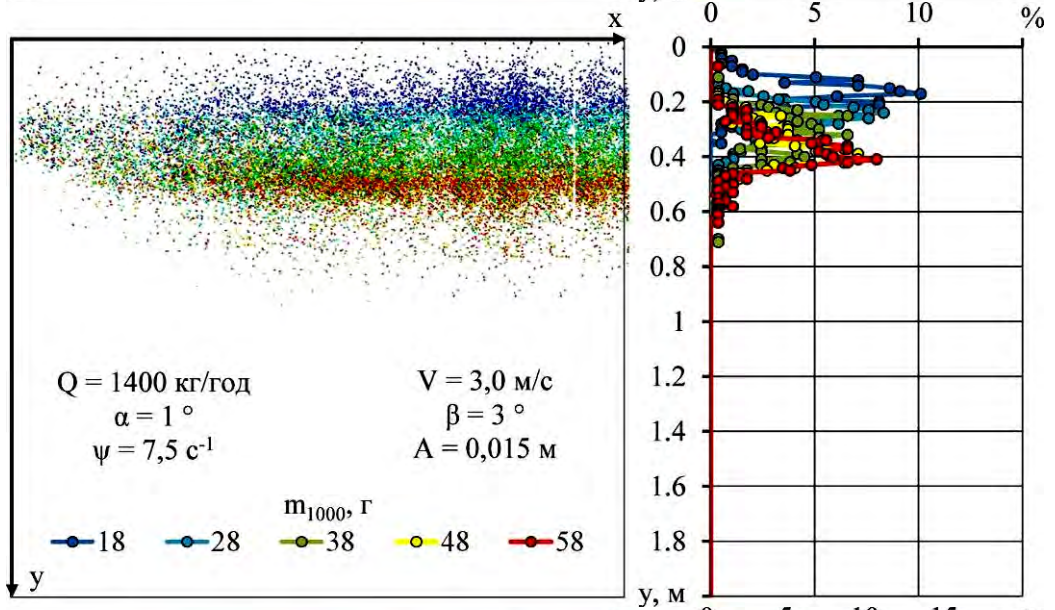
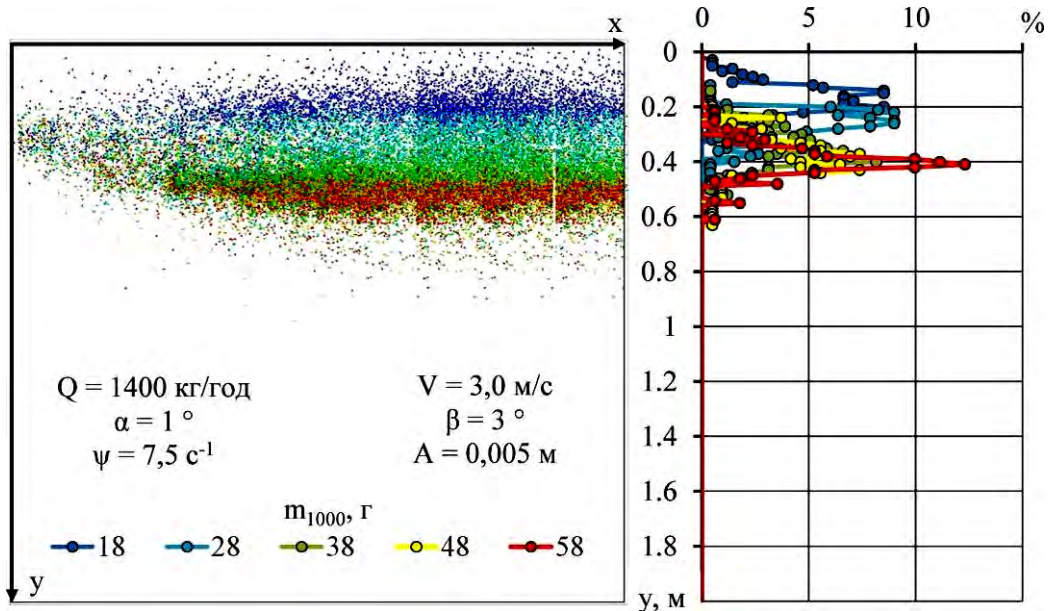


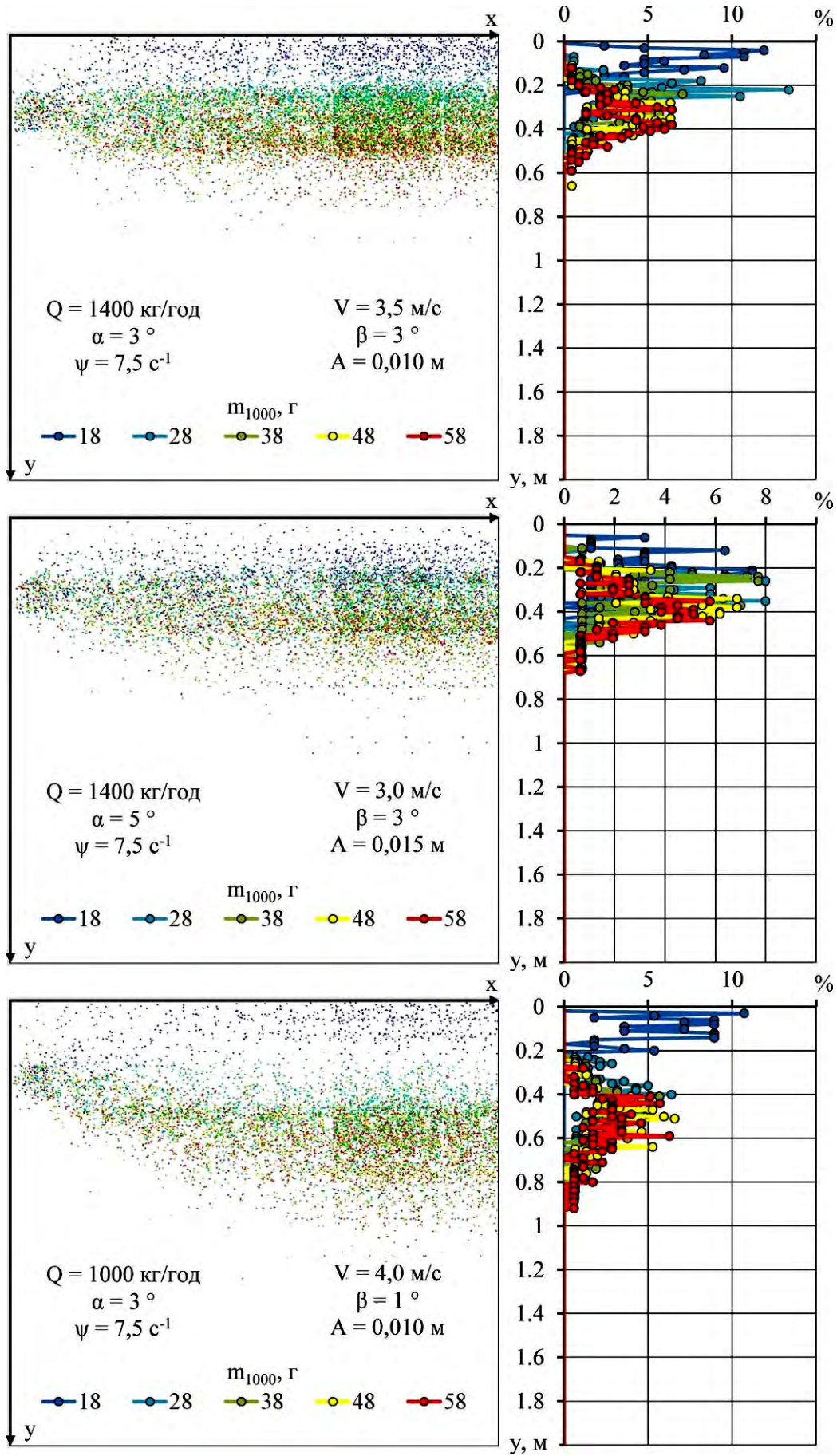


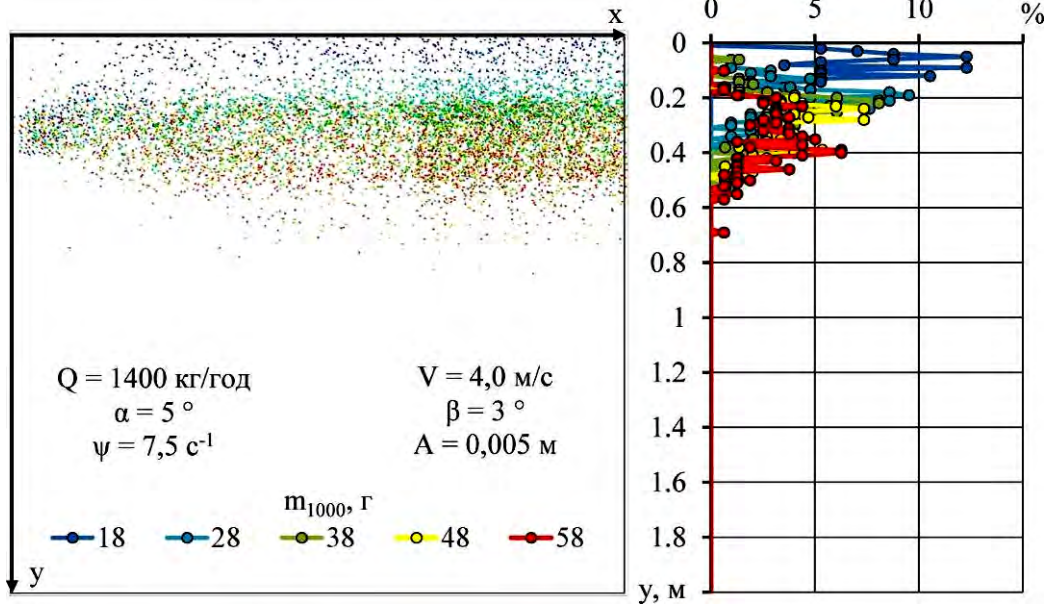
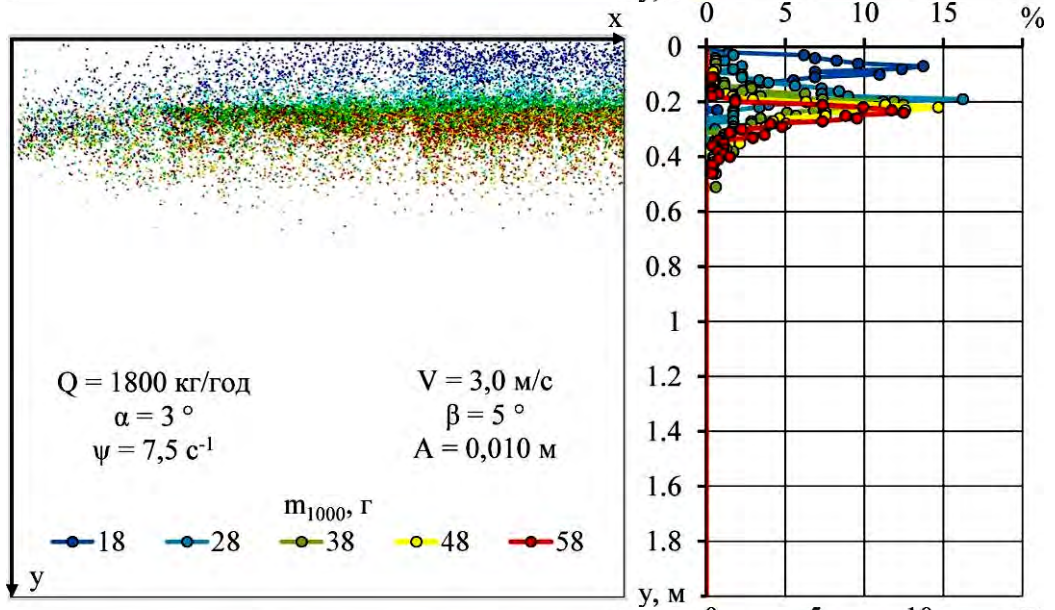
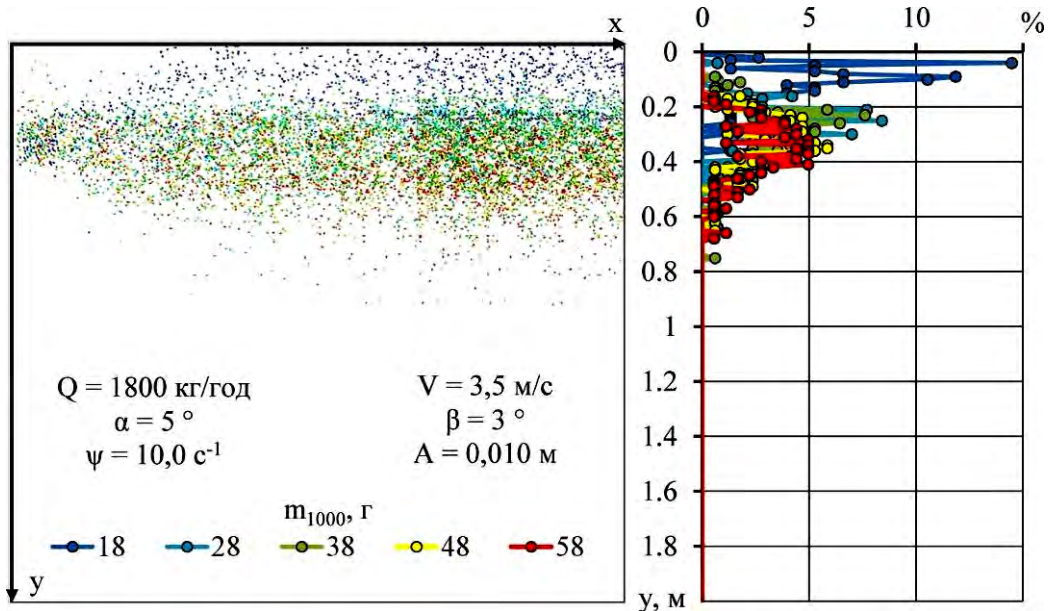


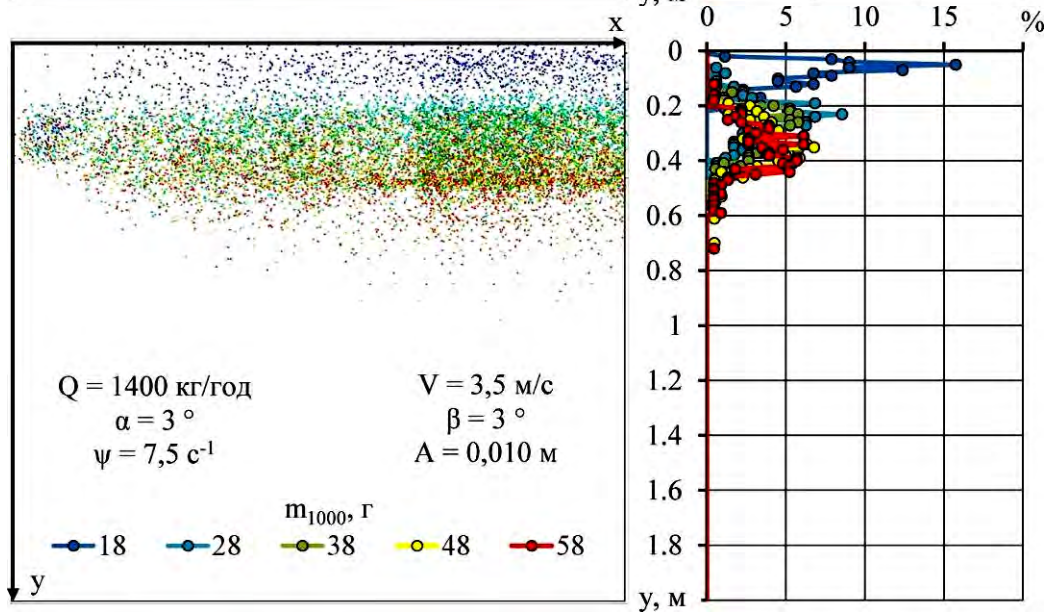
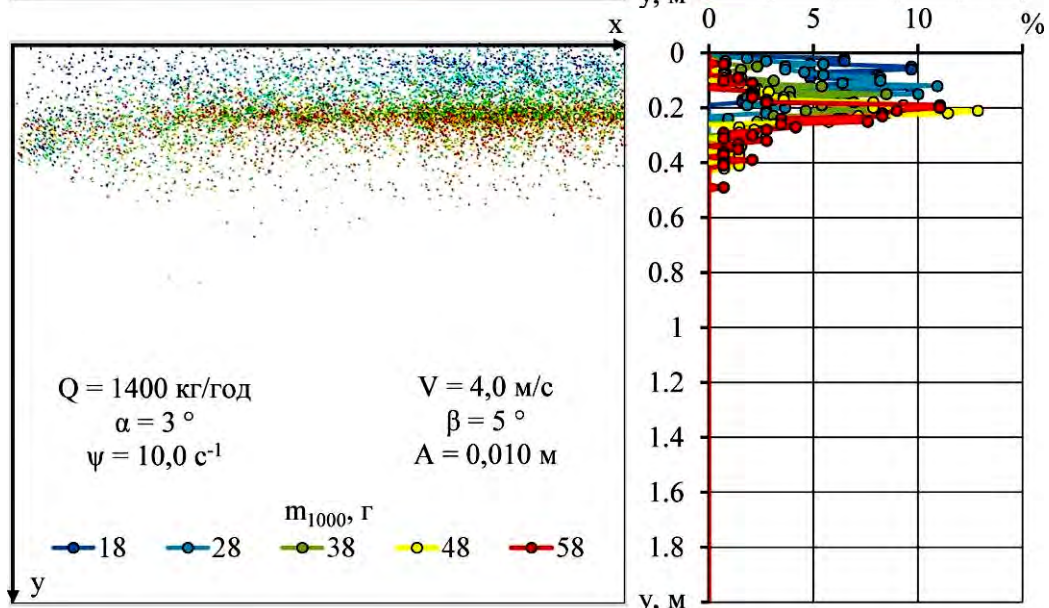
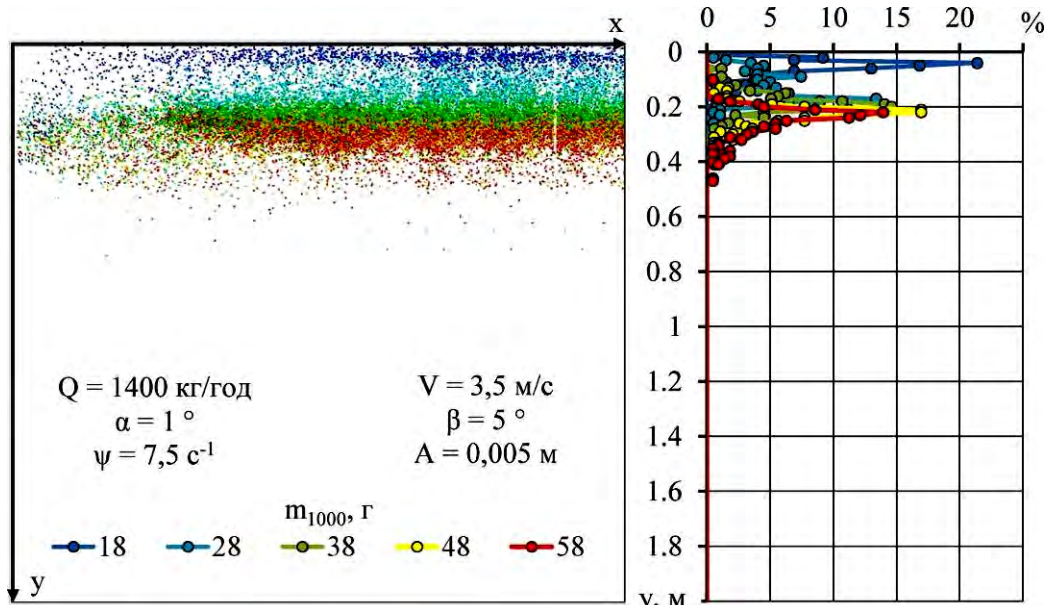












Додаток К

Чисельне моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі

Таблиця К.1 – Матриця плану чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

№	Подача насіння Q, кг/год	Частота коливань вібрлотка ψ , с^{-1}	Частота обертання барабана n, об/хв
1	150	10	5
2	150	7,5	5
3	150	5	5
4	150	10	10
5	150	7,5	10
6	150	5	10
7	150	10	15
8	150	7,5	15
9	150	5	15
10	90	10	5
11	90	7,5	5
12	90	5	5
13	90	10	10
14	90	7,5	10

№	Подача насіння Q, кг/год	Частота коливань вібрлотка ψ , с^{-1}	Частота обертання барабана n, об/хв
15	90	5	10
16	90	10	15
17	90	7,5	15
18	90	5	15
19	30	10	5
20	30	7,5	5
21	30	5	5
22	30	10	10
23	30	7,5	10
24	30	5	10
25	30	10	15
26	30	7,5	15
27	30	5	15

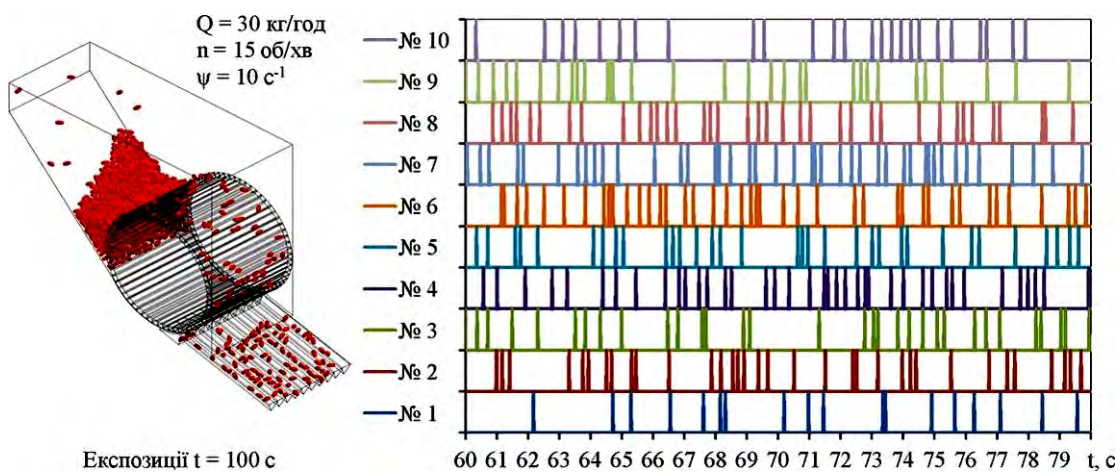
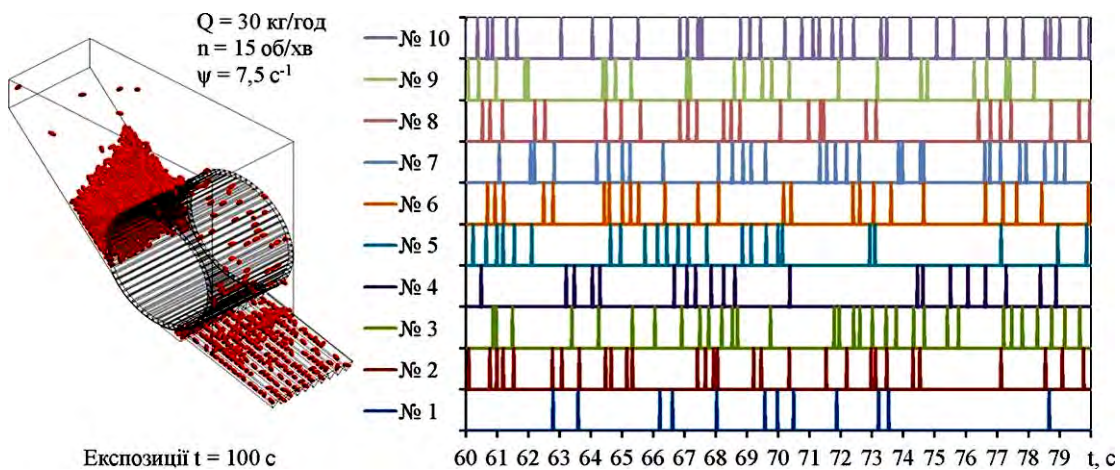
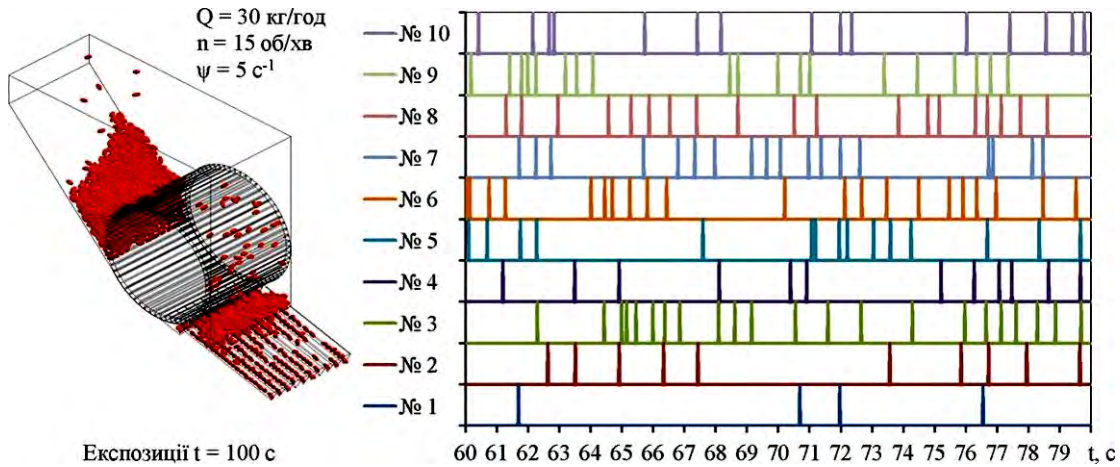
Таблиця К.2 – Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

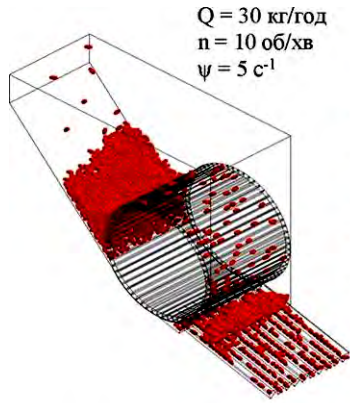
№	Q, кг/ГОД	ψ , с^{-1}	n, об/хв	T, с	q, кг/ГОД
1	150	10	5	0,031	81,0
2	150	7,5	5	0,069	45,1
3	150	5	5	0,100	26,7
4	150	10	10	0,037	81,0
5	150	7,5	10	0,071	39,7
6	150	5	10	0,109	26,9
7	150	10	15	0,044	78,2
8	150	7,5	15	0,068	40,0
9	150	5	15	0,145	25,0
10	90	10	5	0,038	63,1
11	90	7,5	5	0,061	39,2
12	90	5	5	0,110	22,9
13	90	10	10	0,032	84,6
14	90	7,5	10	0,068	43,4

№	Q, кг/ГОД	ψ , с^{-1}	n, об/хв	T, с	q, кг/ГОД
15	90	5	10	0,095	26,1
16	90	10	15	0,032	83,4
17	90	7,5	15	0,056	41,0
18	90	5	15	0,104	27,6
19	30	10	5	0,063	20,9
20	30	7,5	5	0,068	20,7
21	30	5	5	0,170	11,7
22	30	10	10	0,062	22,8
23	30	7,5	10	0,113	20,0
24	30	5	10	0,173	13,5
25	30	10	15	0,058	28,1
26	30	7,5	15	0,093	22,0
27	30	5	15	0,178	12,9

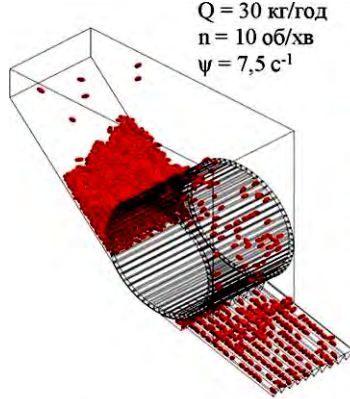
Додаток Л

Розподіл інтервалів часу сходу насіння з вібралотка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

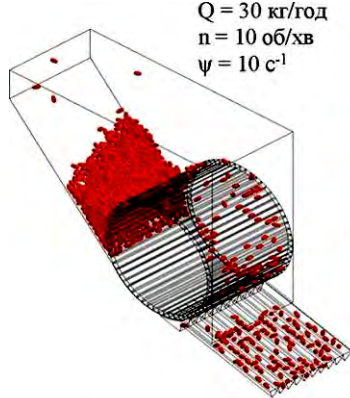




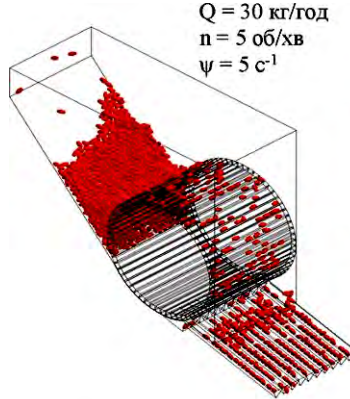
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



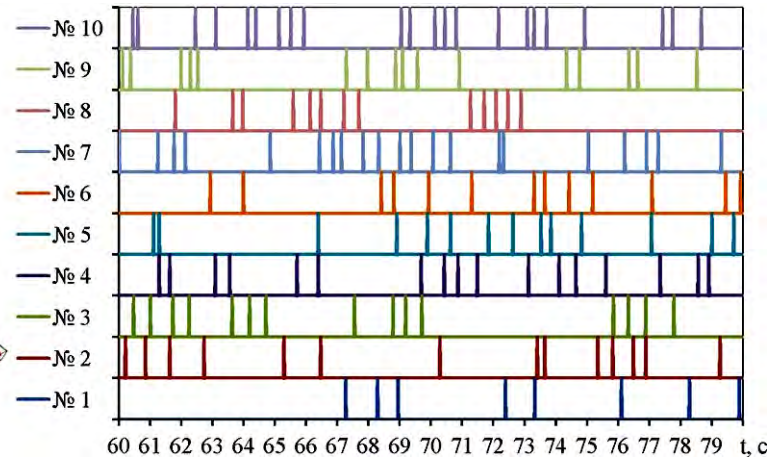
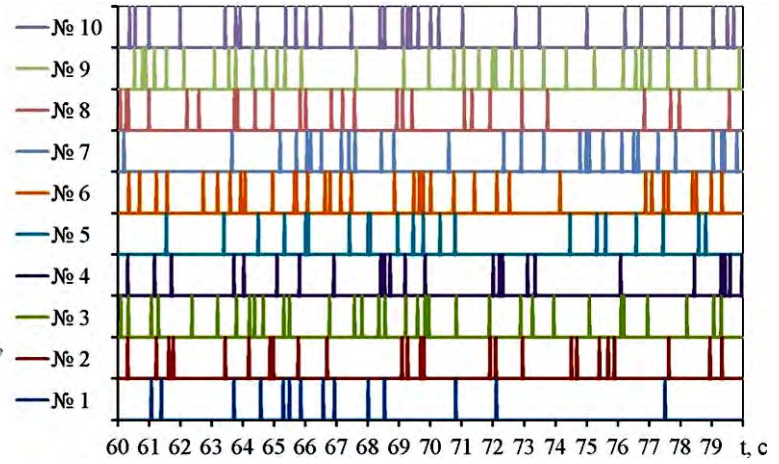
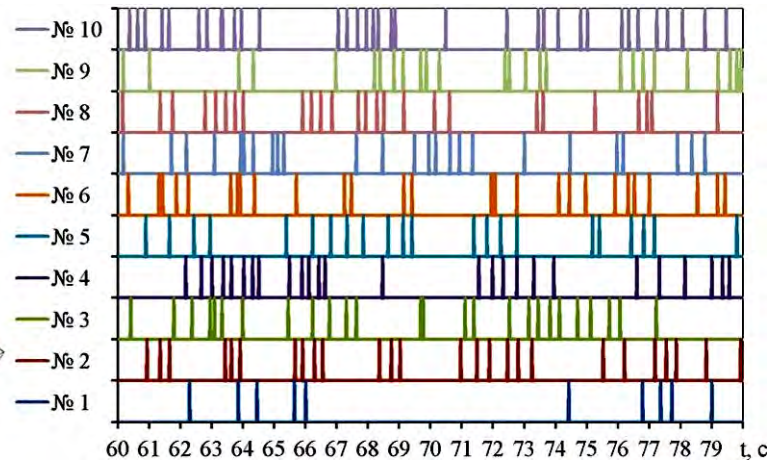
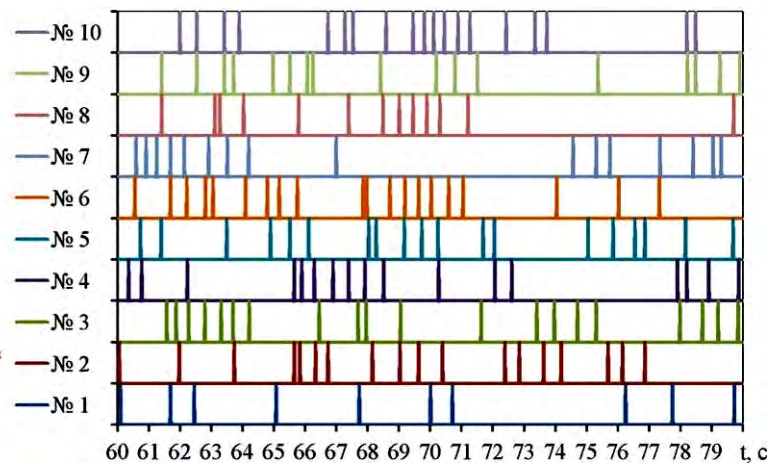
Експозиції $t = 100 \text{ с}$

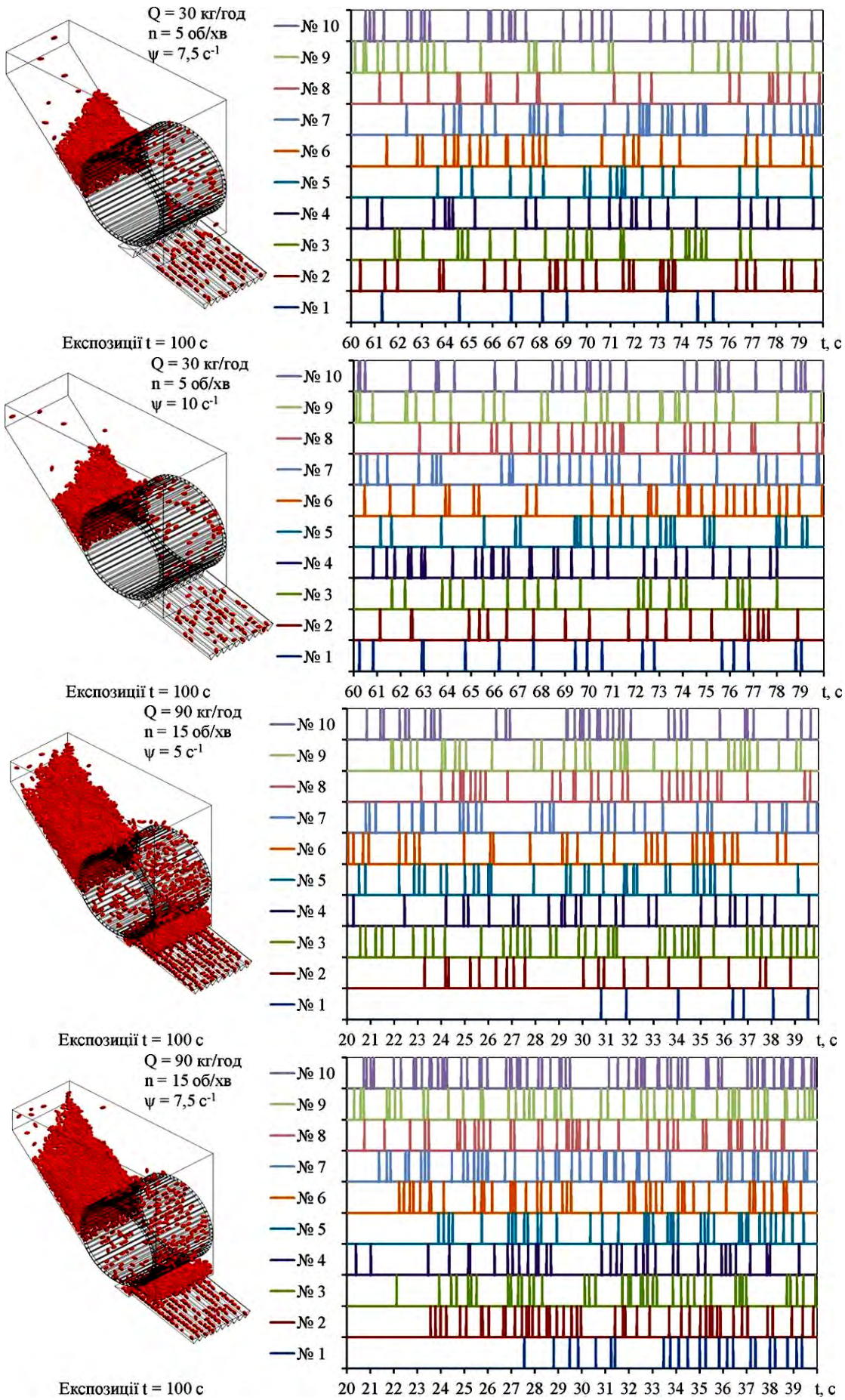


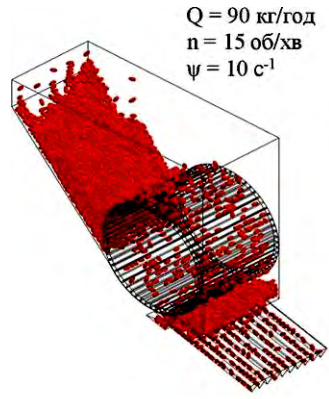
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



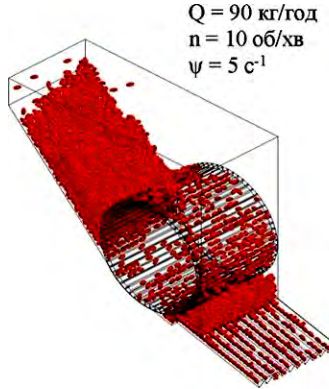
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



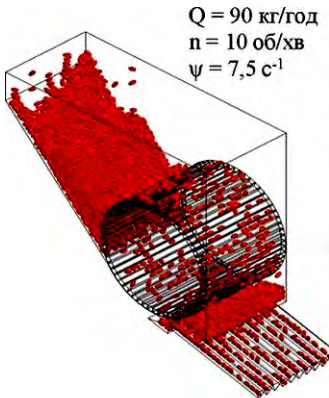




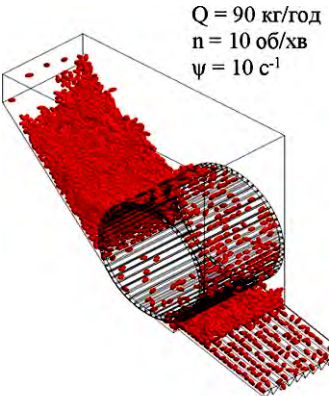
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



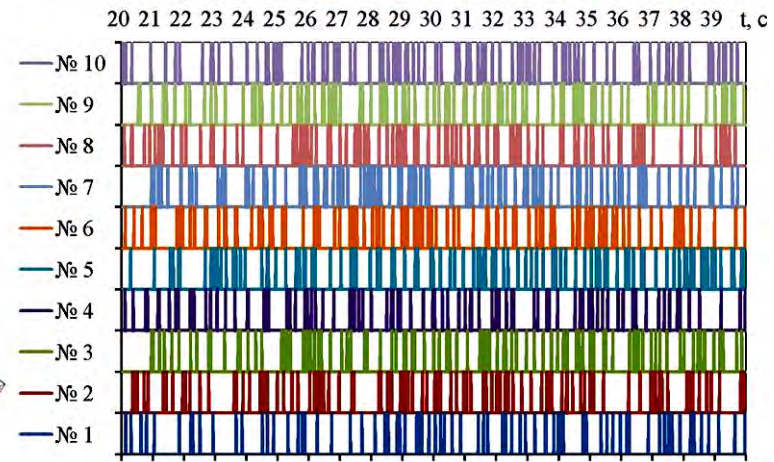
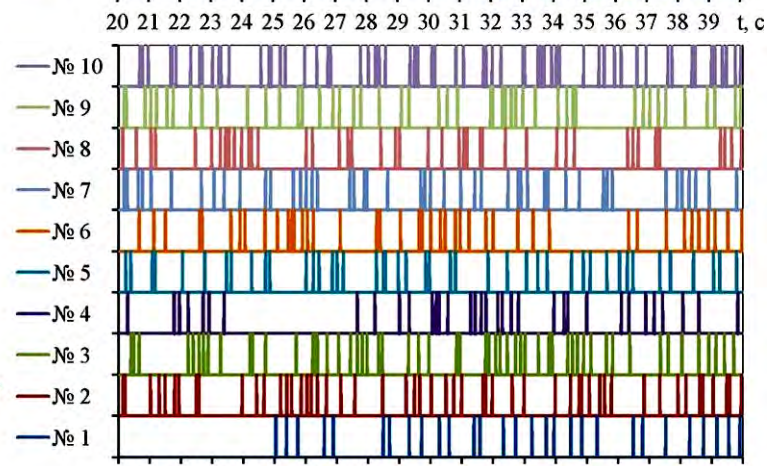
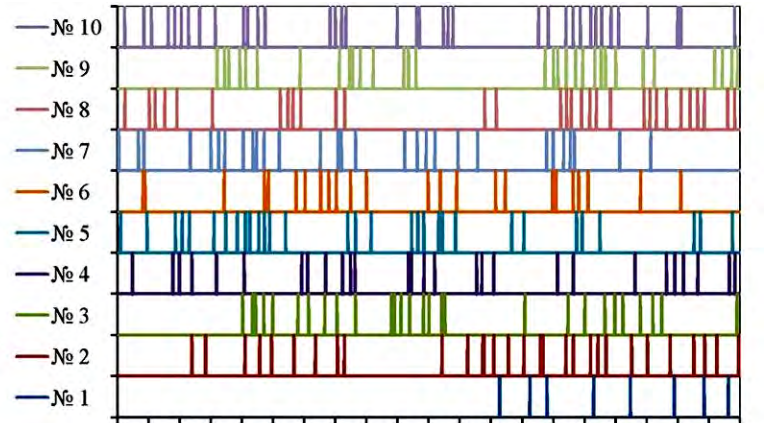
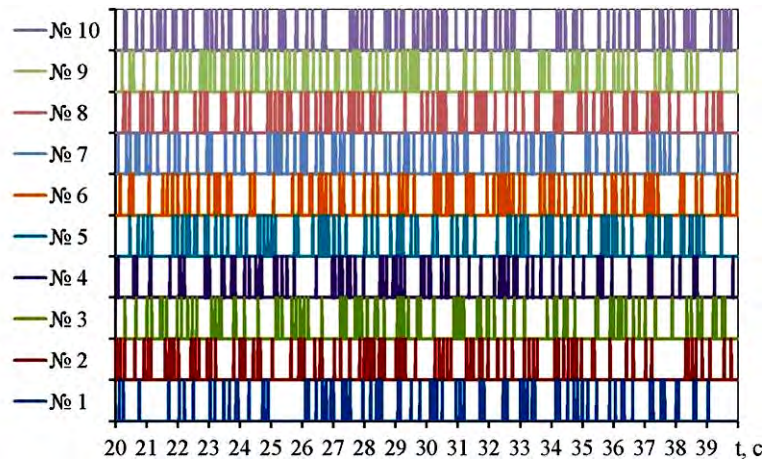
Експозиції $t = 100 \text{ с}$

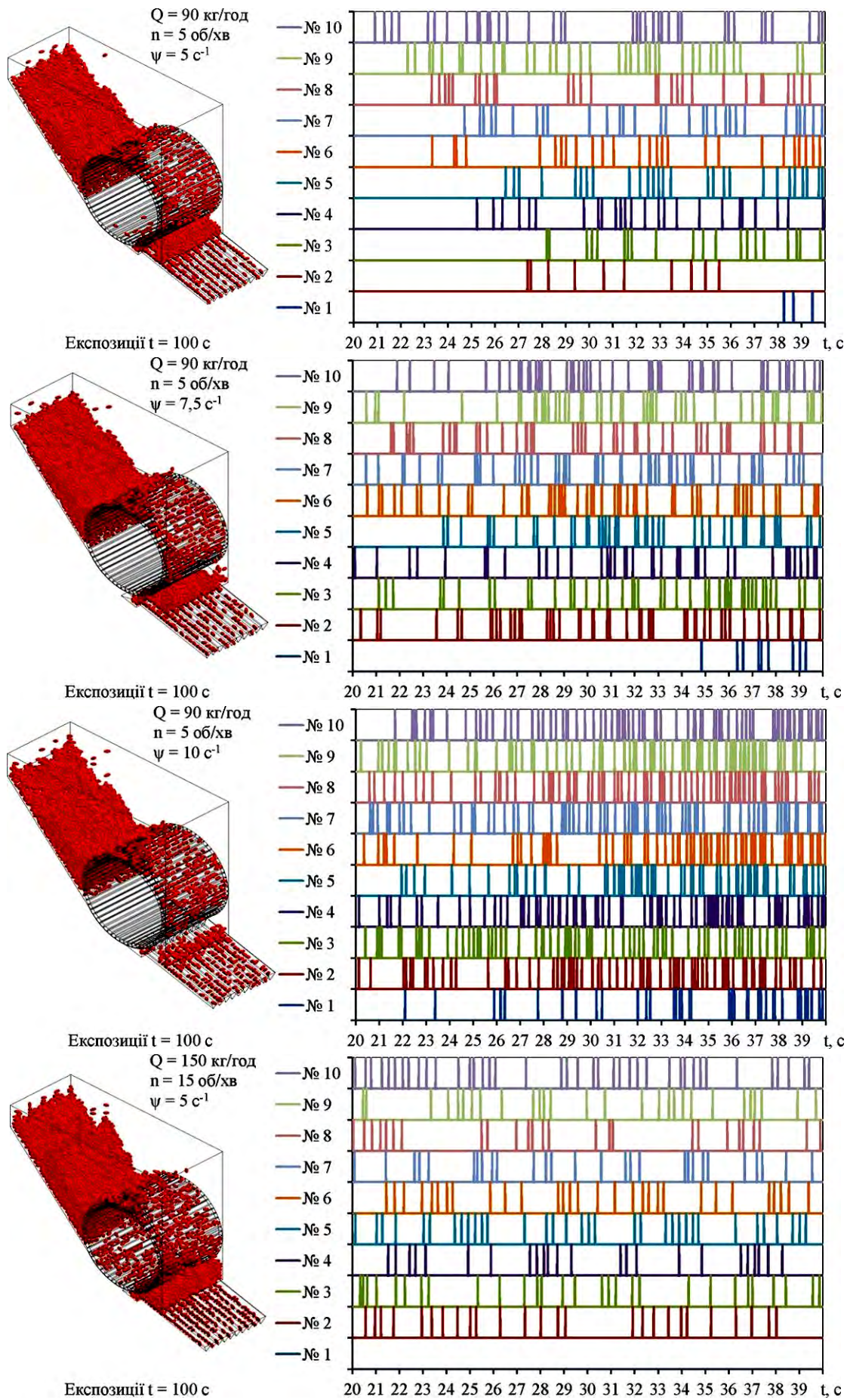


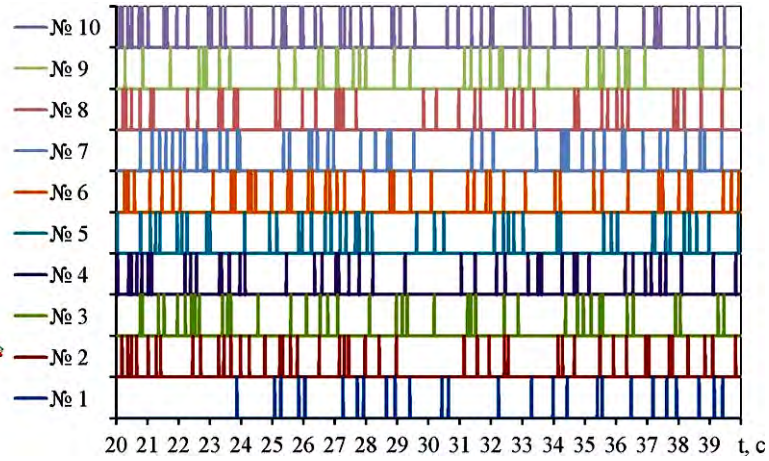
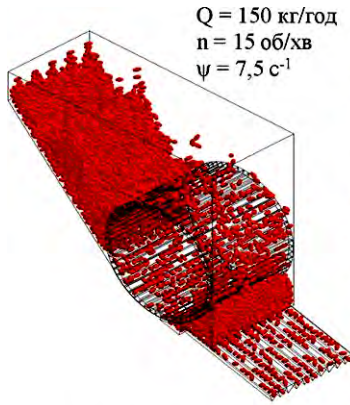
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



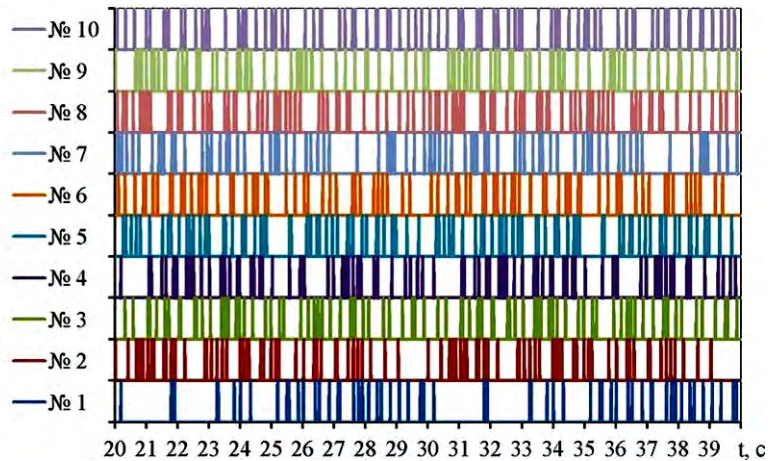
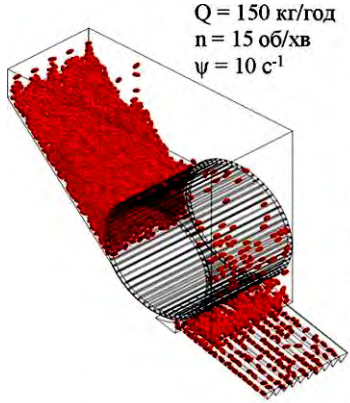
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



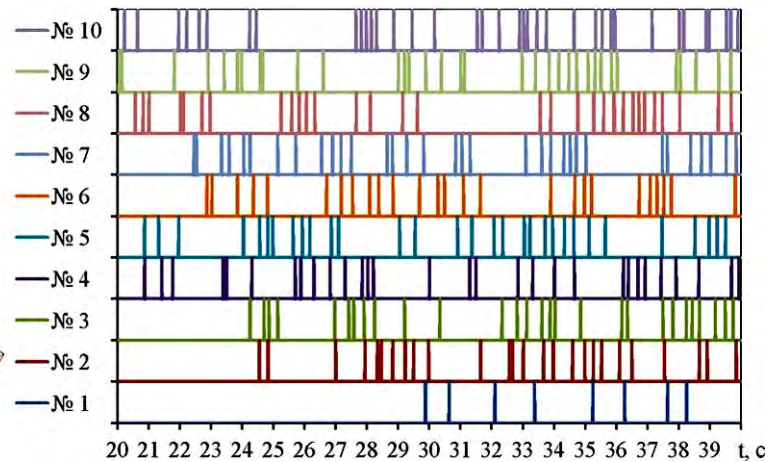
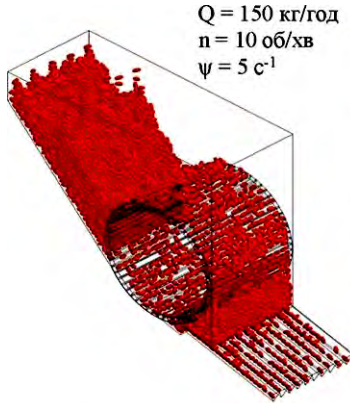




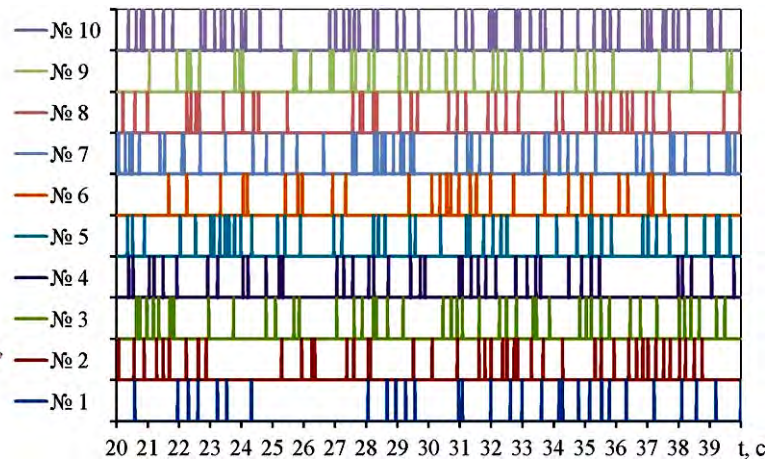
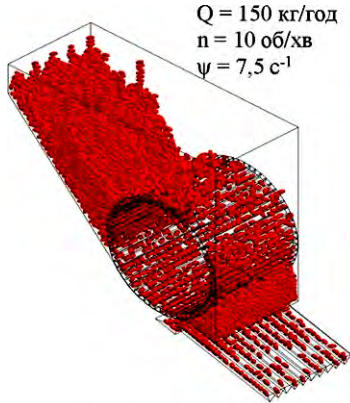
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



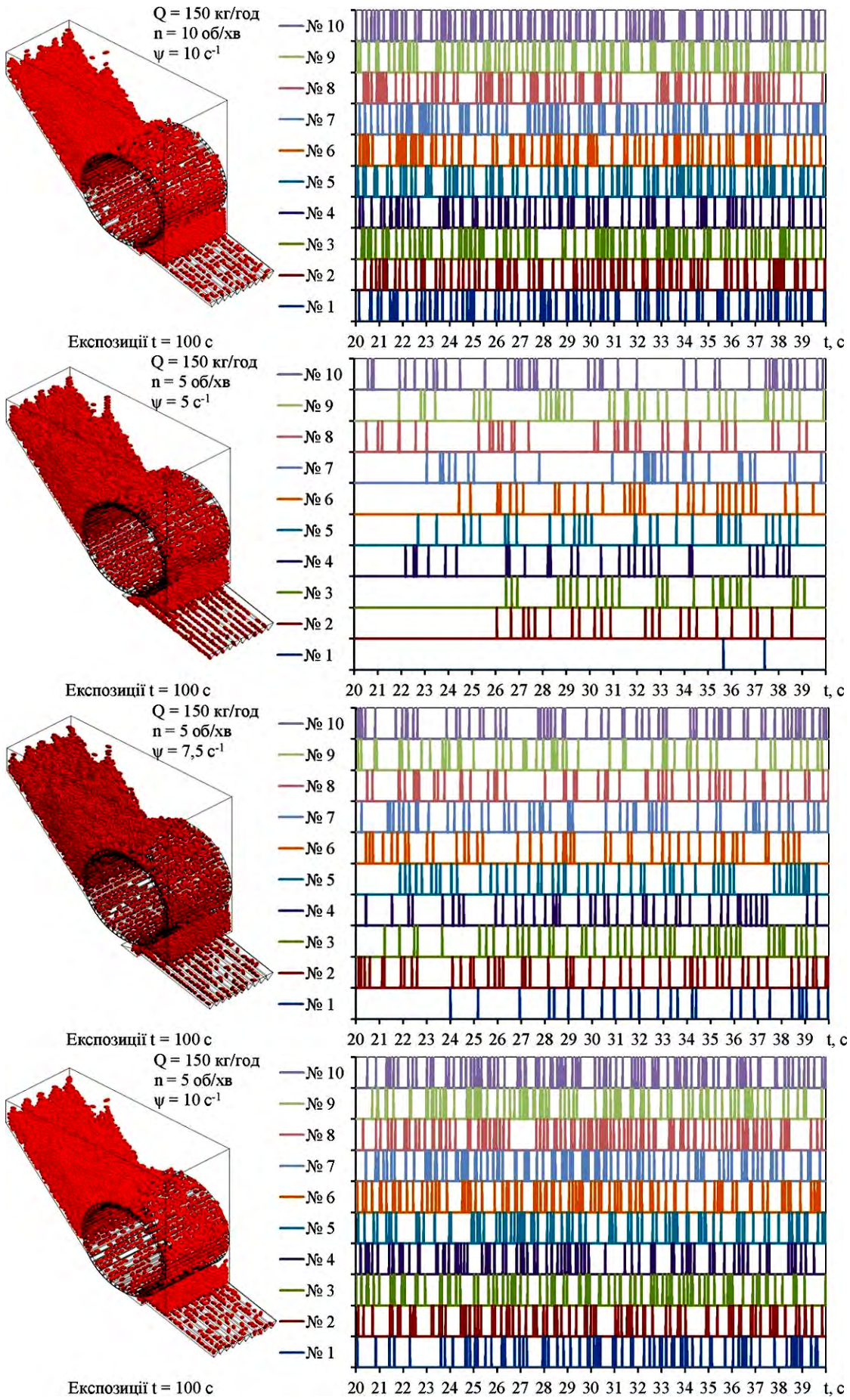
Експозиції $t = 100 \text{ с}$



Експозиції $t = 100 \text{ с}$



Експозиції $t = 100 \text{ с}$



Додаток М

Експериментальні дослідження блока подачі насіння

Таблиця М.1 – Матриця плану експериментальних досліджень блока подачі насіння

№	Подача насіння Q, кг/год	Частота коливань вібротка ψ , s^{-1}	Частота обертання барабана n, об/хв
	x_1	x_2	x_3
1	+1	+1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	-1	-1	0
5	0	0	0
6	+1	0	+1
7	+1	0	-1
8	-1	0	+1
9	-1	0	-1
10	0	0	0
11	0	+1	+1
12	0	+1	-1
13	0	-1	+1
14	0	-1	-1
15	0	0	0

Таблиця М.2 – Опис сортозразків соняшнику, що входять до складу вхідної насінневої суміші

№	Сорто-зразок	Опис забарвлення шарів перикарпію				Візуальне сприйняття забарвлення сім'янки	Група по забарвленню
		Пігментація епідермісу	Забарвлення гіподерми	Панцирність	Наявність антоціана		
1	Сл2613	Суцільна	сіра	+	-	чорна	1
2	14RNA274	Суцільна	сіра	+	-		
3	ВК419-2	Суцільна	сіра	+	-		
4	InK225	Суцільна	сіра	+	-		
5	InK404	Смугаста	біла	-	-	світло-сіра з білими смугами або біла	2
6	I2K2218	Без пігменту	біла	-	-		
7	ВІР130	Без пігменту	біла	-	-		
8	КГ9	Без пігменту	біла	-	-		

Таблиця М.3 – Матриця плану експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора насіння

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
1	1	1	0	0	0
2	1	-1	0	0	0
3	-1	1	0	0	0
4	-1	-1	0	0	0
5	0	0	1	1	0
6	0	0	1	-1	0
7	0	0	-1	1	0
8	0	0	-1	-1	0
9	0	1	0	0	1
10	0	1	0	0	-1
11	0	-1	0	0	1
12	0	-1	0	0	-1
13	1	0	1	0	0
14	1	0	-1	0	0
15	-1	0	1	0	0
16	-1	0	-1	0	0

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
17	0	0	0	1	1
18	0	0	0	1	-1
19	0	0	0	-1	1
20	0	0	0	-1	-1
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0
24	0	1	1	0	0
25	0	1	-1	0	0
26	0	-1	1	0	0
27	0	-1	-1	0	0
28	1	0	0	1	0
29	1	0	0	-1	0
30	-1	0	0	1	0
31	-1	0	0	-1	0
32	0	0	1	0	1

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅
33	0	0	1	0	-1
34	0	0	-1	0	1
35	0	0	-1	0	-1
36	1	0	0	0	1
37	1	0	0	0	-1
38	-1	0	0	0	1
39	-1	0	0	0	-1
40	0	1	0	1	0
41	0	1	0	-1	0
42	0	-1	0	1	0
43	0	-1	0	-1	0
44	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0

Додаток Н
Лабораторні дослідження фізико-механічних і морфологічних
властивостей насіння соняшнику

Таблиця Н.1 – Результати лабораторних досліджень

Назва зразка	Маса 1000 насінин M_{1000}, Γ	Довжина насінини $L, \text{мм}$	Ширина насінини $B, \text{мм}$	Товщина насінини $T, \text{мм}$	Ефективний діаметр $D_p, \text{мм}$	Об'ємна маса $\rho, \text{кг/м}^3$	Стапичний коефіцієнт тертя f	Кут природнього укосу $\varphi, ^\circ$
LG3	28,0±4,9	9,9±0,1	4,6±0,1	2,3±0,2	4,7±0,3	382±21	0,59±0,02	46,4±2,3
InK34	28,3±5,7	10,7±0,2	4,0±0,0	2,8±0,2	4,9±0,2	351±26	0,67±0,09	44,7±0,8
U5/303	29,0±5,0	10,1±0,1	4,0±0,2	2,6±0,2	4,7±0,3	347±21	0,62±0,03	57,2±2,6
КГ18	39,5±3,5	10,8±0,1	5,1±0,1	3,2±0,2	5,6±0,2	326±10	0,46±0,02	58,9±2,8
InK1124	46,5±5,4	10,2±0,2	5,4±0,2	3,3±0,2	5,7±0,3	346±21	0,66±0,09	54,2±2,4
Б2073	46,5±4,1	11,6±0,2	5,3±0,2	3,3±0,2	5,9±0,3	313±26	0,65±0,06	56,5±2,5
LD1217	47,5±3,4	13,2±0,2	4,5±0,2	3,0±0,2	5,6±0,3	384±20	0,45±0,03	48,6±0,3
Л2079	50,0±5,6	10,6±0,2	6,0±0,2	3,6±0,2	6,1±0,3	318±19	0,42±0,03	51,7±0
ZB231AC	51,0±1,4	10,9±0,1	4,9±0,0	3,5±0,1	5,7±0,1	364±9	0,4±0,04	42,1±0,6
Л7242	54,5±5,4	11,9±0,1	6,1±0,1	4,0±0,1	6,6±0,2	281±22	0,67±0,03	46,6±1,4
Сп1790	56,5±3,9	11,7±0,2	5,9±0,2	4,1±0,2	6,6±0,3	286±12	0,52±0,04	47,9±1,1
InK2238	57,5±4,9	12,0±0,1	6,3±0,2	3,5±0,2	6,4±0,3	327±27	0,61±0,08	41,9±1,7
LD1251	64,5±3,9	11,7±0,2	6,2±0,2	3,8±0,2	6,5±0,3	306±18	0,5±0,09	44,1±0,6
BK511	65,0±4,9	11,8±0,2	5,7±0,2	3,7±0,2	6,3±0,3	330±22	0,52±0,02	58,9±1,2
InK912	71,3±4,0	13,0±0,2	6,6±0,2	4,3±0,2	7,2±0,3	288±23	0,44±0,08	53,9±1,7
№552	78,5±3,4	14,9±0,2	7,5±0,2	4,5±0,2	8±0,3	224±17	0,53±0,07	49,3±1,9
InK2058	81,5±4,8	12,2±0,2	6,9±0,2	4,0±0,2	7±0,3	310±16	0,51±0,02	45,9±0,1
SL2966	85,0±4,4	13,3±0,2	6,9±0,2	4,3±0,2	7,3±0,3	315±11	0,67±0,02	44±1,9
ЗKH32	99,0±5,2	17,5±0,3	8,2±0,2	5,2±0,2	9,1±0,3	200±14	0,54±0,02	42,3±0,3
ЗKH51	128,6±4,4	21,8±0,3	9,5±0,3	4,6±0,2	9,8±0,4	198±17	0,61±0,02	51,7±0,1

Таблиця Н.2 – Забарвлення насіння соняшнику

№	Назва зразка	Візуальне сприйняття забарвлення				Група
		Суцільність	Панцирність	Наявність антоціана	Забарвлення	
1	2	3	4	5	6	7
1	Сл2613	суцільне	+	-	чорне	1
2	14RNA274	суцільне	+	-		
3	ВК419-2	суцільне	+	-		
4	InK225	суцільне	+	-		
5	АН70029Rf	суцільне	-	-	темно-коричневе	2
6	КГ13	суцільне	-	-		
7	ВК475	суцільне	-	-		
8	InK2238	суцільне	-	-		
9	LD4/1	суцільне	-	-	світло-коричневе	3
10	LD72/1	суцільне	-	-		
11	ВК428	смугасте	+	-	чорне з сірими полосами	4
12	НА300Б	смугасте	+	-		
13	Орп1	смугасте	+	-		
14	SL2966	смугасте	+	-		
15	ВК484	смугасте	+	-		
16	СЛ1218	смугасте	+	-		
17	ІЗК1070	смугасте	+	-		
18	ЛГ13-2	смугасте	+	-		
19	InK404	смугасте	-	-	світло-сіре з білими полосами	5
20	I2K1962-1	смугасте	-	-	чорне з бурими полосами	6
21	InK1587	смугасте	+	-	чорне зі світло-сірими полосами	7
22	I2K670	смугасте	+	-		
23	I2K2003-1	смугасте	+	-		
24	НАР/7	смугасте	+	-		
25	НА298	суцільне	+	+	чорно-красне	8
26	КГ104	суцільне	+	+	чорно-бордове	9
27	СЛ2354	суцільне	+	+		
28	СЛ2349	суцільне	+	+		
29	КГ111	смугасте	+	+	чорне з темно-красними полосами	10
30	InK1124	смугасте	-	-	темно-сіре з коричневими полосами	11
31	I2K2218	суцільне	-	-	біле	12
32	ВІР130	суцільне	-	-		
33	КГ9	суцільне	-	-		

Додаток П

**Експериментальні дослідження процесу розділення насіннєвого матеріалу
соняшнику за аеродинамічними властивостями**

Таблиця П.1 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

№	V, м/с	D _p , мм	ρ ₁ , кг/м ³				ξ ₁ , %			
			1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	7	8	213,2	215,6	217,5	215,4	98,3	96,7	94,6	96,5
2	7	11,5	172,3	175,4	173,5	173,7	46,3	43,4	45,5	45,1
3	7	15	163,5	166,9	167,7	166,0	1,5	4,9	5,7	4,0
4	5	8	213,2	215,3	214,4	214,3	97,9	96,0	97,1	97,0
5	5	11,5	179,2	180,6	183,6	181,1	57,8	57,2	54,2	56,4
6	5	15	164,5	167,9	168,9	167,1	0,9	4,3	5,3	3,5
7	3	8	214,1	217,2	215,2	215,5	99,1	96,2	98,2	97,8
8	3	11,5	187,4	190,7	190,5	189,5	63,4	60,7	60,5	61,5
9	3	15	165,2	169,4	167,4	167,3	1,4	5,6	3,6	3,5
№	V, м/с	D _p , мм	ρ ₂ , кг/м ³				ξ ₁ , %			
			1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	7	8	258,3	260,7	262,6	260,5	1,7	3,3	5,4	3,5
2	7	11,5	219,2	222,3	220,4	220,6	53,7	56,6	54,5	54,9
3	7	15	207,5	210,9	211,7	210,0	98,5	95,1	94,3	96,0
4	5	8	256,8	258,9	258,0	257,9	2,1	4,0	2,9	3,0
5	5	11,5	228,7	230,1	233,1	230,6	42,2	42,8	45,8	43,6
6	5	15	207,4	210,8	211,8	210,0	99,1	95,7	94,7	96,5
7	3	8	258,6	261,7	259,7	260,0	0,9	3,8	1,8	2,2
8	3	11,5	233,3	236,6	236,4	235,4	36,6	39,3	39,5	38,5
9	3	15	210,2	214,4	212,4	212,3	98,6	94,4	96,4	96,5

Таблиця П.2 – Вихідні дані результатів експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на аеродинамічному сепараторі серії «Алмаз»

№ досліду	Забірник	Повторність №1					Повторність №2					Повторність №3				
		Д, %	Г, %	В, %	П, %	%	Д, %	Г, %	В, %	П, %	%	Д, %	Г, %	В, %	П, %	%
1	IV	0,4	0,0	2,3	97,4	28,8	0,4	13,9	9,1	76,6	25,8	5,4	23,8	12,7	58,2	24,5
	III	0,4	3,9	71,6	24,1	24,4	7,3	17,1	73,5	2,1	25,1	17,1	6,8	75,8	0,3	28,3
	II	19,9	46,3	29,1	4,7	21,6	54,4	41,7	3,7	0,2	22,8	73,4	25,7	0,9	0,0	12,2
	I	76,5	21,7	1,8	0,0	25,3	95,2	4,8	0,0	0,0	26,3	99,4	0,6	0,0	0,0	34,9
2	IV	4,3	2,4	0,1	93,3	41,3	0,4	2,3	0,5	96,8	29,9	1,0	11,9	6,6	80,5	26,9
	III	16,5	1,2	80,5	1,9	23,5	1,2	6,3	78,9	13,5	24,6	6,2	11,4	78,4	4,0	25,4
	II	3,2	59,9	5,0	32,0	13,7	19,2	50,2	24,0	6,6	20,0	38,0	52,7	7,9	1,4	20,7
	I	47,2	2,8	42,5	7,5	21,5	81,6	16,0	2,3	0,2	25,5	91,2	8,8	0,0	0,0	27,0
3	IV	1,2	14,1	5,6	79,0	24,4	8,4	27,2	22,0	42,5	24,3	13,0	27,8	18,3	41,0	23,1
	III	5,7	24,1	68,6	1,6	25,0	24,2	7,0	68,7	0,0	27,8	28,3	2,3	69,3	0,1	29,8
	II	65,3	33,4	1,2	0,0	26,4	96,8	3,2	0,0	0,0	16,7	92,6	7,4	0,0	0,0	12,8
	I	96,7	3,3	0,0	0,0	24,2	100	0,0	0,0	0,0	31,3	100	0,0	0,0	0,0	34,3
4	IV	0,2	9,1	4,1	86,6	24,9	6,3	28,0	18,8	46,9	24,3	12,9	27,3	13,9	45,9	21,6
	III	5,8	23,9	69,6	0,6	25,0	22,9	6,2	70,8	0,1	28,4	39,2	1,4	59,4	0,0	30,9
	II	65,1	34,2	0,7	0,0	25,2	94,5	4,5	1,0	0,0	14,7	100	0,0	0,0	0,0	7,4
	I	99,2	0,8	0,0	0,0	24,9	100	0,0	0,0	0,0	32,7	100	0,0	0,0	0,0	40,1
5	IV	0,3	0,0	5,8	93,9	29,7	0,6	11,4	4,7	83,3	25,9	4,7	25,6	9,0	60,7	25,5
	III	1,6	3,0	76,0	19,4	24,8	8,4	17,7	72,8	1,1	25,0	15,5	5,6	78,8	0,1	28,5
	II	23,4	53,2	19,4	4,0	20,7	56,7	41,4	1,7	0,2	22,8	68,1	31,2	0,7	0,0	12,2
	I	75,8	22,8	1,3	0,0	24,8	96,4	2,8	0,8	0,0	26,2	99,4	0,6	0,0	0,0	33,9
6	IV	5,9	18,4	3,3	72,3	16,1	2,2	0,4	2,1	95,3	30,5	1,0	11,1	2,5	85,3	28,1
	III	4,6	3,2	84,6	7,7	30,9	3,0	4,2	78,9	13,9	24,8	7,5	11,7	77,6	3,2	25,3
	II	8,8	70,1	11,8	9,3	22,2	18,4	55,6	19,7	6,3	20,0	46,4	46,5	5,7	1,4	19,4
	I	72,8	9,2	16,8	1,2	30,8	78,6	18,1	3,1	0,2	24,8	92,0	8,0	0,0	0,0	27,2
7	IV	0,0	5,0	0,0	95,0	41,6	0,9	5,0	0,1	94,0	29,9	3,7	14,6	10,0	71,7	26,0
	III	16,9	0,1	82,9	0,1	23,7	1,6	5,7	80,2	12,5	24,5	6,7	8,8	80,3	4,2	25,7
	II	0,2	67,4	0,2	32,2	12,9	13,2	52,4	26,6	7,8	19,9	28,7	59,4	10,0	1,9	20,0
	I	36,4	0,1	52,3	11,3	21,8	82,0	13,5	4,3	0,2	25,7	93,4	5,8	0,9	0,0	28,3
8	IV	0,0	1,4	1,3	97,3	28,5	2,3	16,8	13,8	67,0	25,6	7,5	22,6	15,1	54,8	24,1
	III	0,9	5,4	70,8	22,9	24,5	9,2	14,3	73,2	3,3	25,4	16,8	8,4	74,1	0,8	27,3
	II	20,0	43,6	31,2	5,2	21,7	50,1	44,7	4,8	0,4	21,9	60,8	37,6	1,4	0,3	15,3
	I	73,0	21,0	5,9	0,2	25,3	93,8	6,0	0,2	0,0	27,1	99,2	0,8	0,0	0,0	33,2
9	IV	1,9	15,8	11,5	70,8	24,6	8,8	24,5	25,2	41,4	24,6	13,1	25,1	20,2	41,7	24,1
	III	7,8	23,3	66,0	2,9	24,9	23,3	11,2	65,2	0,2	26,9	25,7	7,1	66,6	0,7	28,0
	II	66,3	31,5	2,2	0,0	26,3	95,1	4,9	0,0	0,0	19,0	97,1	0,0	2,9	0,0	14,9
	I	94,5	5,5	0,0	0,0	24,2	97,9	2,1	0,0	0,0	29,6	100	0,0	0,0	0,0	33,0

В – виповнені; П – неповністю виповнені і пусті; Г – голе ядро і уражене грибовими хворобами; Д – органічні (рослинні) домішки; % – відсоток виходу насіння у відповідному забірнику

Таблиця П.3 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на аеродинамічному сепараторі серії «Алмаз»

№	x ₁	x ₂	P, кВт				δ, %			
			1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	0	-1	0,62	0,66	0,58	0,62	74,8	72,8	73,6	73,7
2	0	0	1,62	1,66	1,59	1,62	75,8	79,2	77,1	77,4
3	0	1	2,62	2,66	2,57	2,62	68,7	61,2	65,3	65,1
4	-1	-1	0,6	0,6	0,58	0,59	72,3	64,8	68,4	68,5
5	-1	0	1,59	1,62	1,57	1,59	76,6	74,6	75,4	75,5
6	-1	1	2,58	2,63	2,54	2,58	75,8	79,2	77,7	77,5
7	1	-1	0,62	0,65	0,57	0,61	75,8	79,3	77,5	77,5
8	1	0	1,63	1,66	1,59	1,63	73,0	71,0	72,2	72,0
9	1	1	2,6	2,64	2,56	2,60	65,0	57,6	61,7	61,4

Додаток Р

**Експериментальні дослідження процесу сепарації насіннєвого матеріалу
соняшнику за геометричними розмірами**

Таблиця Р.1 – Зведені дані експериментальних досліджень за продуктивністю
 q , кг/год

№	x_1	x_2	x_3	Пробивні решета				Пруткові решета				Точні решета			
				1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.
1	1	1	0	1560	1759	1518	1613	1796	2081	2085	1987	1646	1723	1723	1698
2	1	-1	0	1560	1636	1525	1574	1796	2085	1894	1925	1746	2015	1844	1869
3	-1	1	0	1025	1123	1122	1090	1139	1306	1436	1294	968	1227	1057	1084
4	-1	-1	0	1025	1222	1121	1122	1139	1396	1327	1287	1068	1364	1335	1256
5	0	0	0	1293	1389	1292	1324	1467	1552	1533	1518	1357	1613	1515	1495
6	1	0	1	1633	1722	1608	1654	1885	2171	2172	2076	1788	1855	1983	1875
7	1	0	-1	1147	1346	1232	1241	1289	1567	1567	1474	1173	1352	1248	1257
8	-1	0	1	992	1087	970	1016	1099	1187	1355	1213	976	1162	1072	1070
9	-1	0	-1	716	813	702	744	761	817	948	842	627	722	804	718
10	0	0	0	1293	1468	1390	1383	1467	1734	1556	1586	1357	1415	1535	1436
11	0	1	1	1239	1298	1228	1255	1402	1468	1581	1484	1190	1387	1488	1355
12	0	1	-1	1005	1200	1090	1098	1114	1303	1212	1210	993	1271	1070	1111
13	0	-1	1	1385	1540	1481	1469	1581	1767	1669	1673	1575	1660	1772	1669
14	0	-1	-1	859	948	848	885	935	990	1033	986	808	1074	967	949
15	0	0	0	1293	1369	1362	1341	1467	1763	1553	1595	1357	1625	1642	1542

Таблиця Р.2 – Зведені дані експериментальних досліджень за сумарною
концентрацією насіння θ , %

№	x_1	x_2	x_3	Пробивні решета				Пруткові решета				Точні решета			
				1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.
1	1	1	0	14,03	14,78	14,82	14,55	13,13	13,82	14,78	13,91	12,33	13,99	13,00	13,11
2	1	-1	0	17,32	17,97	18,17	17,82	15,42	16,20	16,08	15,90	14,02	14,81	14,90	14,58
3	-1	1	0	14,03	15,00	15,01	14,68	13,13	13,79	14,09	13,67	12,33	13,19	14,09	13,21
4	-1	-1	0	17,32	18,10	18,17	17,86	15,42	16,38	15,98	15,93	14,02	15,77	14,68	14,82
5	0	0	0	15,68	17,24	17,46	16,79	14,28	14,84	15,03	14,71	13,18	13,93	13,97	13,69
6	1	0	1	10,78	12,46	12,67	11,97	9,88	11,53	10,44	10,62	9,58	10,34	10,35	10,09
7	1	0	-1	25,12	26,90	26,88	26,30	23,22	25,07	24,79	24,36	21,32	23,01	23,17	22,50
8	-1	0	1	12,49	14,27	14,36	13,70	11,59	12,24	12,36	12,06	11,29	12,04	12,87	12,06
9	-1	0	-1	23,41	25,00	25,26	24,56	21,51	23,48	22,26	22,42	19,61	20,20	20,19	20,00
10	0	0	0	15,68	17,36	17,27	16,77	14,28	16,05	15,04	15,12	13,18	13,73	13,77	13,56
11	0	1	1	11,40	13,29	11,97	12,22	10,60	12,56	11,55	11,57	10,70	12,55	11,38	11,55
12	0	1	-1	21,21	23,16	22,87	22,41	20,21	20,90	20,86	20,66	18,51	20,19	19,46	19,39
13	0	-1	1	11,87	13,44	12,62	12,64	10,87	11,62	11,45	11,31	10,17	10,92	10,94	10,67
14	0	-1	-1	27,32	27,89	28,89	28,03	24,52	25,51	25,27	25,10	22,42	23,98	22,99	23,13
15	0	0	0	15,68	17,35	16,33	16,45	14,28	16,14	15,23	15,21	13,18	14,73	14,04	13,98

Таблиця Р.3 – Зведені дані експериментальних досліджень за потужністю
Р, кВт

№	x ₁	x ₂	x ₃	Пробивні решета				Пруткові решета				Точні решета			
				1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.	1	3	3	Сер.
1	1	1	0	0,27	0,28	0,30	0,28	0,35	0,36	0,37	0,34	0,37	0,36	0,36	0,34
2	1	-1	0	0,27	0,30	0,29	0,29	0,35	0,38	0,36	0,34	0,38	0,37	0,37	0,34
3	-1	1	0	0,21	0,22	0,23	0,22	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30	0,28	0,27
4	-1	-1	0	0,21	0,23	0,24	0,23	0,24	0,28	0,26	0,27	0,31	0,28	0,28	0,27
5	0	0	0	0,24	0,26	0,26	0,25	0,30	0,31	0,32	0,30	0,32	0,33	0,32	0,30
6	1	0	1	0,30	0,33	0,33	0,32	0,36	0,37	0,39	0,36	0,38	0,37	0,37	0,36
7	1	0	-1	0,24	0,27	0,27	0,26	0,34	0,36	0,36	0,32	0,34	0,33	0,33	0,32
8	-1	0	1	0,24	0,26	0,27	0,26	0,25	0,29	0,26	0,29	0,30	0,30	0,29	0,29
9	-1	0	-1	0,18	0,21	0,20	0,20	0,23	0,27	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26	0,25
10	0	0	0	0,24	0,26	0,26	0,25	0,30	0,31	0,31	0,30	0,32	0,32	0,32	0,30
11	0	1	1	0,27	0,31	0,30	0,29	0,31	0,32	0,33	0,32	0,34	0,34	0,34	0,32
12	0	1	-1	0,21	0,23	0,24	0,23	0,28	0,30	0,29	0,29	0,30	0,32	0,30	0,29
13	0	-1	1	0,27	0,31	0,28	0,29	0,31	0,34	0,33	0,32	0,36	0,35	0,35	0,32
14	0	-1	-1	0,21	0,24	0,22	0,22	0,28	0,31	0,29	0,29	0,32	0,30	0,30	0,29
15	0	0	0	0,24	0,26	0,25	0,25	0,30	0,31	0,32	0,30	0,32	0,31	0,31	0,30

Таблиця Р.4 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами

№ досліду	Пробивні														
	Повторність №1				Повторність №2				Повторність №3						
	Прохід		Схід		θ, %	Прохід		Схід		θ, %	Прохід		Схід		
	3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %	
1	3,09	96,91	89,05	10,95	14,03	2,96	97,04	88,17	11,83	14,78	3,26	96,74	88,44	11,56	14,82
2	3,81	96,19	86,49	13,51	17,32	3,59	96,41	85,62	14,38	17,97	4,00	96,00	85,83	14,17	18,17
3	2,25	97,75	88,21	11,79	14,03	1,80	98,20	86,80	13,20	15,00	2,40	97,60	87,39	12,61	15,01
4	4,16	95,84	86,84	13,16	17,32	5,07	94,93	86,97	13,03	18,10	4,36	95,64	86,19	13,81	18,17
5	3,14	96,86	87,46	12,54	15,68	4,14	95,86	86,90	13,10	17,24	3,49	96,51	86,03	13,97	17,46
6	2,16	97,84	91,38	8,62	10,78	2,49	97,51	90,03	9,97	12,46	2,53	97,47	89,86	10,14	12,67
7	6,03	93,97	80,91	19,09	25,12	7,53	92,47	80,64	19,36	26,90	6,45	93,55	79,57	20,43	26,88
8	3,00	97,00	90,51	9,49	12,49	3,42	96,58	89,16	10,84	14,27	3,45	96,55	89,09	10,91	14,36
9	4,68	95,32	81,27	18,73	23,41	4,00	96,00	79,00	21,00	25,00	5,05	94,95	79,79	20,21	25,26
10	3,14	96,86	87,46	12,54	15,68	3,47	96,53	86,11	13,89	17,36	3,45	96,55	86,19	13,81	17,27
11	3,19	96,81	91,79	8,21	11,40	4,25	95,75	90,96	9,04	13,29	3,35	96,65	91,38	8,62	11,97
12	4,24	95,76	83,03	16,97	21,21	4,63	95,37	81,47	18,53	23,16	4,57	95,43	81,70	18,30	22,87
13	3,08	96,92	91,22	8,78	11,87	3,76	96,24	90,33	9,67	13,44	3,28	96,72	90,66	9,34	12,62
14	5,46	94,54	78,15	21,85	27,32	4,46	95,54	76,57	23,43	27,89	5,78	94,22	76,89	23,11	28,89
15	3,76	96,24	88,08	11,92	15,68	4,16	95,84	86,82	13,18	17,35	3,92	96,08	87,59	12,41	16,33

№ досліду	Пруткові														
	Повторність № 1				Повторність № 2				Повторність № 3						
	Прохід		θ, %	Схід		Прохід		θ, %	Схід		Прохід		θ, %		
	3,6+, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %			
1	3,15	96,85	90,02	9,98	13,13	4,42	95,58	90,60	9,40	13,82	3,55	96,45	88,76	11,24	14,78
2	3,70	96,30	88,28	11,72	15,42	5,18	94,82	88,98	11,02	16,20	3,86	96,14	87,78	12,22	16,08
3	3,42	96,58	90,28	9,72	13,13	4,41	95,59	90,62	9,38	13,79	3,66	96,34	89,57	10,43	14,09
4	3,08	96,92	87,66	12,34	15,42	3,28	96,72	86,90	13,10	16,38	3,20	96,80	87,22	12,78	15,98
5	3,43	96,57	89,15	10,85	14,28	3,56	96,44	88,72	11,28	14,84	3,61	96,39	88,58	11,42	15,03
6	2,37	97,63	92,49	7,51	9,88	3,23	96,77	91,70	8,30	11,53	2,51	97,49	92,06	7,94	10,44
7	5,57	94,43	82,36	17,64	23,22	7,02	92,98	81,95	18,05	25,07	5,95	94,05	81,16	18,84	24,79
8	2,32	97,68	90,73	9,27	11,59	1,96	98,04	89,72	10,28	12,24	2,47	97,53	90,12	9,88	12,36
9	3,01	96,99	81,50	18,50	21,51	2,82	97,18	79,34	20,66	23,48	3,12	96,88	80,86	19,14	22,26
10	3,14	96,86	88,86	11,14	14,28	3,85	96,15	87,80	12,20	16,05	3,31	96,69	88,27	11,73	15,04
11	2,76	97,24	92,15	7,85	10,60	4,02	95,98	91,46	8,54	12,56	3,00	97,00	91,45	8,55	11,55
12	4,04	95,96	83,83	16,17	20,21	4,18	95,82	83,28	16,72	20,90	4,17	95,83	83,31	16,69	20,86
13	1,52	98,48	90,66	9,34	10,87	1,39	98,61	89,78	10,22	11,62	1,60	98,40	90,16	9,84	11,45
14	4,90	95,10	80,39	19,61	24,52	4,08	95,92	78,57	21,43	25,51	5,05	94,95	79,79	20,21	25,27
15	3,71	96,29	89,43	10,57	14,28	5,16	94,84	89,03	10,97	16,14	3,96	96,04	88,73	11,27	15,23

Лазерні																		
№ досліду	Повторність № 1						Повторність № 2						Повторність № 3					
	Прохід			θ, %	Схід			Прохід			θ, %	Схід			Прохід			θ, %
	3,6+, %	3,6-, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %	3,6-, %		3,6+, %	3,6+, %	3,6-, %	3,6+, %	3,6-, %	3,6-, %	
	2,47	97,53	90,13	9,87	12,33	2,24	97,76	88,24	11,76	13,99	2,60	97,40	89,60	10,40	13,00			
2	2,80	97,20	88,78	11,22	14,02	2,96	97,04	88,15	11,85	14,81	2,98	97,02	88,08	11,92	14,90			
3	2,47	97,53	90,13	9,87	12,33	2,64	97,36	89,44	10,56	13,19	2,82	97,18	88,72	11,28	14,09			
4	1,96	98,04	87,94	12,06	14,02	1,89	98,11	86,12	13,88	15,77	2,06	97,94	87,37	12,63	14,68			
5	2,90	97,10	89,72	10,28	13,18	3,34	96,66	89,41	10,59	13,93	3,07	96,93	89,11	10,89	13,97			
6	2,11	97,89	92,53	7,47	9,58	2,48	97,52	92,14	7,86	10,34	2,28	97,72	91,93	8,07	10,35			
7	5,12	94,88	83,80	16,20	21,32	5,52	94,48	82,52	17,48	23,01	5,56	94,44	82,39	17,61	23,17			
8	2,93	97,07	91,65	8,35	11,29	3,37	96,63	91,33	8,67	12,04	3,35	96,65	90,48	9,52	12,87			
9	5,49	94,51	85,88	14,12	19,61	6,46	93,54	86,26	13,74	20,20	5,65	94,35	85,46	14,54	20,19			
10	2,90	97,10	89,72	10,28	13,18	3,84	96,16	90,12	9,88	13,73	3,03	96,97	89,26	10,74	13,77			
11	1,93	98,07	91,22	8,78	10,70	2,01	97,99	89,46	10,54	12,55	2,05	97,95	90,67	9,33	11,38			
12	2,59	97,41	84,08	15,92	18,51	2,42	97,58	82,23	17,77	20,19	2,72	97,28	83,27	16,73	19,46			
13	2,44	97,56	92,27	7,73	10,17	3,49	96,51	92,58	7,42	10,92	2,62	97,38	91,69	8,31	10,94			
14	4,48	95,52	82,07	17,93	22,42	4,80	95,20	80,82	19,18	23,98	4,60	95,40	81,61	18,39	22,99			
15	3,16	96,84	89,98	10,02	13,18	4,71	95,29	89,99	10,01	14,73	3,37	96,63	89,33	10,67	14,04			

Додаток С

**Експериментальні дослідження процесу сепарації насіннєвого матеріалу
соняшнику за об'ємною масою**

Таблиця С.1 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	δ, %				q, кг/год				P, кВт			
						1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	1	1	0	0	0	62,4	66,6	70,6	66,6	1443	1367	1428	1413	2,34	2,57	2,66	2,53
2	1	-1	0	0	0	77,9	54,0	82,5	71,5	862	674	827	788	2,76	2,90	3,17	2,94
3	-1	1	0	0	0	66,0	62,9	70,2	66,4	602	414	589	535	1,70	1,82	1,91	1,81
4	-1	-1	0	0	0	77,1	74,0	81,3	77,5	414	226	401	347	2,20	2,32	2,41	2,31
5	0	0	1	1	0	61,3	47,8	65,7	58,2	997	809	973	926	2,14	2,27	2,45	2,29
6	0	0	1	-1	0	80,6	84,8	88,8	84,8	1167	1091	1152	1136	1,91	2,14	2,23	2,09
7	0	0	-1	1	0	62,6	77,2	70,6	70,1	935	859	931	908	2,72	2,94	2,94	2,87
8	0	0	-1	-1	0	80,8	67,3	85,2	77,7	914	726	890	843	2,33	2,46	2,64	2,47
9	0	1	0	0	1	63,1	77,7	71,1	70,6	1170	1195	1166	1177	2,27	2,49	2,49	2,42
10	0	1	0	0	-1	49,5	46,4	53,7	49,9	864	575	851	763	1,77	1,89	1,98	1,88
11	0	-1	0	0	1	74,8	50,9	79,4	68,4	808	721	773	767	2,69	2,83	3,10	2,87
12	0	-1	0	0	-1	61,5	55,3	69,9	62,3	591	414	565	524	2,36	2,60	2,78	2,58
13	1	0	1	0	0	66,7	42,8	71,3	60,3	1388	1200	1353	1314	2,26	2,40	2,67	2,44
14	1	0	-1	0	0	67,6	43,7	72,2	61,2	1236	1048	1201	1162	2,76	2,90	3,17	2,94
15	-1	0	1	0	0	65,9	62,8	70,1	66,3	788	600	775	721	1,70	1,82	1,91	1,81
16	-1	0	-1	0	0	63,6	57,4	72,0	64,4	759	683	733	725	2,29	2,53	2,71	2,51
17	0	0	0	1	1	66,9	60,7	75,3	67,6	1102	1127	1076	1102	2,68	2,92	3,10	2,90
18	0	0	0	1	-1	53,5	47,3	61,9	54,2	963	786	937	895	2,26	2,50	2,68	2,48
19	0	0	0	-1	1	85,4	79,2	93,8	86,2	1293	1318	1267	1293	2,37	2,61	2,79	2,59
20	0	0	0	-1	-1	71,2	85,8	79,2	78,8	888	711	884	828	1,95	2,17	2,17	2,10
21	0	0	0	0	0	74,6	50,7	79,2	68,1	1023	835	988	949	2,23	2,37	2,64	2,42
22	0	0	0	0	0	70,6	64,4	79,0	71,3	1124	1048	1098	1090	2,32	2,56	2,74	2,54
23	0	0	0	0	0	70,2	74,4	78,4	74,3	1113	1037	1098	1083	2,32	2,55	2,64	2,50
24	0	1	1	0	0	60,3	36,4	64,9	53,9	1065	877	1030	990	1,73	1,87	2,14	1,92
25	0	1	-1	0	0	58,6	34,7	63,2	52,1	913	725	878	838	2,23	2,37	2,64	2,42
26	0	-1	1	0	0	68,3	54,8	72,7	65,3	714	526	690	644	2,23	2,36	2,54	2,38
27	0	-1	-1	0	0	72,0	58,5	76,4	68,9	562	374	538	492	2,73	2,86	3,04	2,88
28	1	0	0	1	0	71,5	58,0	75,9	68,5	1237	1049	1213	1166	2,67	2,80	2,98	2,81
29	1	0	0	-1	0	89,7	86,6	93,9	90,0	1240	1052	1227	1173	2,35	2,47	2,56	2,46
30	-1	0	0	1	0	71,9	48,0	76,5	65,5	615	427	580	541	2,11	2,25	2,52	2,29
31	-1	0	0	-1	0	89,7	86,6	93,9	90,0	717	529	704	650	1,80	1,92	2,01	1,91
32	0	0	1	0	1	55,4	41,9	59,8	52,4	1219	1132	1195	1182	2,19	2,32	2,50	2,34
33	0	0	1	0	-1	61,8	48,3	66,2	58,7	957	668	933	853	1,77	1,90	2,08	1,92
34	0	0	-1	0	1	71,7	86,3	79,7	79,2	1157	1182	1153	1164	2,77	2,99	2,99	2,92
35	0	0	-1	0	-1	38,9	43,1	47,1	43,1	906	729	891	842	2,36	2,59	2,68	2,54

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	δ, %				q, кг/год				P, кВт			
						1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
36	1	0	0	0	1	68,7	83,3	76,7	76,3	1522	1547	1518	1529	2,80	3,02	3,02	2,95
37	1	0	0	0	-1	55,3	69,9	63,3	62,8	1260	1083	1256	1200	2,39	2,61	2,61	2,53
38	-1	0	0	0	1	73,1	59,6	77,5	70,1	854	767	830	817	2,16	2,29	2,47	2,31
39	-1	0	0	0	-1	56,1	49,9	64,5	56,8	705	528	679	637	1,83	2,07	2,25	2,05
40	0	1	0	1	0	65,6	41,7	70,2	59,2	897	709	862	823	2,14	2,28	2,55	2,32
41	0	1	0	-1	0	77,3	71,1	85,7	78,0	1067	991	1041	1033	1,91	2,15	2,33	2,13
42	0	-1	0	1	0	69,8	63,6	78,2	70,6	659	583	633	625	2,72	2,96	3,14	2,94
43	0	-1	0	-1	0	91,3	85,1	99,7	92,0	728	652	702	694	2,41	2,65	2,83	2,63
44	0	0	0	0	0	70,2	74,4	78,4	74,3	1113	1037	1098	1083	2,32	2,55	2,64	2,50
45	0	0	0	0	0	69,8	84,4	77,8	77,3	1102	1026	1098	1076	2,32	2,54	2,54	2,46

Таблиця С.2 – Вихідні дані результатів експериментальних досліджень

№ досліду	Забірник	Повторність 1				Повторність 2				Повторність 3			
		Ц, %	В, %	Г, %	%	Ц, %	В, %	Г, %	%	Ц, %	В, %	Г, %	%
1	Ш	67,8	31,0	1,2	28,9	79,2	20,1	0,7	24,6	83,6	14,3	2,1	23,4
	П	0,0	90,6	9,4	55,7	0,0	80,4	19,6	67,3	0,0	87,4	12,6	63,3
	І	0,0	4,2	95,8	15,4	0,0	2,5	97,5	8,1	0,0	5,3	94,7	13,3
2	Ш	86,9	13,1	0,0	22,8	100,0	0,0	0,0	17,3	91,8	7,7	0,4	21,6
	П	0,0	95,8	4,2	58,8	5,7	91,6	2,7	61,3	0,0	91,8	8,2	62,9
	І	0,0	4,0	96,0	18,5	0,0	14,2	85,8	21,4	0,0	2,4	97,6	15,5
3	Ш	55,8	43,7	0,5	34,4	97,9	2,1	0,0	20,1	97,1	2,4	0,5	20,2
	П	0,0	82,7	17,3	54,1	0,0	94,9	5,1	61,6	0,2	94,9	4,9	61,3
	І	0,0	2,0	98,0	11,4	0,0	3,3	96,7	18,3	0,0	5,5	94,5	18,5
4	Ш	85,0	12,5	2,5	23,1	67,6	31,3	1,2	28,9	91,6	8,1	0,4	21,6
	П	0,0	84,7	15,3	66,7	0,0	90,6	9,4	55,6	0,0	84,2	15,8	68,5
	І	0,0	0,0	100,0	10,2	0,0	4,2	95,8	15,4	0,0	1,4	98,6	9,9
5	Ш	97,9	2,1	0,0	20,1	99,4	0,6	0,0	18,3	65,0	34,7	0,4	29,5
	П	0,0	94,8	5,2	61,6	2,7	89,2	8,1	63,7	0,0	85,5	14,5	57,8
	І	0,0	3,4	96,6	18,3	1,0	6,6	92,4	17,9	0,0	1,1	98,9	12,7
6	Ш	91,5	8,1	0,4	21,6	92,3	7,1	0,6	21,5	99,6	0,4	0,0	20,0
	П	0,0	84,1	15,9	68,5	0,0	89,6	10,4	64,8	0,0	96,8	3,2	61,2
	І	0,0	1,4	98,6	9,8	0,0	1,1	98,9	13,7	0,0	3,1	96,9	18,7
7	Ш	56,8	41,2	2,0	33,4	85,0	12,5	2,5	23,1	98,8	1,2	0,0	20,1
	П	0,0	86,2	13,8	53,1	0,0	84,7	15,3	66,7	0,0	99,4	0,6	58,9
	І	0,0	5,3	94,7	13,5	0,0	0,0	100,0	10,2	0,0	6,2	93,8	20,9
8	Ш	95,6	4,4	0,0	20,7	98,9	1,1	0,0	20,1	94,5	4,7	0,8	21,0
	П	0,0	92,4	7,6	62,4	0,0	100,0	0,0	59,0	0,0	91,4	8,6	63,5
	І	0,0	6,7	93,3	16,9	0,0	4,4	95,6	20,9	0,0	4,8	95,2	15,4
9	Ш	100,0	0,0	0,0	19,5	86,2	13,8	0,0	22,9	100,0	0,0	0,0	19,8

	II	0,5	98,9	0,6	56,2	0,0	94,4	5,6	59,8	0,0	99,7	0,3	57,4
	I	0,0	20,2	79,8	24,3	0,0	1,6	98,4	17,3	0,0	13,3	86,7	22,7
10	III	95,9	4,1	0,0	20,5	99,3	0,7	0,0	19,1	97,6	2,4	0,0	20,0
	II	0,0	98,5	1,5	58,2	1,4	98,6	0,0	56,0	0,0	94,1	5,9	61,7
	I	0,0	10,1	89,9	21,3	0,0	22,3	77,7	24,9	0,0	3,9	96,1	18,3
11	III	99,5	0,5	0,0	20,0	43,2	56,2	0,6	41,5	94,1	5,5	0,5	21,1
	II	0,0	99,0	1,0	58,4	0,0	75,6	24,4	49,1	0,0	93,2	6,8	62,2
	I	0,0	10,3	89,7	21,6	0,0	1,4	98,6	9,4	0,0	3,3	96,7	16,7
12	III	97,8	2,2	0,0	19,0	100,0	0,0	0,0	19,5	88,9	11,1	0,0	21,9
	II	2,0	91,2	6,8	61,6	0,0	97,0	3,0	58,4	0,0	87,4	12,6	64,1
	I	0,0	13,9	86,1	19,4	0,0	16,0	84,0	22,1	0,0	5,5	94,5	14,0
13	III	84,3	15,3	0,4	23,3	69,1	30,0	0,9	26,0	71,5	28,5	0,0	27,4
	II	0,0	96,1	3,9	58,1	0,0	81,3	18,7	61,7	0,0	96,7	3,3	54,1
	I	0,0	3,6	96,4	18,6	0,0	0,0	100,0	12,3	0,0	2,2	97,8	18,5
14	III	58,7	39,4	2,0	32,8	87,5	11,6	0,8	21,4	79,1	20,2	0,7	24,7
	II	0,0	87,1	12,9	53,5	0,0	85,8	14,2	63,7	0,0	80,3	19,7	67,3
	I	0,0	5,0	95,0	13,7	0,0	3,6	96,4	14,9	0,0	2,5	97,5	8,1
15	III	95,3	4,7	0,0	20,6	46,2	53,8	0,0	41,0	91,4	8,6	0,0	21,6
	II	0,0	92,0	8,0	62,7	0,0	95,3	4,7	41,4	0,0	96,0	4,0	59,0
	I	0,0	3,4	96,6	16,7	0,0	0,7	99,3	17,5	0,0	7,4	92,6	19,4
16	III	93,8	6,2	0,0	21,2	97,1	2,9	0,0	20,5	88,8	11,2	0,0	22,1
	II	0,0	100,0	0,0	58,8	0,0	100,0	0,0	58,9	0,0	88,2	11,8	64,0
	I	0,0	0,3	99,7	20,0	0,0	3,3	96,7	20,6	0,0	2,1	97,9	14,0
17	III	85,8	14,2	0,0	22,6	89,0	10,5	0,5	21,3	85,5	14,1	0,4	22,9
	II	0,0	88,3	11,7	63,3	0,0	79,9	20,1	69,2	0,0	86,2	13,8	65,0
	I	0,0	0,5	99,5	14,1	0,0	1,9	98,1	9,5	0,0	0,9	99,1	12,1
18	III	60,1	39,4	0,4	30,5	86,5	12,8	0,7	21,7	98,5	1,5	0,0	18,5
	II	0,0	82,8	17,2	57,2	0,0	86,4	13,6	63,3	2,8	88,8	8,4	64,7
	I	0,0	1,3	98,7	12,2	0,0	4,2	95,8	15,0	0,0	6,0	94,0	16,9
19	III	70,6	28,3	1,1	28,3	99,5	0,5	0,0	20,0	100,0	0,0	0,0	17,9
	II	0,0	91,7	8,3	56,1	0,0	96,4	3,6	61,3	3,4	95,0	1,6	61,3
	I	0,0	3,7	96,3	15,7	0,0	3,4	96,6	18,7	0,0	8,7	91,3	20,8
20	III	91,0	8,3	0,7	21,5	99,2	0,8	0,0	20,0	98,5	1,5	0,0	20,1
	II	0,0	87,9	12,1	65,0	0,0	100,0	0,0	53,2	0,0	88,8	11,2	65,9
	I	0,0	1,3	98,7	13,5	0,0	25,8	74,2	26,8	0,0	4,4	95,6	14,1
21	III	75,1	24,3	0,6	26,1	91,4	8,6	0,0	20,9	95,1	4,9	0,0	21,0
	II	0,0	84,2	15,8	63,2	0,0	100,0	0,0	51,8	0,0	100,0	0,0	59,0
	I	0,0	0,0	100,0	10,7	0,0	30,1	69,9	27,3	0,0	0,0	100,0	20,0
22	III	91,7	8,3	0,0	21,4	84,6	15,4	0,0	23,1	94,6	5,4	0,0	20,9
	II	0,0	91,5	8,5	62,5	0,0	94,9	5,1	58,5	0,0	92,4	7,6	62,9
	I	0,0	2,6	97,4	16,1	0,0	4,8	95,2	18,4	0,0	2,3	97,7	16,2
23	III	57,3	42,2	0,5	34,0	91,7	8,3	0,0	21,5	85,2	12,3	2,5	23,1
	II	0,0	83,6	16,4	54,4	0,0	95,3	4,7	60,4	0,0	84,9	15,1	66,7
	I	0,0	1,9	98,1	11,6	0,0	2,7	97,3	18,1	0,0	0,0	100,0	10,2
24	III	96,7	3,3	0,0	20,4	99,2	0,8	0,0	17,9	68,2	31,2	0,6	28,2
	II	0,0	98,5	1,5	58,5	3,4	86,3	10,3	64,2	0,0	92,2	7,8	55,3
	I	0,0	8,9	91,1	21,1	1,2	8,5	90,3	17,9	0,0	3,2	96,8	16,5

25	III	92,1	7,3	0,6	21,0	34,0	65,3	0,7	45,1	96,8	2,7	0,5	20,2
	II	0,0	91,0	9,0	62,4	0,0	67,7	32,3	46,8	0,2	94,3	5,4	61,3
	I	0,0	4,4	95,6	16,5	0,0	2,1	97,9	8,1	0,0	6,1	93,9	18,5
26	III	99,5	0,5	0,0	19,9	97,7	2,3	0,0	20,1	99,5	0,5	0,0	19,5
	II	0,0	98,9	1,1	58,3	0,0	94,2	5,8	61,7	0,9	99,1	0,0	57,1
	I	0,0	11,1	88,9	21,8	0,0	3,8	96,2	18,3	0,0	15,4	84,6	23,4
27	III	97,1	2,9	0,0	20,4	100,0	0,0	0,0	19,7	86,0	14,0	0,0	22,9
	II	0,0	99,0	1,0	58,6	0,0	99,7	0,3	57,1	0,0	94,3	5,7	59,8
	I	0,0	7,2	92,8	20,9	0,0	15,8	84,2	23,2	0,0	1,6	98,4	17,2
28	III	100,0	0,0	0,0	19,6	92,1	6,7	1,2	20,9	99,0	1,0	0,0	20,1
	II	0,4	99,1	0,5	56,5	0,0	87,8	12,2	63,9	0,0	100,0	0,0	59,1
	I	0,0	18,2	81,8	23,9	0,0	6,9	93,1	15,3	0,0	3,9	96,1	20,8
29	III	96,0	4,0	0,0	20,8	99,0	1,0	0,0	20,2	86,7	11,7	1,7	23,2
	II	0,0	93,1	6,9	62,4	0,0	99,5	0,5	59,1	0,0	89,8	10,2	63,3
	I	0,0	6,1	93,9	16,9	0,0	5,1	94,9	20,8	0,0	4,2	95,8	13,5
30	III	98,1	1,9	0,0	19,2	100,0	0,0	0,0	19,4	89,8	10,2	0,0	21,9
	II	1,8	92,3	5,9	61,6	0,0	96,6	3,4	58,2	0,0	88,3	11,7	64,0
	I	0,0	12,2	87,8	19,2	0,0	18,0	82,0	22,4	0,0	5,0	95,0	14,1
31	III	87,8	11,9	0,3	22,7	81,9	17,6	0,5	24,3	76,7	23,3	0,0	26,1
	II	0,0	97,1	2,9	58,5	0,0	89,8	10,2	62,0	0,0	97,4	2,6	55,0
	I	0,0	2,7	97,3	18,8	0,0	0,0	100,0	13,7	0,0	1,7	98,3	18,9
32	III	53,8	44,0	2,2	34,2	87,1	12,1	0,8	21,4	75,8	23,4	0,8	24,8
	II	0,0	84,7	15,3	52,5	0,0	85,3	14,7	63,8	0,0	77,1	22,9	67,4
	I	0,0	6,0	94,0	13,2	0,0	3,8	96,2	14,9	0,0	3,0	97,0	7,8
33	III	95,0	5,0	0,0	20,5	39,7	60,3	0,0	44,5	90,9	9,1	0,0	21,6
	II	0,0	91,5	8,5	62,8	0,0	93,9	6,1	39,1	0,0	95,8	4,2	59,0
	I	0,0	3,6	96,4	16,7	0,0	0,9	99,1	16,4	0,0	7,8	92,2	19,4
34	III	94,5	5,5	0,0	21,1	98,1	1,9	0,0	20,4	89,8	10,2	0,0	22,0
	II	0,0	100,0	0,0	58,9	0,0	100,0	0,0	59,2	0,0	89,2	10,8	63,9
	I	0,0	0,3	99,7	20,0	0,0	2,2	97,8	20,4	0,0	1,9	98,1	14,1
35	III	77,9	22,1	0,0	23,1	85,2	14,1	0,7	20,9	78,7	20,6	0,6	23,2
	II	0,0	81,5	18,5	63,7	0,0	73,9	26,1	70,2	0,0	79,7	20,3	65,5
	I	0,0	0,9	99,1	13,2	0,0	2,6	97,4	9,0	0,0	1,4	98,6	11,3
36	III	66,0	33,6	0,4	29,3	91,9	7,7	0,4	21,6	98,8	1,2	0,0	18,7
	II	0,0	86,1	13,9	57,9	0,0	91,8	8,2	62,8	2,3	90,8	6,9	64,3
	I	0,0	1,0	99,0	12,8	0,0	2,4	97,6	15,6	0,0	4,9	95,1	17,0
37	III	60,9	37,7	1,4	30,5	99,4	0,6	0,0	19,9	100,0	0,0	0,0	17,5
	II	0,0	87,8	12,2	54,6	0,0	95,9	4,1	61,3	4,9	92,7	2,4	61,3
	I	0,0	5,5	94,5	14,9	0,0	3,8	96,2	18,7	0,0	12,3	87,7	21,2
38	III	91,2	8,1	0,7	21,5	98,9	1,1	0,0	19,5	98,5	1,5	0,0	20,0
	II	0,0	88,2	11,8	65,0	0,0	100,0	0,0	51,5	0,0	88,6	11,4	65,9
	I	0,0	1,2	98,8	13,5	0,0	33,4	66,6	29,0	0,0	4,4	95,6	14,0
39	III	69,4	29,8	0,7	26,8	91,3	8,7	0,0	20,9	94,0	6,0	0,0	21,2
	II	0,0	80,0	20,0	63,1	0,0	100,0	0,0	51,8	0,0	100,0	0,0	58,9
	I	0,0	0,0	100,0	10,1	0,0	30,4	69,6	27,3	0,0	0,0	100,0	19,9
40	III	91,1	8,9	0,0	21,4	78,1	21,9	0,0	24,0	93,9	6,1	0,0	20,9
	II	0,0	91,0	9,0	62,5	0,0	92,4	7,6	57,8	0,0	91,6	8,4	63,0

	I	0,0	2,8	97,2	16,0	0,0	7,2	92,8	18,1	0,0	2,6	97,4	16,1
41	III	75,1	24,9	0,0	57,4	74,2	25,2	0,6	26,2	70,8	28,9	0,3	28,3
	II	0,0	100,0	0,0	27,3	0,0	83,5	16,5	63,2	0,0	88,5	11,5	58,4
	I	0,0	9,5	90,5	15,3	0,0	0,0	100,0	10,6	0,0	0,8	99,2	13,3
42	III	100,0	0,0	0,0	19,8	76,9	22,3	0,8	24,7	95,5	4,5	0,0	20,7
	II	0,0	97,6	2,4	58,7	0,0	78,2	21,8	67,4	0,0	92,1	7,9	62,4
	I	0,0	13,1	86,9	21,6	0,0	2,8	97,2	7,9	0,0	7,0	93,0	16,9
43	III	92,5	7,1	0,4	21,6	92,7	7,3	0,0	21,5	96,0	4,0	0,0	20,8
	II	0,0	92,5	7,5	62,8	0,0	95,8	4,2	60,4	0,0	100,0	0,0	59,2
	I	0,0	2,2	97,8	15,6	0,0	2,4	97,6	18,1	0,0	0,0	100,0	20,0
44	III	90,4	9,2	0,4	21,5	92,0	8,0	0,0	21,4	92,1	7,9	0,0	21,5
	II	0,0	82,1	17,9	68,8	0,0	91,9	8,1	62,5	0,0	95,5	4,5	60,4
	I	0,0	1,6	98,4	9,7	0,0	2,5	97,5	16,1	0,0	2,6	97,4	18,1
45	III	93,9	6,1	0,0	20,9	99,6	0,4	0,0	19,0	86,9	13,1	0,0	22,8
	II	0,0	91,5	8,5	63,0	1,6	93,6	4,8	63,0	0,0	95,7	4,3	58,8
	I	0,0	2,6	97,4	16,1	0,6	3,9	95,6	18,0	0,0	4,0	96,0	18,5

В – виповнені; П – неповністю виповнені, пусті і органічні (рослинні) домішки; Г – голе ядро і уражене грибковими хворобами; % – відсоток виходу насіння у відповідному забірнику

Додаток Т

**Експериментальні дослідження процесу сепарації насіннєвого матеріалу
соняшнику за забарвленням**

Таблиця Т.1 – Результати досліджень процесу роботи блока подачі насіння
фотоелектронного сепаратора

№	Закодовані фактори			Розкодовані фактори			Середній інтервал часу між падаючим насінням t, с			Продуктивність блока подачі насіння q, кг/год			Споживана потужність P, кВт		
	x ₁	x ₂	x ₃	Q, кг/год	ψ, с ⁻¹	n, об/хв	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	0	150	10	10	0,058	0,065	0,058	156,9	154,9	152,9	289	277	276
2	1	-1	0	150	5	10	0,132	0,126	0,132	28,5	20,5	38,5	262	252	275
3	-1	1	0	30	10	10	0,075	0,083	0,074	46,1	48,1	44,1	196	179	186
4	-1	-1	0	30	5	10	0,181	0,181	0,180	23,0	23,0	15,0	147	142	171
5	0	0	0	90	7,5	10	0,076	0,077	0,074	73,4	71,4	71,4	206	212	233
6	1	0	1	150	7,5	15	0,091	0,082	0,086	72,9	64,9	74,9	320	304	320
7	1	0	-1	150	7,5	5	0,071	0,078	0,079	83,3	71,3	67,3	245	235	235
8	-1	0	1	30	7,5	15	0,120	0,118	0,116	11,1	25,1	15,1	230	223	212
9	-1	0	-1	30	7,5	5	0,117	0,112	0,116	14,7	2,7	10,7	149	148	140
10	0	0	0	90	7,5	10	0,074	0,077	0,072	81,4	85,4	69,4	208	215	231
11	0	1	1	90	10	15	0,038	0,047	0,045	138,4	134,4	120,4	279	293	280
12	0	1	-1	90	10	5	0,044	0,042	0,037	115,6	119,6	127,6	217	218	209
13	0	-1	1	90	5	15	0,135	0,132	0,139	53,8	51,8	35,8	269	235	261
14	0	-1	-1	90	5	5	0,125	0,121	0,123	38,7	56,7	52,7	159	150	156
15	0	0	0	90	7,5	10	0,069	0,073	0,077	79,4	83,4	67,4	229	225	245

Таблиця Т.2 – Результати досліджень процесу роботи блока виходу насіння
фотоелектронного сепаратора

№	t, с	N _n			P				
		1	2	3	1	2	3	Середнє	Відхилення
1	0,03	3580	3890	3633	0,358	0,389	0,363	0,370	0,016581
2	0,04	4469	4398	5102	0,447	0,440	0,510	0,466	0,038759
3	0,05	5883	5625	6001	0,588	0,563	0,600	0,584	0,019229
4	0,06	6188	6195	6214	0,619	0,620	0,621	0,620	0,001345
5	0,07	7020	7125	7060	0,702	0,713	0,706	0,707	0,005299
6	0,08	7465	6951	6910	0,747	0,695	0,691	0,711	0,030927
7	0,09	7400	7610	8123	0,740	0,761	0,812	0,771	0,037193

8	0,1	8084	8254	7613	0,808	0,825	0,761	0,798	0,033207
9	0,11	8370	8743	8233	0,837	0,874	0,823	0,845	0,026394
10	0,12	8636	8881	8798	0,864	0,888	0,880	0,877	0,01246
11	0,13	8648	8512	8461	0,865	0,851	0,846	0,854	0,009667
12	0,14	9170	9098	9225	0,917	0,910	0,923	0,916	0,006369
13	0,15	8492	9406	8457	0,849	0,941	0,846	0,879	0,053809
14	0,16	9255	8793	8797	0,926	0,879	0,880	0,895	0,026559
15	0,17	9035	9559	9124	0,904	0,956	0,912	0,924	0,028039
16	0,18	9572	8811	9157	0,957	0,881	0,916	0,918	0,038102
17	0,19	9013	9159	8857	0,901	0,916	0,886	0,901	0,015103
18	0,2	9107	8806	9645	0,911	0,881	0,965	0,919	0,042504

Таблиця Т.3 – Результати досліджень процесу роботи фотоелектронного сепаратора

№	Продуктивність q, кг/год				Потужність P, Вт				Сумарна концентрація насіння θ, %			
	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	147	141	144	144	303	271	284	286	27,2	25,9	27,3	26,8
2	28	26	27	27	272	223	276	257	53,7	52,7	53,5	53,3
3	53	49	51	51	239	186	184	203	12,3	10,6	11,3	11,4
4	24	20	19	21	169	119	174	154	99,1	98	98,7	98,6
5	74	68	71	71	312	259	254	275	65,6	63,9	64,6	64,7
6	70	68	69	69	297	243	276	272	60,1	58,7	59,1	59,3
7	67	60	65	64	206	153	211	190	71,6	70,5	70,6	70,9
8	74	68	68	70	213	170	205	196	54	52,6	52,7	53,1
9	127	122	129	126	284	233	224	247	42,1	40,9	41,5	41,5
10	124	119	118	120	268	222	233	241	59,7	58,4	59,5	59,2
11	58	54	59	57	226	174	236	212	54,2	52,6	53,7	53,5
12	58	53	60	57	249	195	192	212	71,7	70,5	71,4	71,2
13	73	71	72	72	364	299	318	327	15,9	14,6	15,1	15,2
14	71	65	71	69	267	223	233	241	12,8	11,5	12,6	12,3
15	22	18	17	19	264	199	212	225	42,7	41,5	41,8	42
16	17	10	12	13	175	131	132	146	40	38,9	39	39,3
17	73	67	70	70	242	196	234	224	67,3	66,4	66,7	66,8
18	73	68	75	72	243	189	246	226	85,4	83,9	84,2	84,5
19	80	73	75	76	244	202	244	230	57,9	56,6	57,1	57,2
20	73	66	71	70	249	195	228	224	75,7	74,4	74,6	74,9
21	77	69	73	73	243	188	250	227	14,5	13,3	13,3	13,7
22	81	73	77	77	267	207	219	231	14,1	13	14	13,7
23	75	71	76	74	247	190	247	228	14,3	12,9	13,9	13,7
24	126	123	126	125	313	267	275	285	42	40,9	41,6	41,5

№	Продуктивність q, кг/год				Потужність P, Вт				Сумарна концентрація насіння θ, %			
	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	116	111	118	115	244	193	217	218	44,1	43,1	43,3	43,5
26	46	43	43	44	283	240	254	259	58,6	56,9	57,6	57,7
27	53	46	51	50	183	150	165	166	47,8	46,9	47,2	47,3
28	80	74	77	77	317	264	259	280	60,1	58,8	59,6	59,5
29	80	77	77	78	315	265	263	281	65,1	63,9	64,5	64,5
30	25	21	20	22	205	147	191	181	29,7	28,4	29,5	29,2
31	22	16	19	19	192	152	190	178	95,5	94,4	94,5	94,8
32	73	68	75	72	292	259	277	276	12,4	10,8	11,6	11,6
33	77	73	75	75	305	250	282	279	29,8	28,7	29,4	29,3
34	72	65	70	69	214	178	193	195	18,6	17,2	17,6	17,8
35	71	63	67	67	231	153	192	192	36,3	34,7	35,5	35,5
36	77	74	77	76	318	262	257	279	12	10,9	11,3	11,4
37	78	72	78	76	295	250	292	279	29,5	28,7	29,1	29,1
38	20	17	20	19	214	139	181	178	42,2	41,1	41,8	41,7
39	26	18	22	22	199	147	200	182	60,2	58,9	59,1	59,4
40	125	118	120	121	267	216	240	241	95,4	93,8	94,6	94,6
41	123	117	120	120	258	207	258	241	29,8	28,5	29,9	29,4
42	55	51	53	53	247	193	184	208	17,8	16,5	17,9	17,4
43	52	47	54	51	233	191	194	206	107	106	106,4	106,6
44	80	74	74	76	269	204	217	230	15	13,4	13,9	14,1
45	75	71	73	73	254	200	227	227	15,1	13,4	14,4	14,3
46	73	68	66	69	238	187	244	223	14,7	13	14	13,9

Таблиця Т.4 – Статистична обробка рівняння (4.56)

Коефіцієнт	Значення	Стандартна похибка	t-критерій Стьюдента	P-значення
a ₀₀	13,9	6,04366	2,29993	0,0300781
a ₁₀	- 9,01875	3,70097	- 2,43686	0,0222724
a ₂₀	- 9,85625	3,70097	- 2,66315	0,0133467
a ₃₀	0,1	3,70097	0,0270199	0,978658
a ₄₀	- 3,2625	3,70097	- 0,881525	0,386431
a ₅₀	- 8,85	3,70097	- 2,39126	0,0246364
a ₁₂	15,175	7,40194	2,05014	0,0509766
a ₁₃	0,05	7,40194	0,00675498	0,994664
a ₁₄	15,15	7,40194	2,04676	0,0513316
a ₁₅	$7,10543 \cdot 10^{-15}$	7,40194	$9,59941 \cdot 10^{-16}$	1
a ₂₃	- 3,1	7,40194	- 0,418809	0,678932
a ₂₄	38,6	7,40194	5,21485	0,0000213971
a ₂₅	$8,32667 \cdot 10^{-15}$	7,40194	$1,12493 \cdot 10^{-15}$	1

Коефіцієнт	Значення	Стандартна похибка	t-критерій Стьюдента	P-значення
a ₃₄	- 3,1	7,40194	- 0,418809	0,678932
a ₃₅	- 1,06581 · 10 ⁻¹⁴	7,40194	- 1,43991 · 10 ⁻¹⁵	1
a ₄₅	2,4869 · 10 ⁻¹⁴	7,40194	3,35979 · 10 ⁻¹⁵	1
a ₁₁	9,22708	5,01114	1,84131	0,0774723
a ₂₂	22,9771	5,01114	4,5852	0,000109198
a ₃₃	5,26875	5,01114	1,05141	0,303129
a ₄₄	37,4687	5,01114	7,47709	7,87739 · 10 ⁻⁸
a ₅₅	13,9021	5,01114	2,77424	0,0103137

Таблиця Т.5 – Статистична обробка рівняння (4.60)

Коефіцієнт	Значення	Стандартна похибка	t-критерій Стьюдента	P-значення
a ₀₀	73,6667	1,10905	66,423	1,21725 · 10 ⁻²⁹
a ₁₀	27,0625	0,679154	39,8474	3,81256 · 10 ⁻²⁴
a ₂₀	35,1458	0,679154	51,7494	5,97945 · 10 ⁻²⁷
a ₃₀	1,875	0,679154	2,76079	0,0106429
a ₄₀	- 0,1875	0,679154	- 0,276079	0,784757
a ₅₀	0,354167	0,679154	0,521482	0,60662
a ₁₂	21,75	1,35831	16,0126	1,1883 · 10 ⁻¹⁴
a ₁₃	- 0,75	1,35831	- 0,552158	0,585743
a ₁₄	- 1,	1,35831	-0,73621	0,468455
a ₁₅	0,75	1,35831	0,552158	0,585743
a ₂₃	4,	1,35831	2,94484	0,00689108
a ₂₄	- 0,25	1,35831	- 0,184053	0,855457
a ₂₅	1,41667	1,35831	1,04296	0,306946
a ₃₄	2,	1,35831	1,47242	0,153386
a ₃₅	- 1,25	1,35831	- 0,920263	0,366231
a ₄₅	- 2,	1,35831	- 1,47242	0,153386
a ₁₁	- 25,7778	0,919579	- 28,0322	2,07842 · 10 ⁻²⁰
a ₂₂	14,	0,919579	15,2244	3,74853 · 10 ⁻¹⁴
a ₃₃	- 4,19444	0,919579	- 4,56127	0,000116189
a ₄₄	- 0,944444	0,919579	- 1,02704	0,314237
a ₅₅	0,833333	0,919579	0,906212	0,373475

Таблиця Т.6 – Статистична обробка рівняння (4.64)

Коефіцієнт	Значення	Стандартна похибка	t-критерій Стьюдента	P-значення
a ₀₀	227,667	1,14855	198,221	$1,74106 \cdot 10^{-41}$
a ₁₀	48,9375	0,70334	69,5787	$3,83746 \cdot 10^{-30}$
a ₂₀	18	0,70334	25,5922	$1,88091 \cdot 10^{-19}$
a ₃₀	40,875	0,70334	58,1155	$3,36525 \cdot 10^{-28}$
a ₄₀	-0,1875	0,70334	-0,266585	0,791975
a ₅₀	0,375	0,70334	0,53317	0,598624
a ₁₂	-5	1,40668	-3,55447	0,00153971
a ₁₃	1,75	1,40668	1,24406	0,225015
a ₁₄	-1	1,40668	-0,710893	0,48373
a ₁₅	1	1,40668	0,710893	0,48373
a ₂₃	-6,5	1,40668	-4,62081	0,0000995673
a ₂₄	-0,5	1,40668	-0,355447	0,725237
a ₂₅	1,5	1,40668	1,06634	0,29646
a ₃₄	2,25	1,40668	1,59951	0,12227
a ₃₅	-1,5	1,40668	-1,06634	0,29646
a ₄₅	-2	1,40668	-1,42179	0,167444
a ₁₁	1,08333	0,952327	1,13756	0,266088
a ₂₂	-2,33333	0,952327	-2,45014	0,0216243
a ₃₃	6,5	0,952327	6,82539	$3,73727 \cdot 10^{-7}$
a ₄₄	-0,916667	0,952327	-0,962554	0,34499
a ₅₅	1	0,952327	1,05006	0,303736

Таблиця Т.7 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень процесу сепарації
насіненного матеріалу соняшнику за забарвленням

№ дослідд.	Повторність №1						Повторність №2						Повторність №3								
	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %
	Ч, %	Б, %	Ц, %	Ч, %	Б, %	Ц, %		Ч, %	Б, %	Ц, %	Ч, %	Б, %	Ц, %		Ч, %	Б, %	Ц, %	Ч, %	Б, %	Ц, %	
1	87,7	12,3	14,9	85,1	27,2	89,2	10,8	15,1	84,9	25,9	88,8	11,2	16,1	83,9	27,3						
2	77,7	22,3	31,4	68,6	53,7	76,2	23,8	28,9	71,1	52,7	75,6	24,4	29,1	70,9	53,5						
3	94,1	5,9	6,4	93,6	12,3	95,1	4,9	5,7	94,3	10,6	94,8	5,2	6,1	93,9	11,3						
4	61,4	38,6	60,5	39,5	99,1	61,8	38,2	59,8	40,2	98,0	61,5	38,5	60,2	39,8	98,7						
5	69,0	31,0	34,6	65,4	65,6	73,3	26,7	37,2	62,8	63,9	73,4	26,6	38,0	62,0	64,6						
6	76,4	23,6	36,5	63,5	60,1	75,9	24,1	34,6	65,4	58,7	75,7	24,3	34,8	65,2	59,1						
7	71,5	28,5	43,1	56,9	71,6	66,9	33,1	37,4	62,6	70,5	66,3	33,7	36,9	63,1	70,6						
8	76,7	23,3	30,7	69,3	54,0	78,2	21,8	30,8	69,2	52,6	78,3	21,7	31,0	69,0	52,7						
9	83,2	16,8	25,3	74,7	42,1	80,8	19,2	21,7	78,3	40,9	80,2	19,8	21,7	78,3	41,5						
10	74,2	25,8	33,9	66,1	59,7	75,8	24,2	34,2	65,8	58,4	75,5	24,5	35,0	65,0	59,5						
11	78,9	21,1	33,1	66,9	54,2	79,5	20,5	32,1	67,9	52,6	79,1	20,9	32,8	67,2	53,7						
12	66,2	33,8	37,9	62,1	71,7	70,5	29,5	41,0	59,0	70,5	70,6	29,4	42,0	58,0	71,4						
13	92,5	7,5	8,4	91,6	15,9	93,6	6,4	8,2	91,8	14,6	93,4	6,6	8,5	91,5	15,1						
14	94,7	5,3	7,5	92,5	12,8	95,3	4,7	6,8	93,2	11,5	94,8	5,2	7,4	92,6	12,6						
15	81,6	18,4	24,3	75,7	42,7	83,6	16,4	25,1	74,9	41,5	83,7	16,3	25,5	74,5	41,8						
16	81,7	18,3	21,7	78,3	40,0	81,5	18,5	20,4	79,6	38,9	81,4	18,6	20,4	79,6	39,0						
17	67,8	32,2	35,1	64,9	67,3	68,3	31,7	34,7	65,3	66,4	68,1	31,9	34,8	65,2	66,7						
18	61,6	38,4	47,0	53,0	85,4	66,8	33,2	50,7	49,3	83,9	67,2	32,8	51,4	48,6	84,2						
19	74,6	25,4	32,5	67,5	57,9	73,2	26,8	29,8	70,2	56,6	72,7	27,3	29,8	70,2	57,1						
20	69,9	30,1	45,6	54,4	75,7	65,0	35,0	39,4	60,6	74,4	64,3	35,7	38,9	61,1	74,6						
21	94,3	5,7	8,8	91,2	14,5	94,5	5,5	7,8	92,2	13,3	94,5	5,5	7,8	92,2	13,3						
22	93,7	6,3	7,8	92,2	14,1	94,9	5,1	7,9	92,1	13,0	94,5	5,5	8,5	91,5	14,0						

№ дослід.	Повторність №1						Повторність №2						Повторність №3								
	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %	Камера для чорних насінн			Камера для білих насінн			θ, %
	Ц, %	Б, %	Б, %	Ц, %	Б, %	Б, %		Ц, %	Б, %	Б, %	Ц, %	Б, %	Б, %		Ц, %	Б, %	Б, %	Ц, %	Б, %	Б, %	
23	94,1	5,9	8,4	25,6	74,4	14,3	94,2	5,8	7,1	92,9	12,9	93,7	6,3	7,6	92,4	13,9					
24	83,6	16,4	25,6	24,0	76,0	42,0	84,0	16,0	24,9	75,1	40,9	83,8	16,2	25,4	74,6	41,6					
25	79,9	20,1	24,0	34,5	65,5	44,1	80,3	19,7	23,4	76,6	43,1	80,3	19,7	23,6	76,4	43,3					
26	75,9	24,1	34,5	25,0	75,0	58,6	76,6	23,4	33,5	66,5	56,9	76,3	23,7	33,9	66,1	57,6					
27	77,2	22,8	25,0	32,6	67,4	47,8	78,5	21,5	25,4	74,6	46,9	78,5	21,5	25,7	74,3	47,2					
28	72,5	27,5	32,6	34,5	65,5	60,1	72,0	28,0	30,8	69,2	58,8	71,5	28,5	31,1	68,9	59,6					
29	69,4	30,6	34,5	18,1	81,9	65,1	74,6	25,4	38,5	61,5	63,9	74,8	25,2	39,3	60,7	64,5					
30	88,4	11,6	18,1	52,3	47,7	29,7	88,4	11,6	16,8	83,2	28,4	87,8	12,2	17,3	82,7	29,5					
31	56,8	43,2	6,8	21,2	78,8	95,5	60,7	39,3	55,1	44,9	94,4	61,1	38,9	55,6	44,4	94,5					
32	94,4	5,6	6,8	15,8	84,2	12,4	95,5	4,5	6,3	93,7	10,8	95,2	4,8	6,8	93,2	11,6					
33	86,0	14,0	15,8	9,8	90,2	29,8	88,6	11,4	17,3	82,7	28,7	88,5	11,5	17,9	82,1	29,4					
34	91,2	8,8	9,8	21,2	78,8	18,6	92,5	7,5	9,7	90,3	17,2	92,4	7,6	10,0	90,0	17,6					
35	84,9	15,1	21,2	6,3	93,7	36,3	84,3	15,7	19,0	81,0	34,7	83,8	16,2	19,3	80,7	35,5					
36	94,3	5,7	6,3	17,9	82,1	12,0	95,2	4,8	6,1	93,9	10,9	95,1	4,9	6,4	93,6	11,3					
37	88,4	11,6	17,9	25,4	74,6	29,5	87,7	12,3	16,4	83,6	28,7	87,4	12,6	16,5	83,5	29,1					
38	83,2	16,8	25,4	31,7	68,3	42,2	80,7	19,3	21,8	78,2	41,1	80,0	20,0	21,8	78,2	41,8					
39	71,5	28,5	31,7	54,0	46,0	60,2	74,2	25,8	33,1	66,9	58,9	74,4	25,6	33,5	66,5	59,1					
40	58,6	41,4	54,0	15,8	84,2	95,4	59,3	40,7	53,1	46,9	93,8	58,9	41,1	53,5	46,5	94,6					
41	86,0	14,0	15,8	9,4	90,6	29,8	88,7	11,3	17,2	82,8	28,5	88,3	11,7	18,2	81,8	29,9					
42	91,6	8,4	9,4	60,9	39,1	17,8	92,8	7,2	9,3	90,7	16,5	92,2	7,8	10,1	89,9	17,9					
43	53,7	46,3	7,9	25,4	74,6	107,2	56,0	44,0	62,2	37,8	106,2	56,2	43,8	62,6	37,4	106,4					
44	92,9	7,1	7,9	8,0	92,0	15,0	94,4	5,6	7,8	92,2	13,4	94,3	5,7	8,2	91,8	13,9					
45	92,9	7,1	8,0	8,6	91,4	14,7	94,4	5,6	7,8	92,2	13,4	94,1	5,9	8,5	91,5	14,4					
46	93,9	6,1	8,6	6,1	91,4	14,7	94,6	5,4	7,6	92,4	13,0	94,2	5,8	8,2	91,8	14,0					

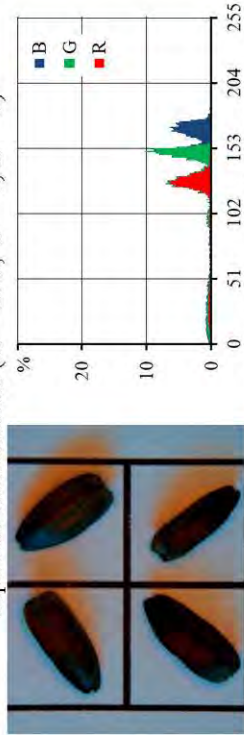
Ц - насіння із чорним забарвленням; Б - насіння із наявним білим кольором

Додаток У

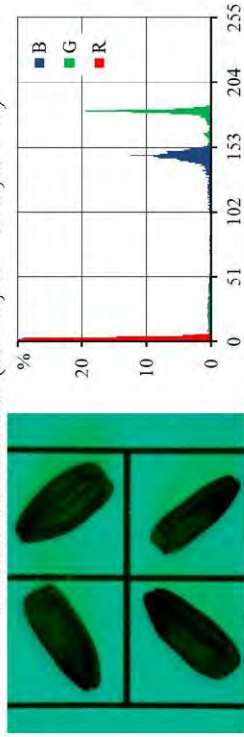
Зведені дані результатів експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння соняшнику за його забарвленням

Сортозразок APS04

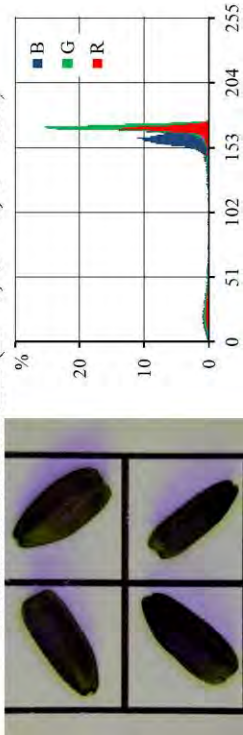
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



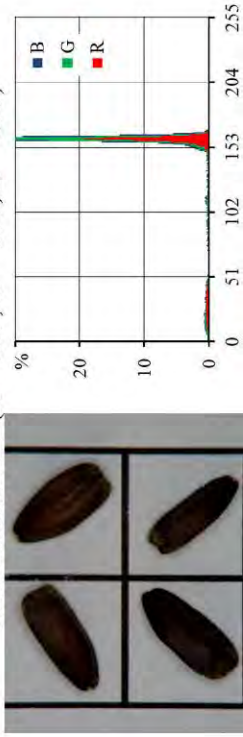
Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



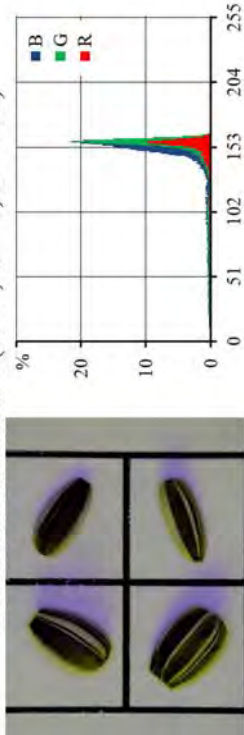
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



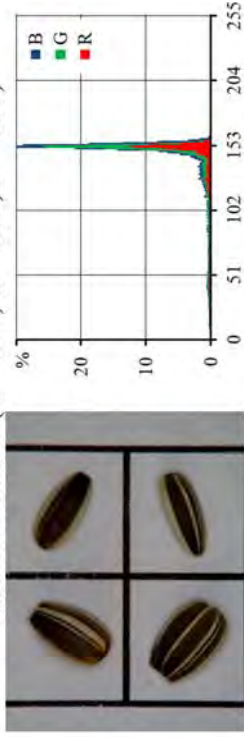
Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)



Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)

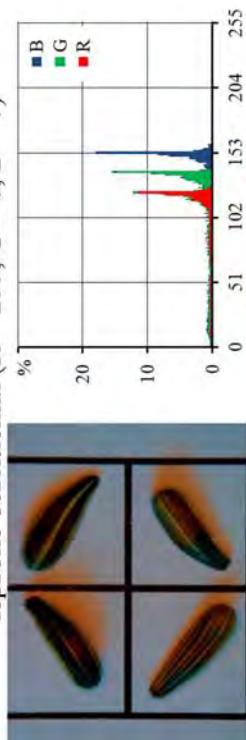


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

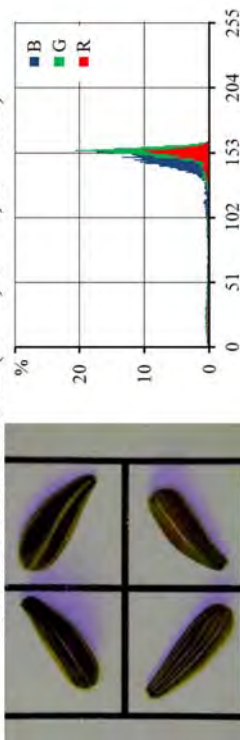


Соргозразок In7034

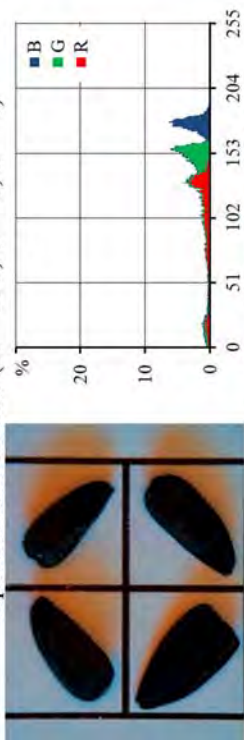
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



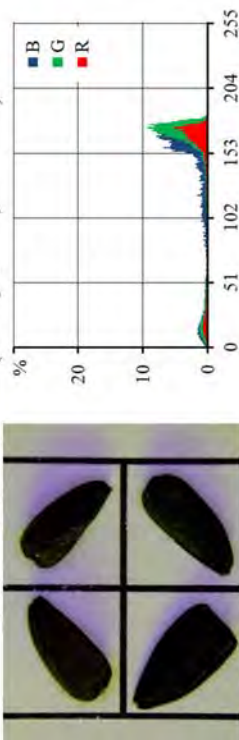
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



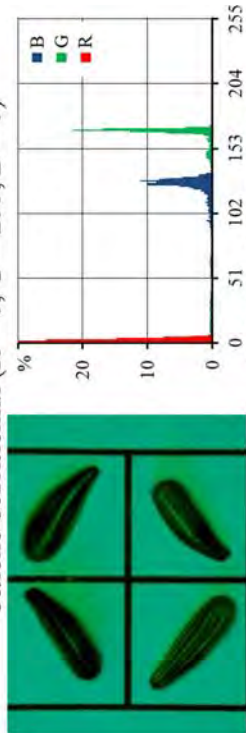
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



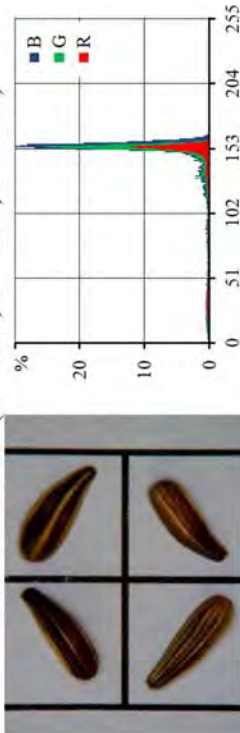
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



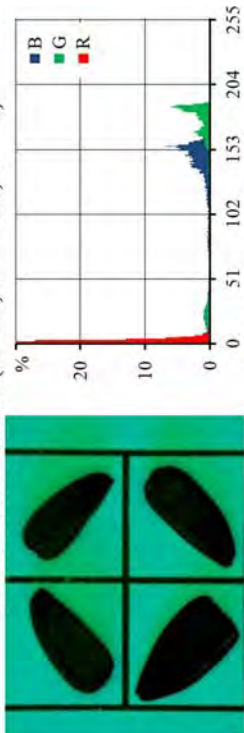
Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



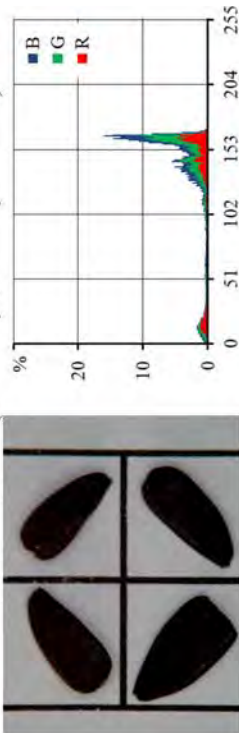
Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

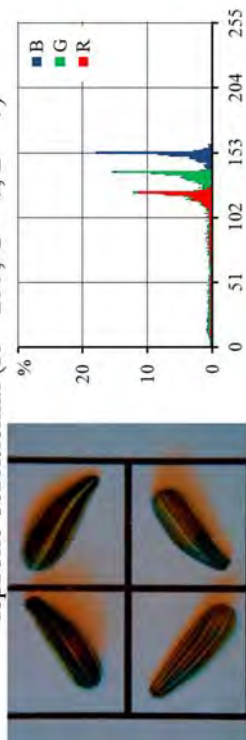


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

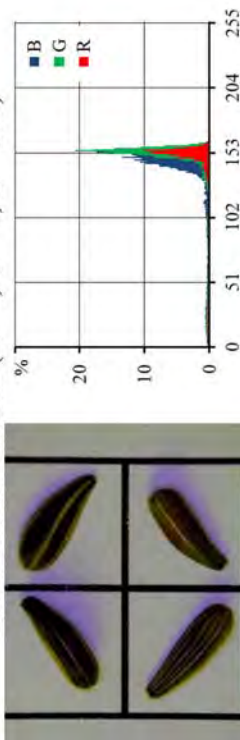


Соргозразок SJ2354

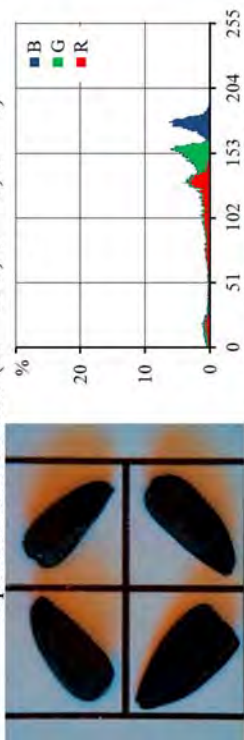
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



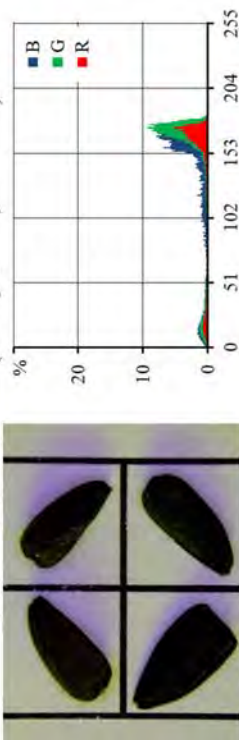
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)

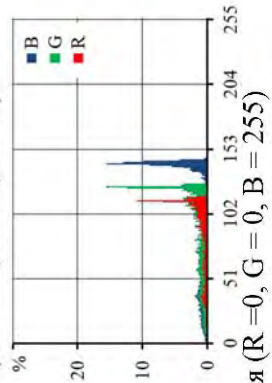
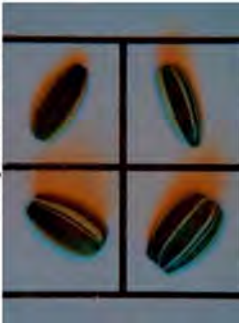


Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)

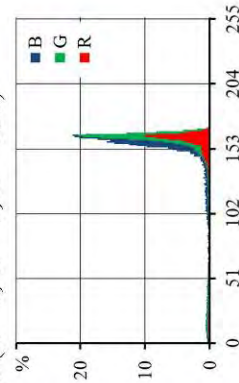
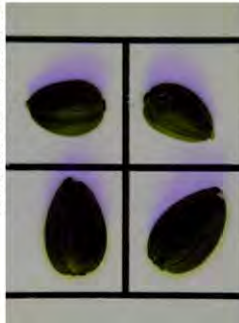


Сортозразок І2К20031

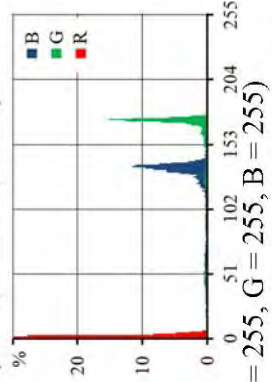
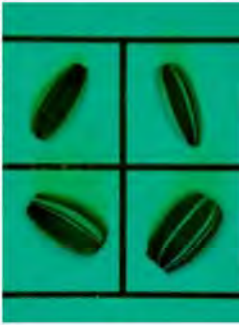
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



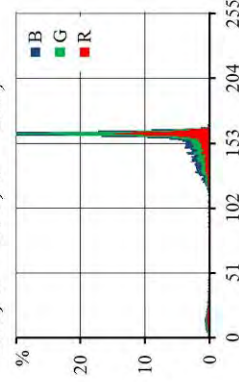
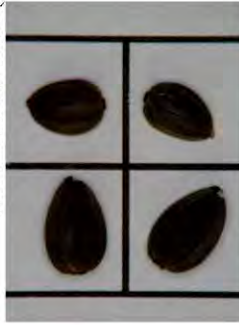
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

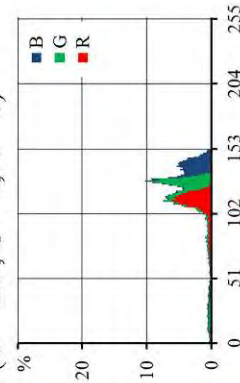
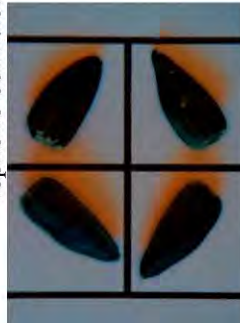


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

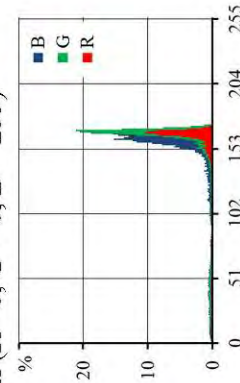
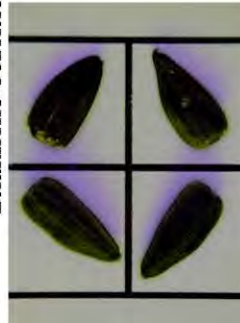


Сортозразок СЛ1218

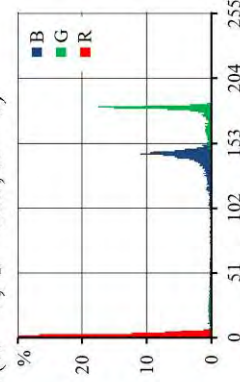
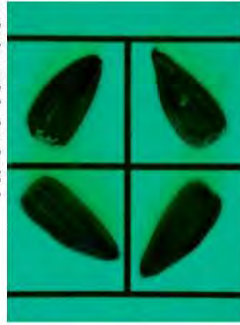
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



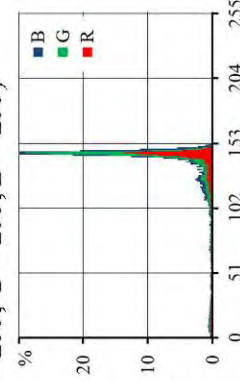
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



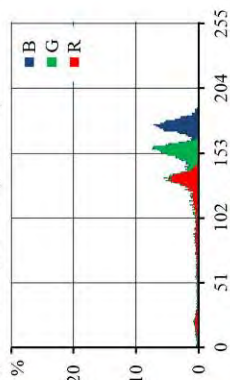
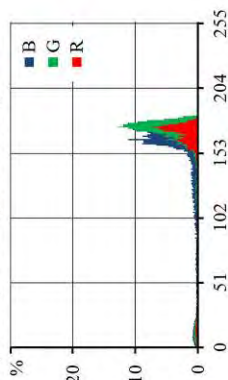
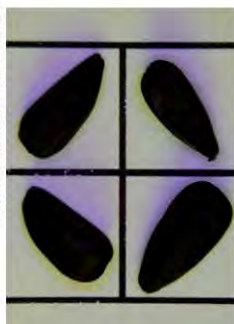
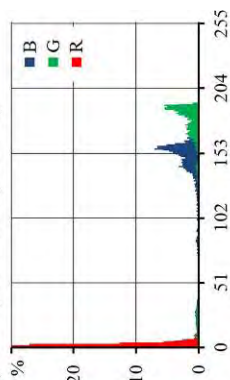
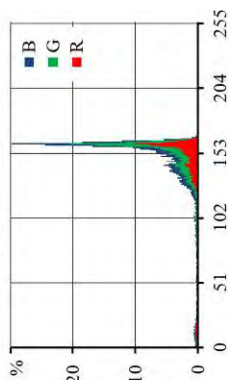
Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



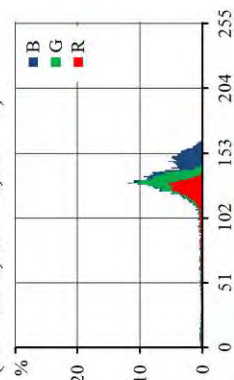
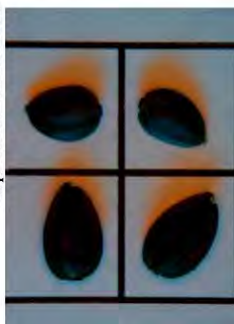
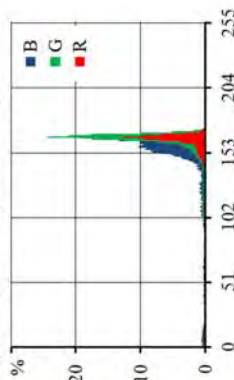
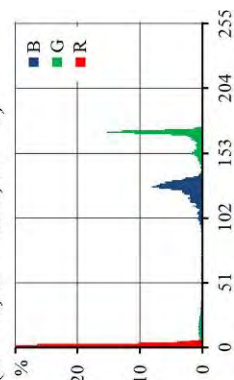
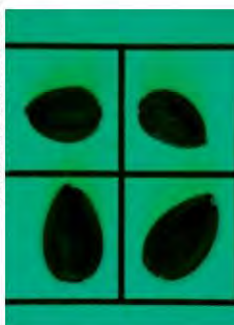
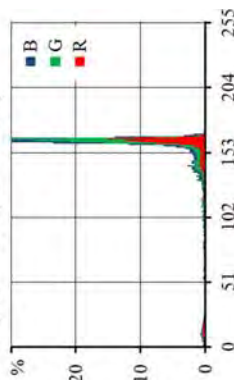
Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)



Соргозразок Л17242

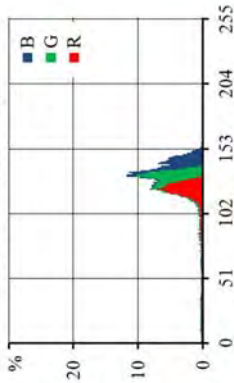
Червоне освітлення ($R = 255, G = 0, B = 0$)Блакитне освітлення ($R = 0, G = 0, B = 255$)Зелене освітлення ($R = 0, G = 255, B = 0$)Біле освітлення ($R = 255, G = 255, B = 255$)

Соргозразок Л259524

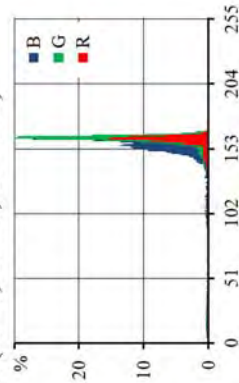
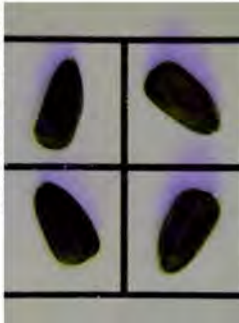
Червоне освітлення ($R = 255, G = 0, B = 0$)Блакитне освітлення ($R = 0, G = 0, B = 255$)Зелене освітлення ($R = 0, G = 255, B = 0$)Біле освітлення ($R = 255, G = 255, B = 255$)

Сортозразок КГ113

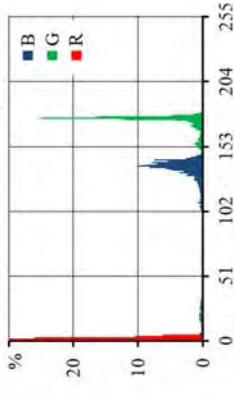
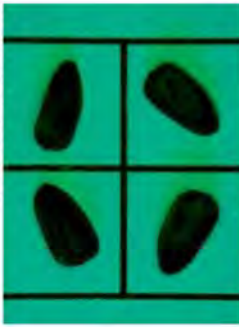
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



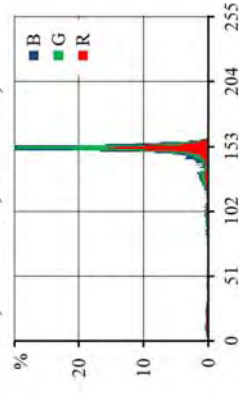
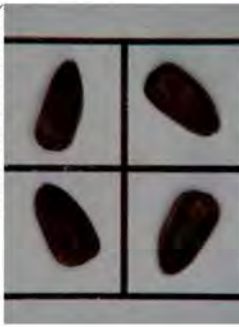
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

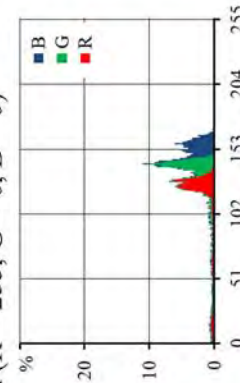
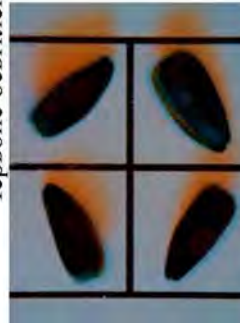


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

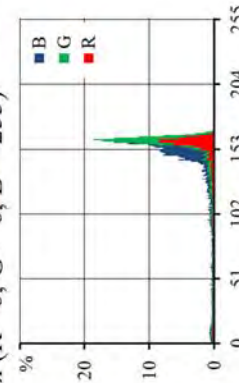
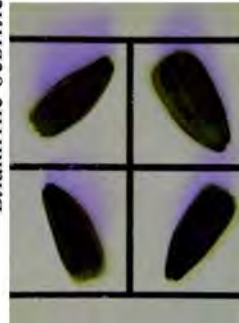


Сортозразок КГ15

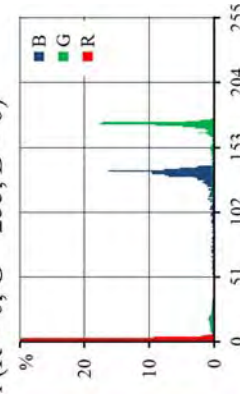
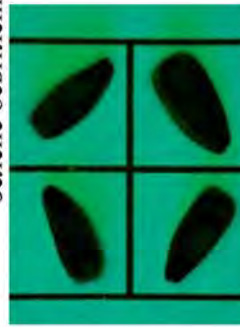
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



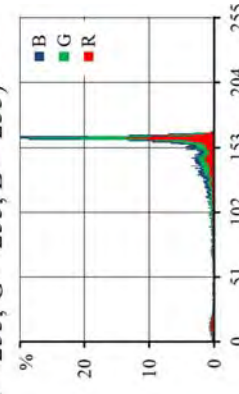
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

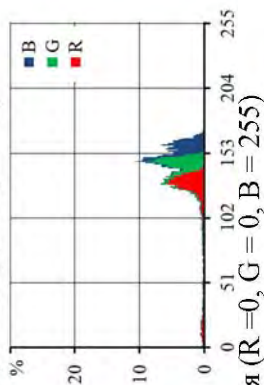
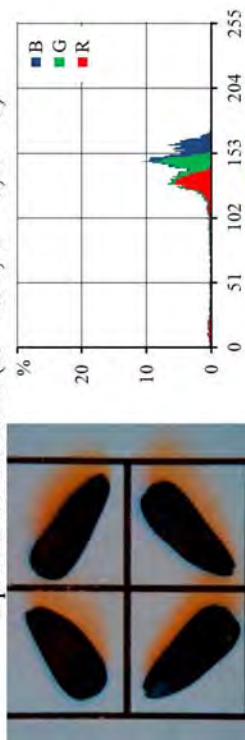


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

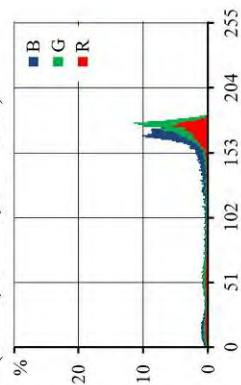
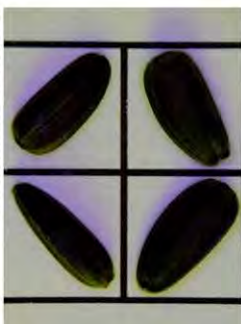


Сортозразок КГ111

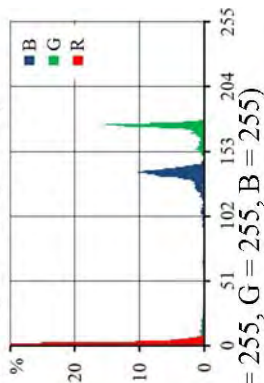
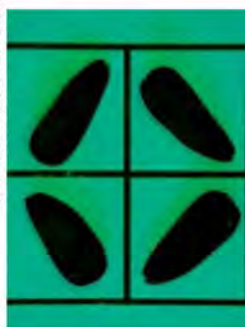
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



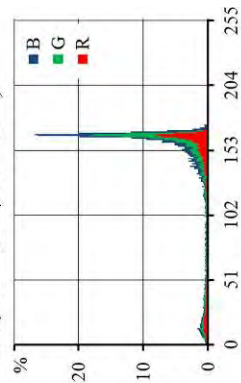
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

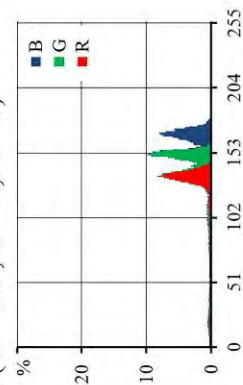
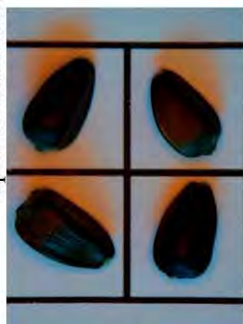


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

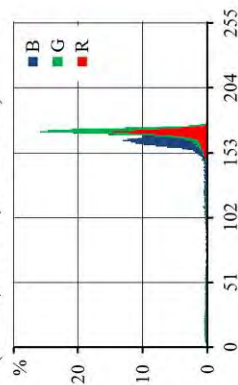
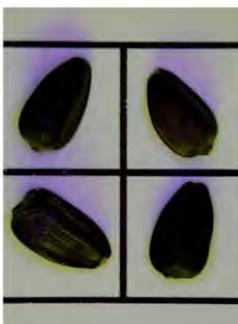


Сортозразок КГ13

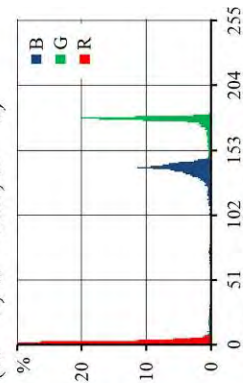
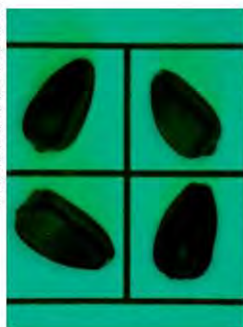
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



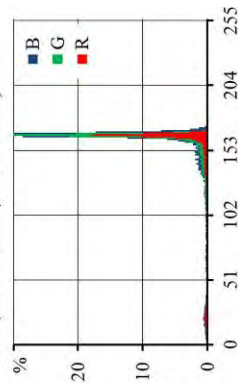
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

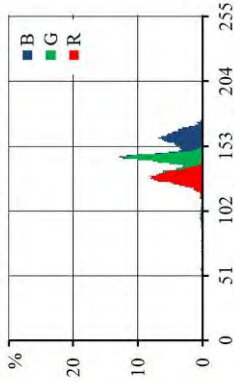
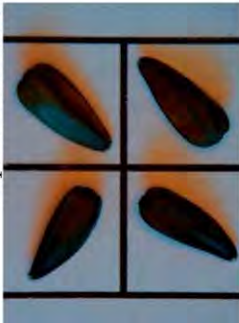


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

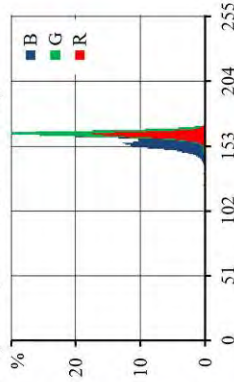


Соргозразок RHA273

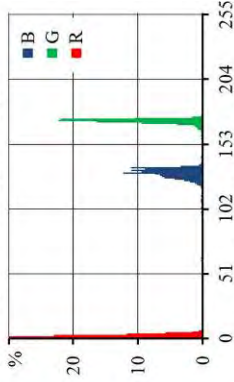
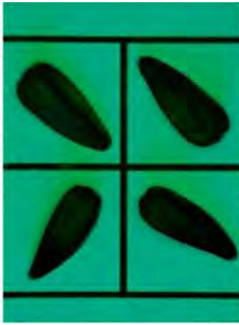
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



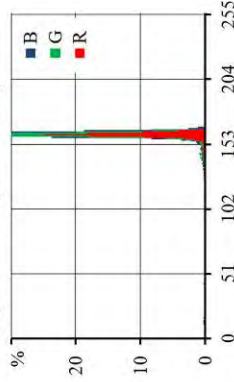
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

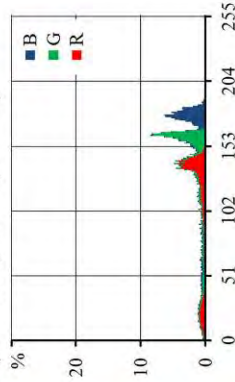
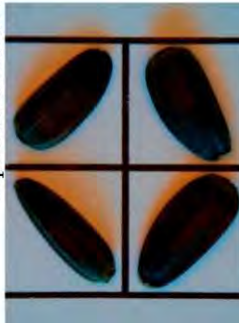


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

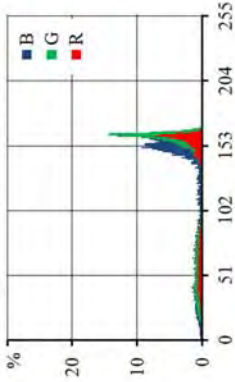
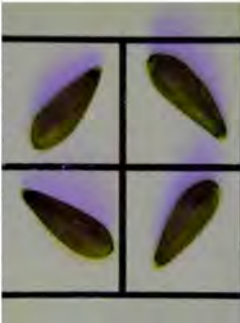


Соргозразок SL2966

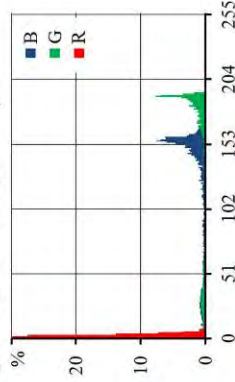
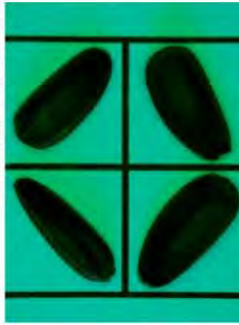
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



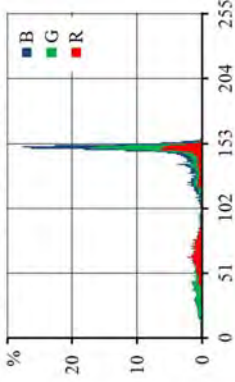
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

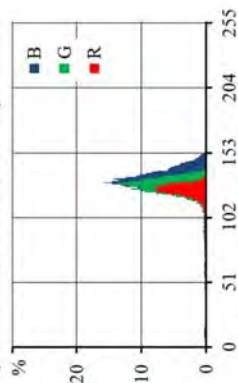


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

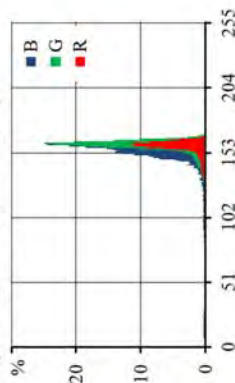
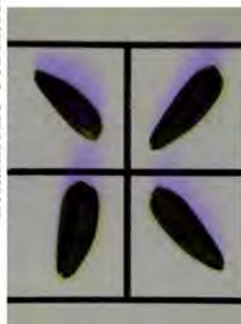


Соргозразок М19

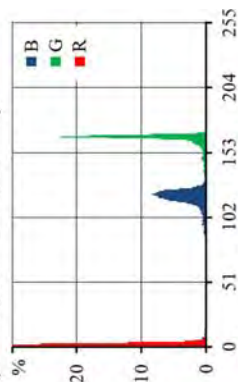
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



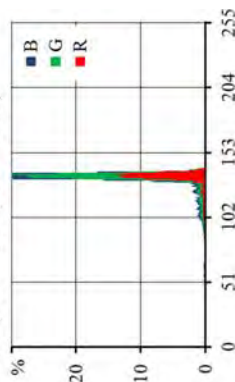
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

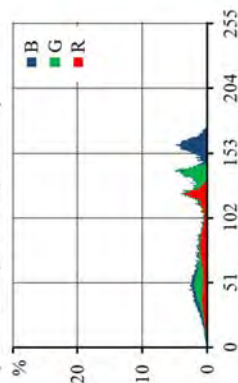
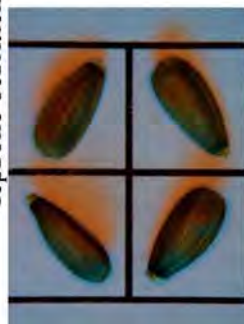


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

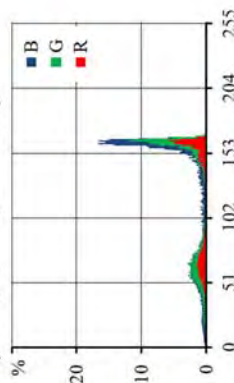
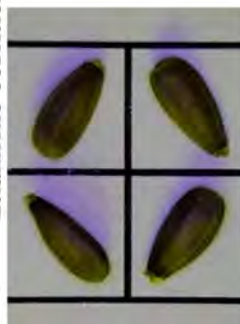


Соргозразок LD722

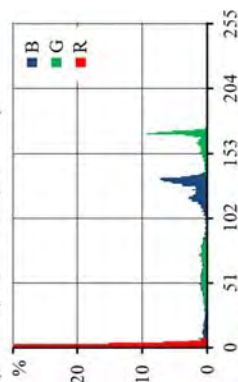
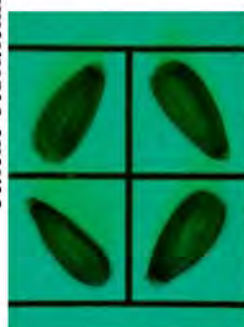
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



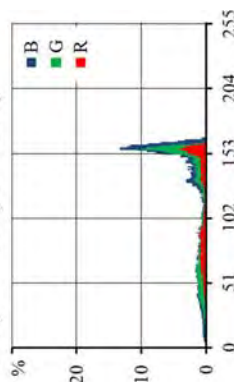
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

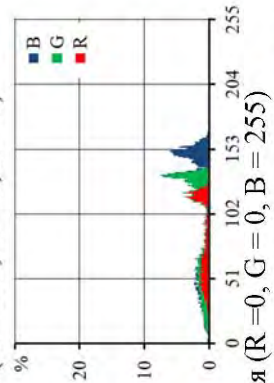
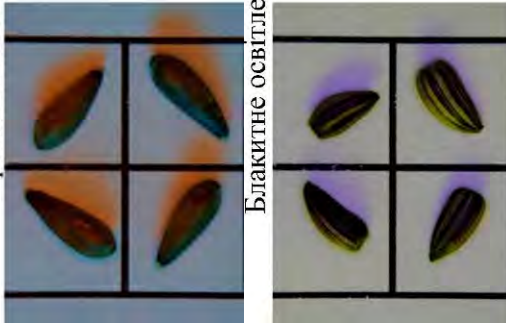


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

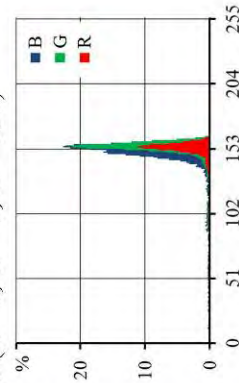
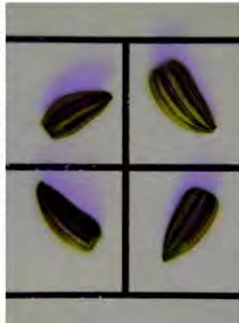


Соргозразок LD723

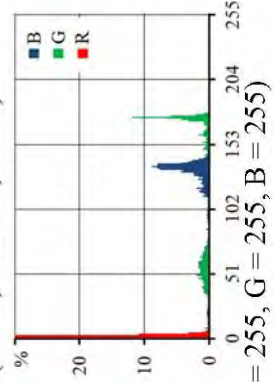
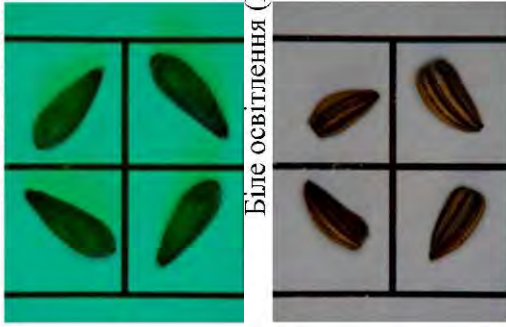
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



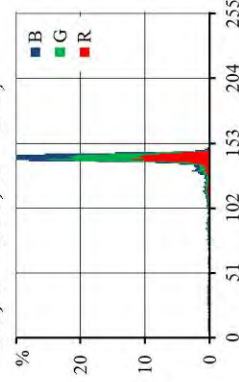
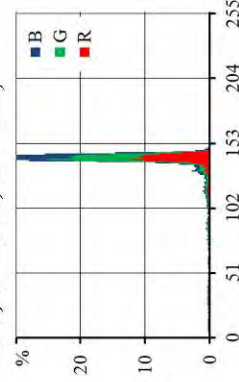
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

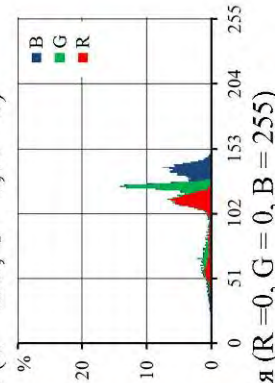
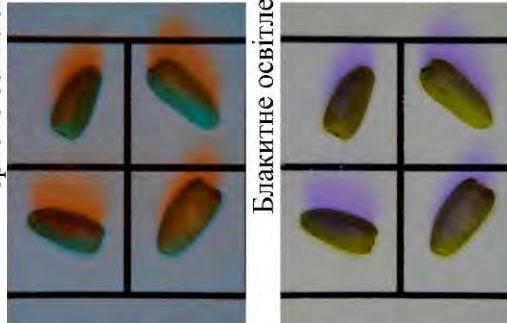


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

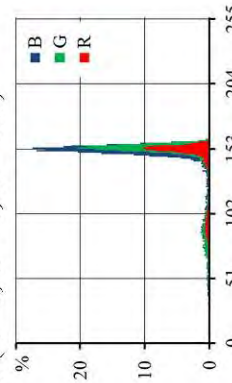
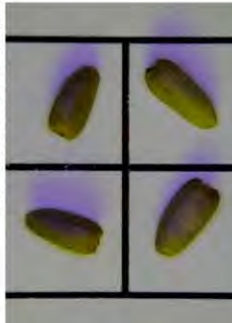


Соргозразок InK2830

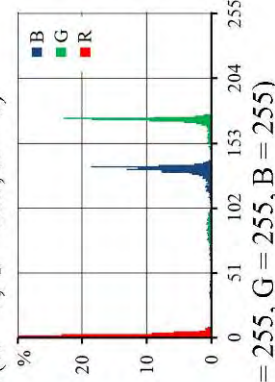
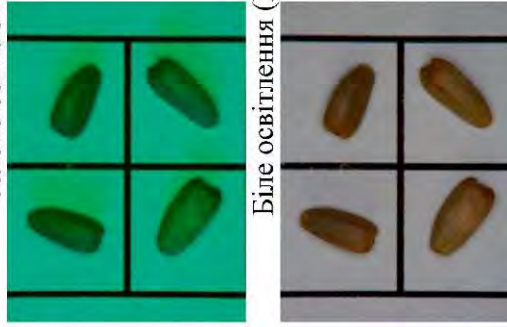
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



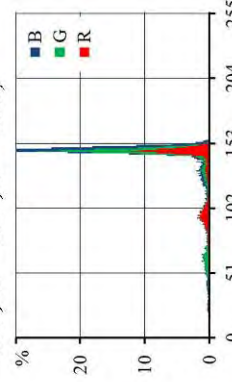
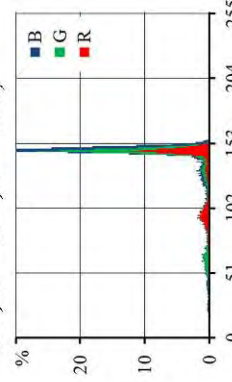
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

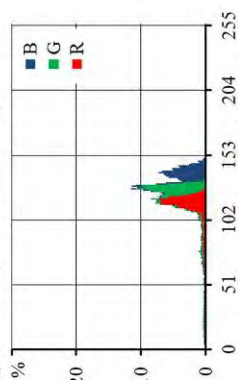
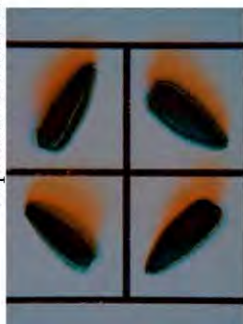


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

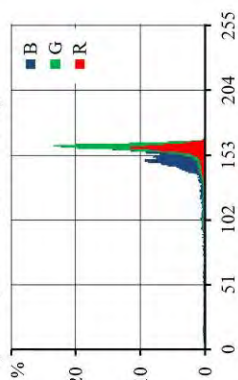
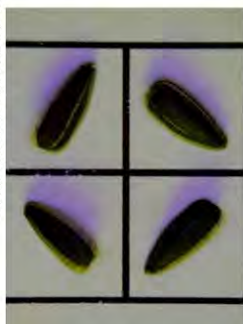


Сортозразок ІнК85

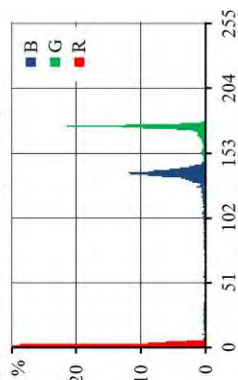
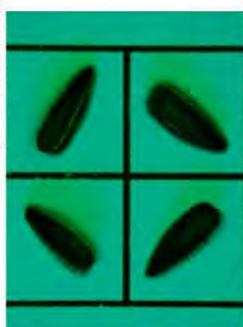
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



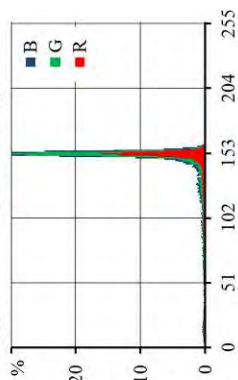
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

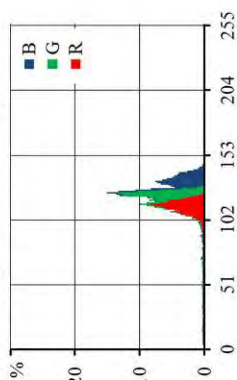
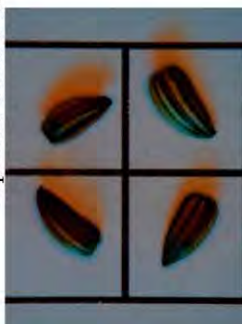


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

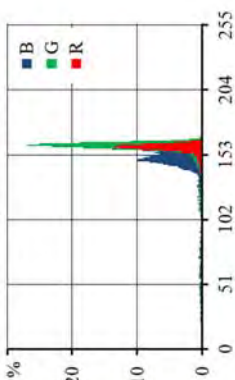


Сортозразок ІнК1124

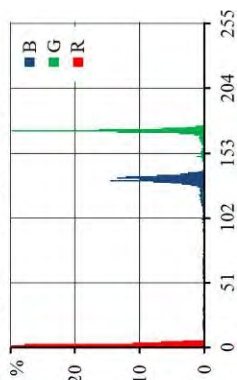
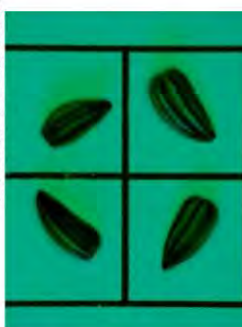
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



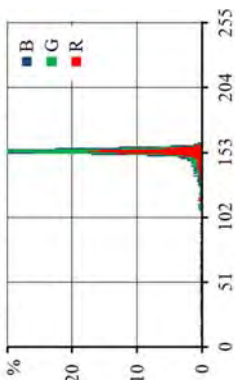
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

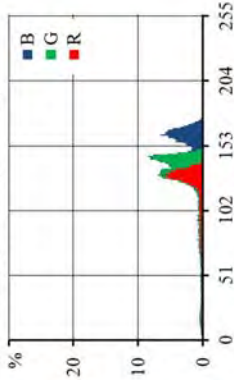
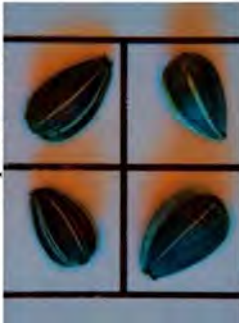


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

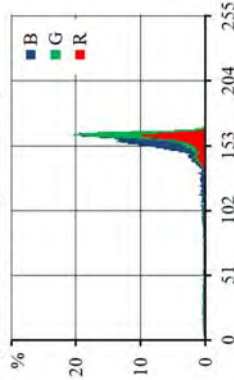
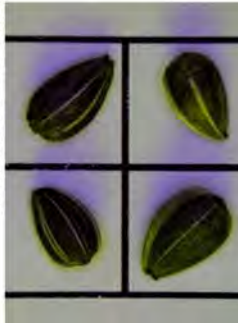


Сортозразок In18906

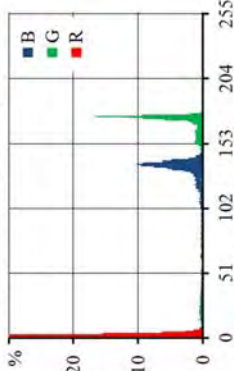
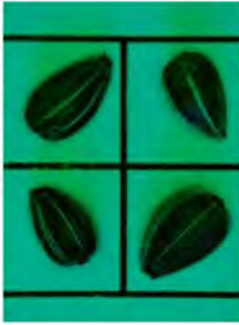
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



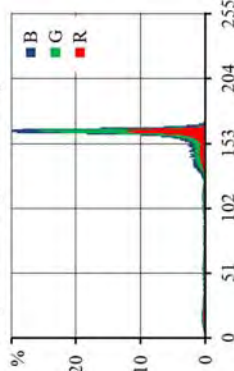
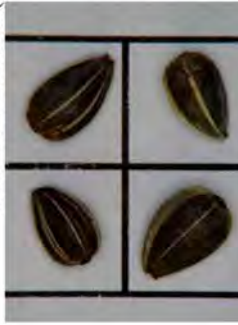
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

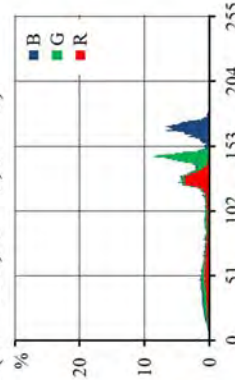
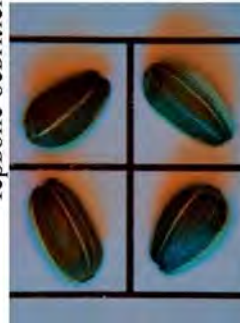


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

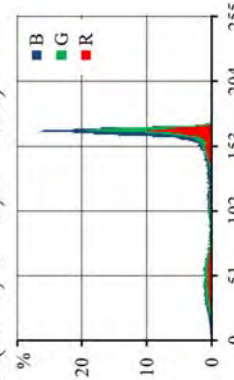
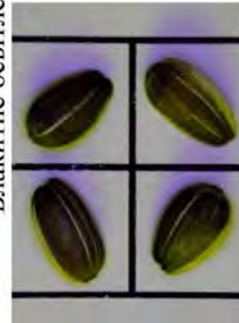


Сортозразок I2K670

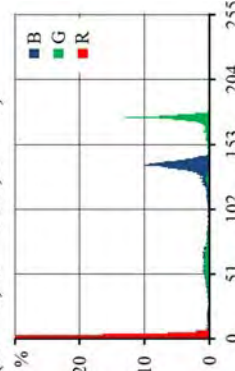
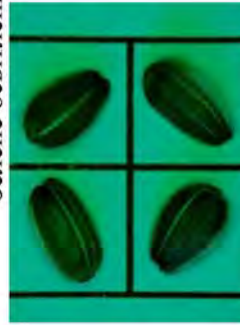
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



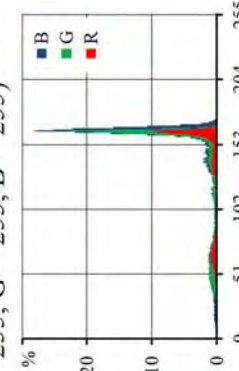
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

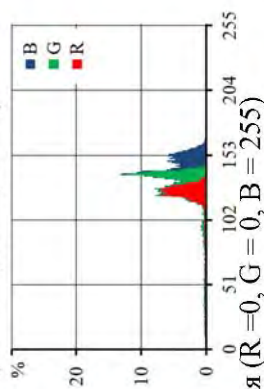
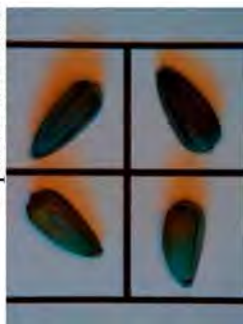


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

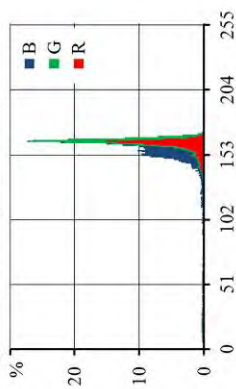
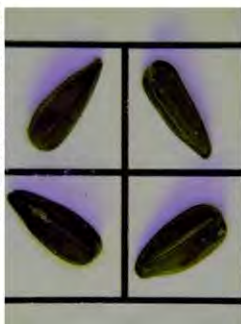


Соргозразок ІЗК1070

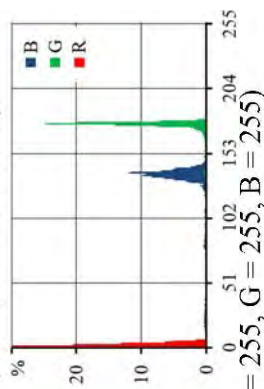
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



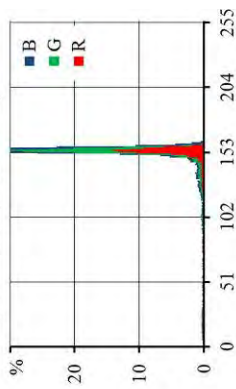
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

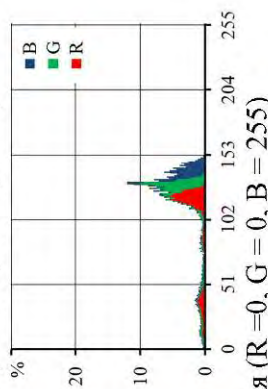
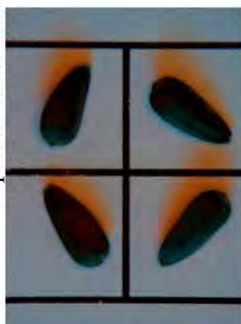


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

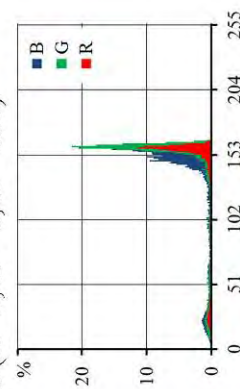
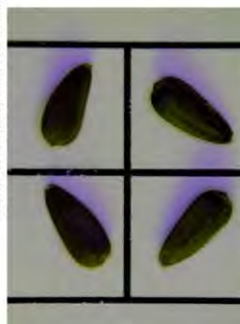


Соргозразок НА298

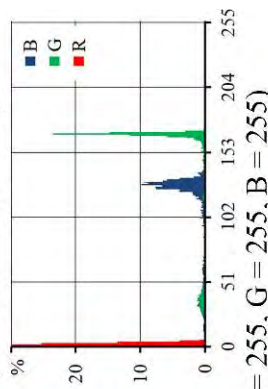
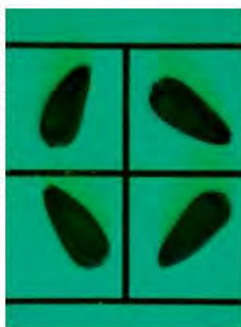
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



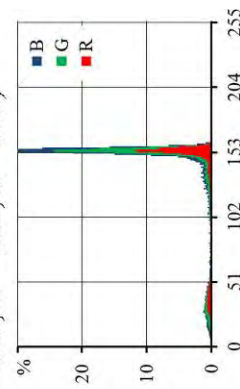
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

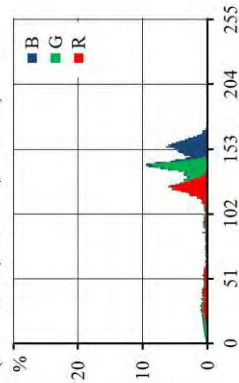
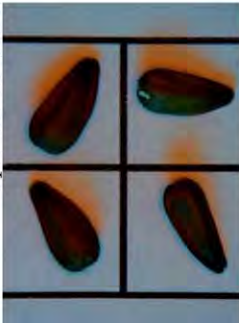


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

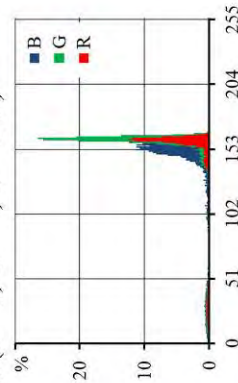
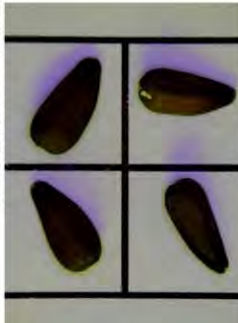


Соргозразок АН70029RF

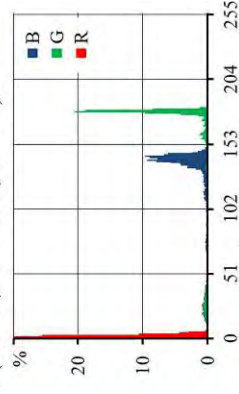
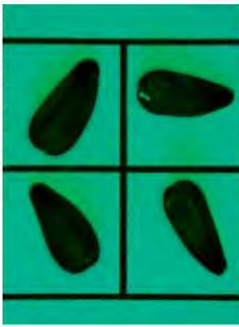
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



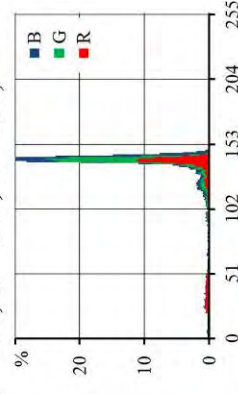
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

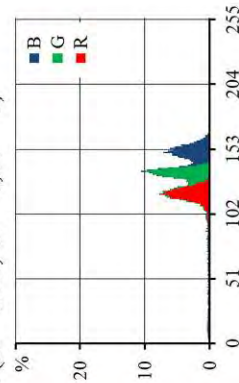
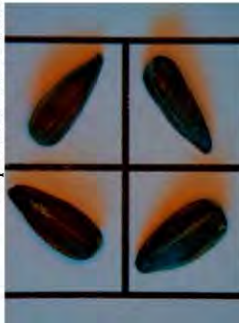


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

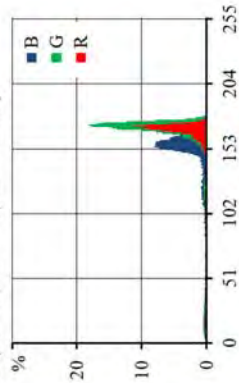
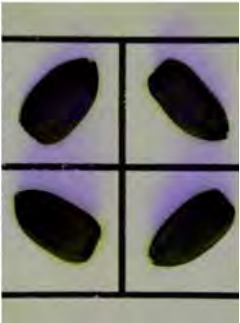


Соргозразок APS10

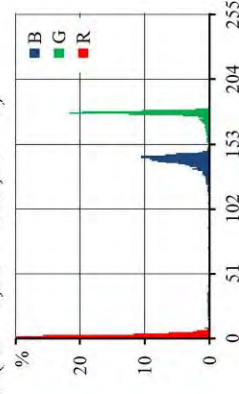
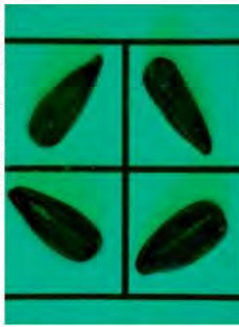
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



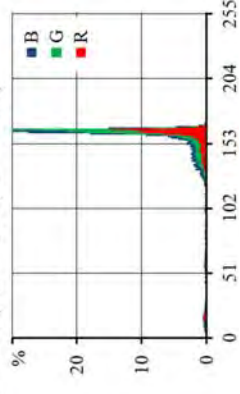
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

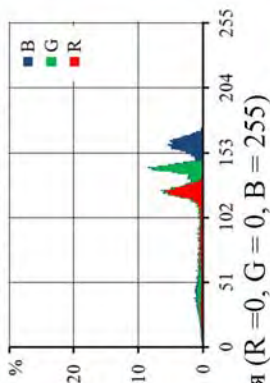
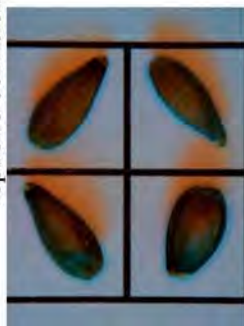


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

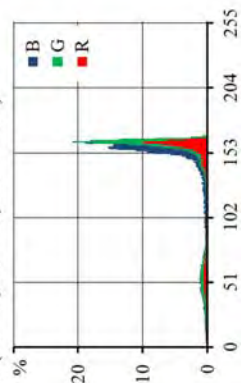
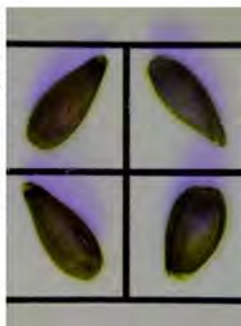


Соргозразок LD4

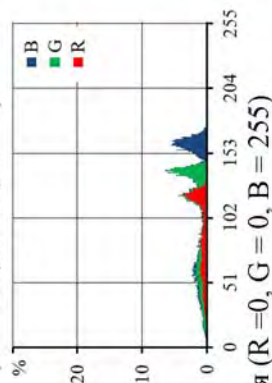
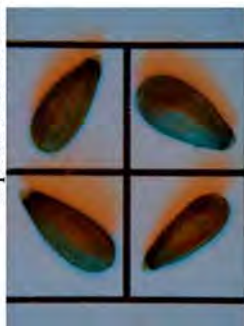
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



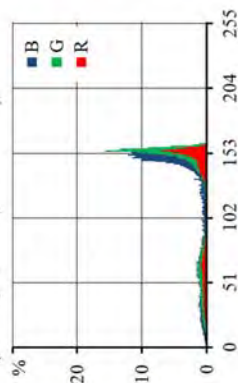
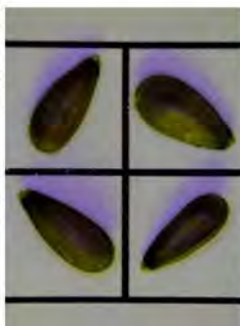
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



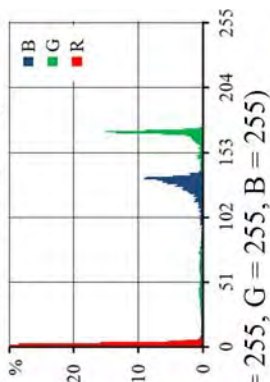
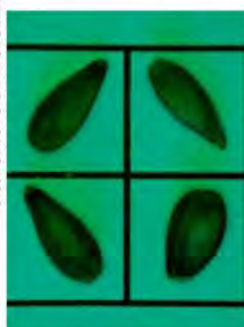
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



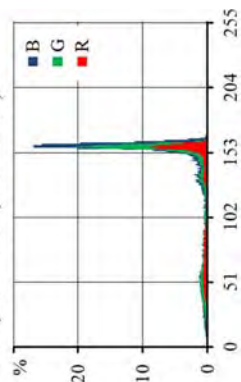
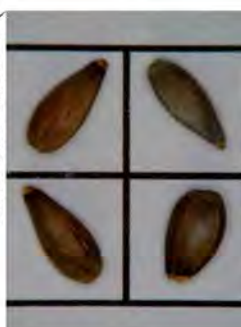
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



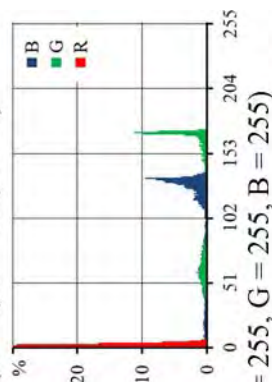
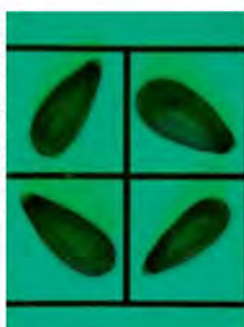
Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



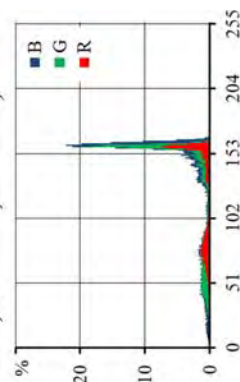
Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

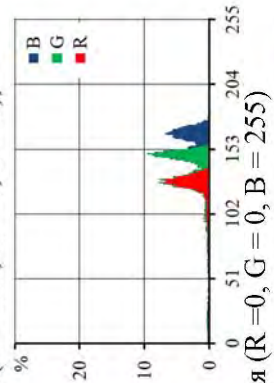
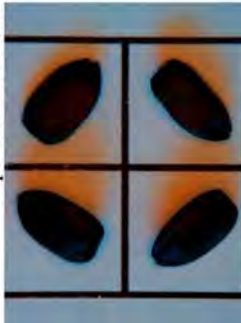


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

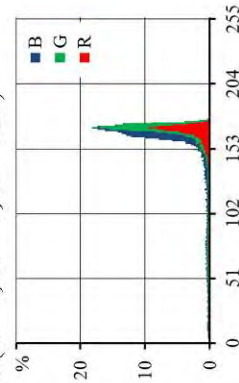
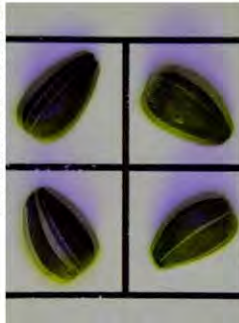


Соргозразок ІпК1276

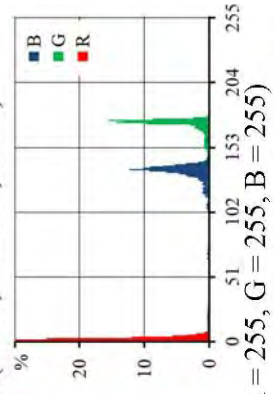
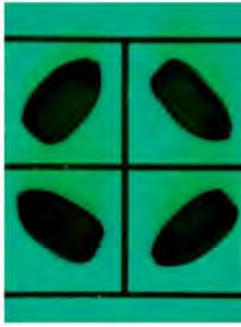
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0),



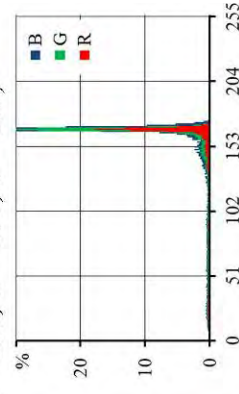
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

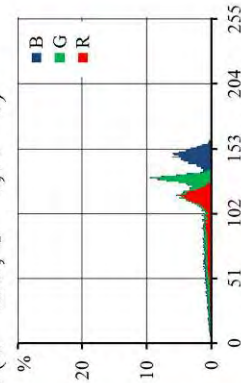
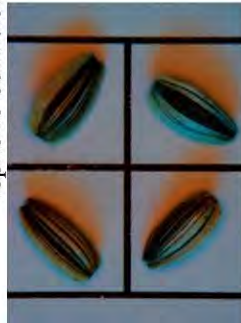


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

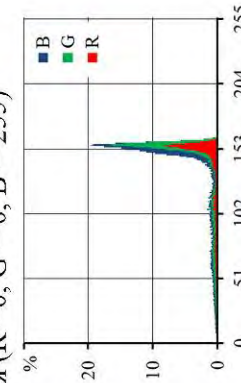
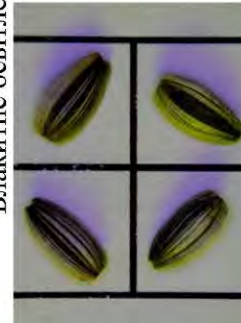


Соргозразок І2К87

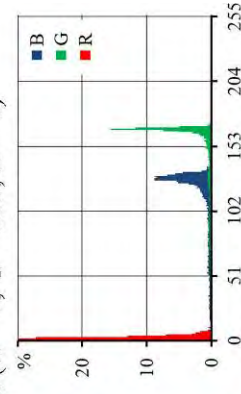
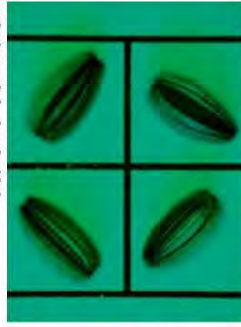
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



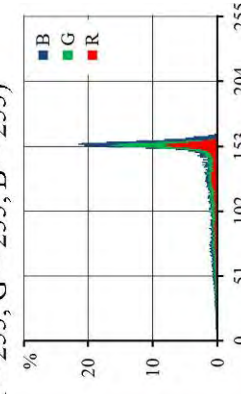
Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

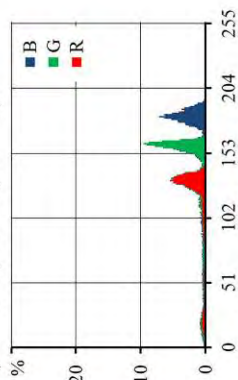


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

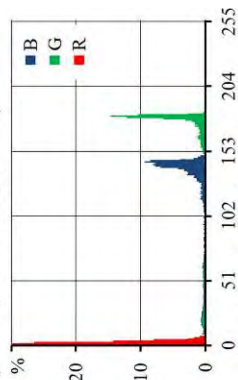
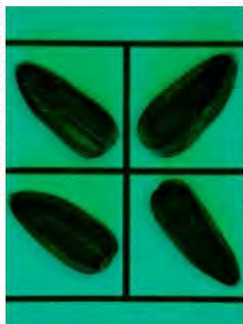


Сортозразок НА300Б

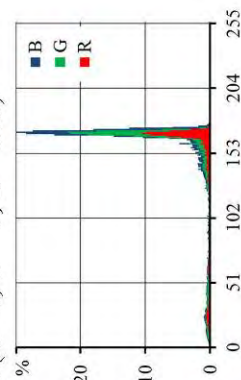
Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



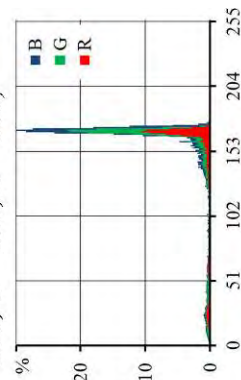
Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



Блакитне освітлення (R = 0, G = 0, B = 255)

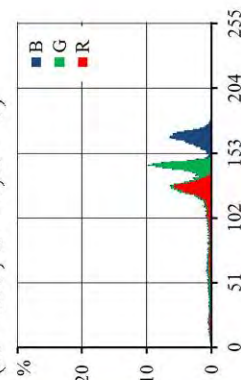
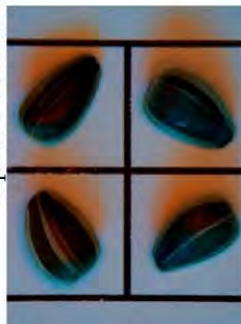


Біле освітлення (R = 255, G = 255, B = 255)

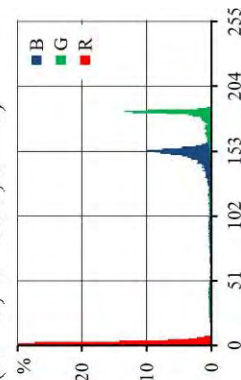
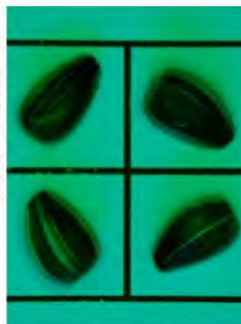


Сортозразок НАР7

Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)

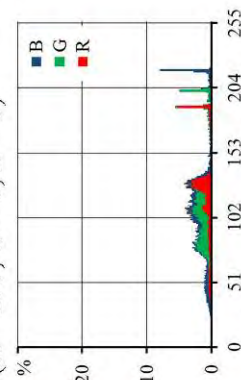
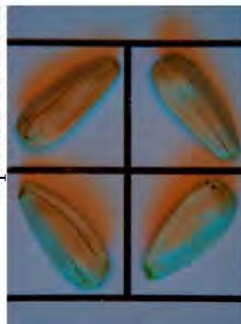


Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)

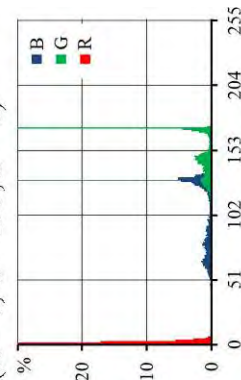
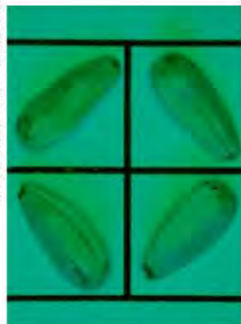


Сортозразок Іп18917

Червоне освітлення (R = 255, G = 0, B = 0)



Зелене освітлення (R = 0, G = 255, B = 0)



Додаток Ф

Експериментальні дослідження процесу автоматичного фенотипування
насінняТаблиця Ф.1 – Узагальнення результатів визначення забарвлення насіння
соняшнику при різному освітленні

Сортозразок	Освітлення	Червоне			Зелене			Блакитне			Біле		
	Колір	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
APS04	Значення	126	151	170	2	182	147	168	170	160	160	160	161
	Частота, %	6,42	10,0	6,3	49,4	19,5	12,5	14,0	14,3	9,5	19,5	24,1	21,2
HA300B	Значення	132	161	182	2	181	145	169	170	173	169	170	173
	Частота, %	5,36	9,4	7,2	46,5	14,7	9,2	10,6	12,1	10,9	10,6	12,1	10,9
HAP7	Значення	127	144	166	2	185	154	170	173	164	167	167	167
	Частота, %	5,80	9,5	6,6	45,4	13,4	9,8	9,7	10,0	8,8	17,9	19,8	14,3
I2K87	Значення	117	131	147	2	167	128	156	158	151	154	154	158
	Частота, %	4,91	9,1	6,1	45,5	15,6	8,2	8,3	9,6	6,6	7,9	8,6	7,7
InK1276	Значення	127	150	166	2	175	136	171	174	155	164	164	164
	Частота, %	7,26	9,3	6,9	51,7	15,4	12,2	11,4	12,5	7,1	14,7	17,6	16,9
LD4	Значення	124	142	160	2	170	133	161	163	156	158	158	160
	Частота, %	5,94	8,2	5,5	46,7	15,1	9,0	10,0	11,6	10,1	8,9	11,5	12,4
AH70029RF	Значення	124	142	155	2	179	144	161	162	153	141	142	144
	Частота, %	5,89	8,7	6,4	56,7	20,5	9,6	12,4	14,5	9,3	11,3	14,2	13,1
APS10	Значення	118	136	151	2	178	144	164	165	154	155	155	156
	Частота, %	7,46	9,9	7,2	51,3	21,7	10,5	15,1	15,2	7,8	14,1	15,8	12,7
HA298	Значення	121	131	140	2	168	128	159	161	149	155	154	154
	Частота, %	5,85	9,8	6,3	56,9	23,6	9,8	11,3	11,1	7,7	11,8	12,6	13,0
I2K670	Значення	125	145	169	2	175	137	166	167	164	164	164	166
	Частота, %	4,04	8,2	6,7	42,9	12,9	9,9	9,8	10,6	11,1	9,8	12,7	13,7
I3K1070	Значення	127	138	149	2	177	138	160	162	150	154	154	155
	Частота, %	7,10	12,2	6,0	54,0	24,8	11,5	13,6	15,8	8,7	17,7	18,2	17,1
In18906	Значення	130	145	162	2	175	137	162	164	156	164	164	165
	Частота, %	6,13	8,1	6,5	43,7	16,6	10,2	10,0	12,0	8,7	12,1	13,9	12,3
InK85	Значення	119	127	140	2	175	138	159	161	149	153	153	154
	Частота, %	7,27	10,6	7,2	52,7	21,4	11,8	11,6	14,3	8,1	16,0	17,7	14,0
InK1124	Значення	115	124	133	2	171	132	155	156	150	141	141	144
	Частота, %	8,36	13,3	7,6	51,4	29,8	14,5	11,2	10,9	10,8	12,0	13,1	12,3
InK2830	Значення	114	124	139	2	173	135	154	156	152	147	147	150
	Частота, %	6,51	13,5	7,6	58,1	22,9	18,6	10,3	11,2	13,0	12,9	14,1	13,3
LD722	Значення	122	140	160	2	169	134	163	164	161	157	157	161
	Частота, %	3,67	4,9	4,9	44,3	9,3	7,1	5,8	7,2	7,9	4,2	5,9	7,2
LD723	Значення	119	133	152	2	175	136	161	163	152	149	150	151
	Частота, %	3,52	7,4	6,1	53,1	11,8	8,7	7,2	10,2	6,1	6,4	11,0	11,4

Сортозразок	Освітлення	Червоне			Зелене			Блакитне			Біле		
	Колір	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
M19	Значення	125	131	138	2	166	121	161	161	154	136	136	136
	Частота, %	8,17	9,8	6,5	56,9	22,5	8,4	11,3	13,0	10,5	13,8	16,9	14,7
RHA273	Значення	130	145	160	2	172	131	163	165	155	161	161	162
	Частота, %	8,16	12,2	6,9	58,0	22,3	12,1	17,5	16,9	11,6	24,8	26,3	19,3
SL2966	Значення	140	163	178	2	191	156	174	177	166	165	166	166
	Частота, %	4,34	8,1	6,4	46,9	7,6	7,1	5,5	6,9	6,5	8,3	10,1	9,0
KG13	Значення	135	152	169	2	179	140	170	172	163	165	165	166
	Частота, %	8,02	9,7	8,1	51,4	20,0	11,3	14,7	13,7	10,5	18,3	21,5	15,8
KG15	Значення	128	142	158	2	172	135	159	162	151	161	161	161
	Частота, %	6,26	9,8	6,2	58,8	17,7	15,9	8,6	10,0	6,8	13,5	15,1	13,9
KG111	Значення	130	147	160	2	175	137	166	166	159	164	164	164
	Частота, %	5,75	8,8	6,5	53,0	15,3	10,2	12,6	11,7	7,0	15,2	16,8	16,3
KG113	Значення	122	132	142	2	176	138	161	163	156	152	152	152
	Частота, %	7,04	10,1	6,9	57,2	25,2	9,9	15,5	17,0	10,8	15,7	17,7	15,2
J7242	Значення	132	157	176	2	189	157	174	177	164	161	161	161
	Частота, %	4,86	7,3	7,2	48,2	5,5	6,5	7,3	8,0	6,1	10,0	10,5	9,3
J259524	Значення	129	135	147	2	170	127	163	165	158	161	161	161
	Частота, %	5,51	6,6	5,5	57,9	15,2	7,9	10,2	10,5	9,2	14,7	16,4	16,2
SJ1218	Значення	112	128	140	2	182	145	166	168	161	146	146	146
	Частота, %	6,22	9,0	5,3	48,1	17,5	10,8	10,4	12,5	11,0	13,6	15,3	13,1
SJ2354	Значення	130	157	178	2	187	156	173	177	158	162	164	164
	Частота, %	3,75	5,7	6,3	44,7	5,9	6,2	5,2	5,9	4,4	4,8	6,0	5,7
I2K20031	Значення	113	124	142	2	173	136	157	159	153	153	152	155
	Частота, %	10,57	15,0	15,6	56,3	15,2	11,3	9,7	11,5	8,7	12,6	13,9	10,8
In7034	Значення	122	138	153	2	168	128	155	156	146	155	155	157
	Частота, %	11,51	14,6	18,0	48,9	21,5	11,1	10,1	11,1	8,6	12,0	13,5	12,7
In18917	Значення	189	202	218	2	171	130	153	155	153	134	139	142
	Частота, %	5,15	4,8	8,0	73,6	30,5	33,2	4,0	5,2	6,2	4,4	4,2	4,4

Додаток Х



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 136829

ФОТОЕЛЕКТРОННИЙ СЕПАРАТОР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.09.2019.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Д.О. Романович



УКРАЇНА

**ПАТЕНТ****НА ВИНАХІД****№ 120231****СПОСІБ АВТОМАТИЧНОГО ФЕНОТИПУВАННЯ НАСІННЯ І
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
25.10.2019.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Д.О. Романович



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 120235

АДАПТИВНИЙ ВІБРОРЕШІТНИЙ СЕПАРАТОР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
25.10.2019.

Заступник Міністра розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України

Д.О. Романович



Насінництво	Процес	Машини/ технічний засіб	Маса матеріалу, т	Продуктивність, т/год.	Споживаєма потужність, кВт	Очищена насіннева суміш, %	Втрата ліквідного насіння, %	Маса віраченого ліквідного насіння, т	Тривалість роботи, год.	Персонал, люд.	Вартість машини, тис. грн.	Витрати електро- енергії, кВт·год.	Трудові витрати, люд.·год.	Витрати на електро- енергію, грн.	Витрати на працю, грн.	Витрати на аморти- зацію, грн.	Витрати на ремонт і ТО, грн.	Загальні витрати, грн.	
																			Базове насінництво соняшнику (ста)
Катрування	Первинне очищення	Аеро- динамічний сепаратор	34,245	0,297	2,63	93,8	3,2	1,096	115,3	1	70	303,2	115,3	876,37	4439,12	1008,89	1008,89	1008,89	7333,28
		Вібро- решітний сепаратор	32,121	0,351	1,26	93,1	3,9	1,253	91,5	1	120	115,3	91,5	333,24	3523,30	1372,71	1372,71	1372,71	6601,96
	Вібро- решітний сепаратор	29,905	0,351	1,26	93,1	3,9	1,166	85,2	1	120	107,4	85,2	310,25	3280,19	1278,00	1278,00	1278,00	6146,42	
	Вібро- пневматичний сепаратор	27,842	0,356	2,98	93,5	3,5	0,974	78,2	1	150	233,1	78,2	673,53	3010,96	1466,38	1466,38	1466,38	6617,25	
	Фото-електронний сепаратор	26,032	0,098	1,28	93,2	3,8	0,989	265,6	1	250	340,0	265,6	982,63	10226,83	8301,00	8301,00	8301,00	27811,45	

Таблиця Ц.2 – Технологічна карта і техніко-економічні показники раціональної прецизійної технологічної лінії
сепарації насінневого матеріалу соняшнику при виконанні селекційно-насінницького процесу

Насінництво	Процес	Машина/ технічний засіб	Маса матеріалу, т	Продуктивність, т/год	Споживаема потужність, кВт	Очищене насіння сумш. %	Врата ліквідного насіння %	Маса втраченого ліквідного насіння, т	Тривалість роботи, год	Персонал, люд.	Вартість машини, тис. грн.	Витрати електро- енергії, кВт/год	Трудові витрати, люд.-год	Затрати на електро- енергію, грн.	Затрати праці, грн.	Затрати на аморти- зацію, грн.	Затрати на ремонт і ТО, грн.	Затратні витрати, грн	
																			Базове насінництво соняшнику (супер еліта)
Катірування	Катірування	Адаптивний аеродинамічний сепаратор	0,300	0,114	1,63	95,8	1,2	0,004	2,6	1	105	4,3	2,6	12,40	101,32	34,54	34,54	34,54	182,79
		Адаптивний віброрешітний сепаратор	0,287	0,189	1,34	94,9	2,1	0,006	1,5	1	180	2,0	1,5	5,89	58,54	34,21	34,21	34,21	132,86
		Адаптивний вібропневматичний сепаратор	0,273	0,131	3,13	95,4	1,6	0,004	2,1	1	225	6,5	2,1	18,84	80,19	58,58	58,58	58,58	216,19
Типування	Типування	Удосконалений фотоелектронний сепаратор	0,260	0,038	1,20	95,7	1,3	0,003	6,9	1	525	8,2	6,9	23,76	263,73	449,54	449,54	449,54	1186,56
		Пристрій для автоматичного фенотипування насіння	0,249	0,005	0,50	100	0,0	0,000	49,8	1	0	24,9	49,8	72,02	1918,82	0,00	0,00	0,00	1990,84

Додаток Ш


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних культур
Національної академії аграрних наук
України

 І.А. Шевченко
« 15 » _____ 20 19 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Приватного
підприємства «Агромех плюс»

 Б.Т. Потеруха
« 15 » _____ 20 19 р.

**А К Т**

**про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи**

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, яка була виконана кандидатом технічних наук Алієвим Ельчином Бахтияром огли впроваджені і використані на виробництві Приватного підприємства «Агромех плюс» (ЄДРПОУ 35740275, м. Дніпро, Донецьке шосе, буд. 7, кв. 59).

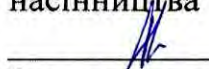
Приватним підприємством «Агромех Плюс» в особі заступника директора Дніпровського Г.І. отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка фотоелектронного сепаратора, який розроблено згідно науково-дослідної роботи «Розробити сепаратор насінневого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U4214005, 2016-2018 рр.) в Інституті олійних культур НААН під керівництвом кандидатом технічних наук, завідувачем відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієвим Е.Б.

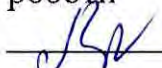
Отримана конструкторська та технічна документація буде використовуватися для виготовлення дослідних зразків вищезазначеного обладнання для проведення дослідно-виробничих випробувань.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ІОК НААН

Завідувач відділу техніко-
технологічного забезпечення
насінництва

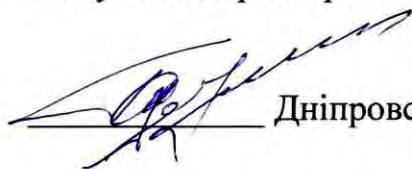
 Е.Б. Алієв
В.о. заступника директора з наукової
роботи

 К.В. Ведмедева

« 15 » _____ 20 19 р.

Від ПП «Агромех плюс»

Заступник директора

 Дніпровський Г.І.

« 15 » _____ 20 19 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Товариства з обмеженої
відповідальністю «Атлант-Запоріжжя»
(ТОВ «Атлант-Запоріжжя»)



В.І. Харитонов

М.П.

0272294

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних
культур Національної академії
аграрних наук України
(ІОК НААН)



І.А. Шевченко

М.П.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідної роботи (НДР)
у виробництво

м. Запоріжжя

«20» лютого 2018 р.

с. Сонячне

Ми, що нижче підписалися, директор ТОВ «Атлант-Запоріжжя» – Харитонов В.І. та представник ІОК НААН – завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієв Е.Б. склали цей акт в тому, що ІОК НААН розробив, а ТОВ «Атлант-Запоріжжя» прийняло для впровадження у виробництво науково-технічну продукцію – комплекти конструкторської та технічної документації на експериментальні зразки адаптивного аеродинамічного сепаратора, адаптивного віброрешітного сепаратора і адаптивного вібропневматичного сепаратора, які розроблені в рамках виконання НДР 15.02.03.01.Ф «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур» (№ДР 0116U003095).

В результаті аналіз документації встановлені основні переваги запропонованих конструкцій. Використання вищезазначених адаптивних сепараторів дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових або насінневих сумішей за аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами і об'ємною масою з більш високою продуктивністю, якістю і зменшеною трудомісткістю.

Від ТОВ «Атлант-Запоріжжя»
Директор


В.І. Харитонов

Від ІОК НААН
Завідувач відділу техніко-
технологічного забезпечення
насінництва

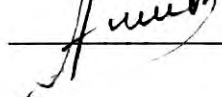
Е.Б. Алієв

Заступник директора з насінництва

П.Ф. Балабай

ЗАТВЕРДЖУЮДиректор Інституту олійних культур
Національної академії аграрних наук
України
І.А. Шевченко
«19» 02 2018 р.**ЗАТВЕРДЖУЮ**Директор Товариства з
обмеженою відповідальністю
«СНЕК ПРОДАКШН»
О.В. Буякіна
«19» 02 2018 р.**А К Т****про використання результатів дослідження**

Ми, що нижче підписалися, представник Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієв Ельчин Бахтияр огли, з однієї сторони, і представник Товариства з обмеженої відповідальністю «СНЕК-ПРОДАКШН» (ТОВ «СНЕК-ПРОДАКШН») провідний фахівець із зберігання насіння ТОВ «СНЕК-ПРОДАКШН» Коркодола Максим Миколайович, з другої сторони, склали цей акт про те, що при виконанні науково-дослідних робіт згідно Договору № 2 від 31.01.2018 р. і відповідного технічного завдання розроблені Алієвим Е.Б. «Методика з визначення можливих максимальних втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищені та розділені» і алгоритми розрахунку, які реалізовані в програмному пакеті Microsoft Excel передані і впроваджені у виробництво ТОВ «СНЕК-ПРОДАКШН». В результаті використання результатів науково-дослідної роботи зменшено трудові витрати на розрахунки обґрунтованих втрат маси насінневої суміші кондитерського соняшнику при її очищені та розділені на технічних засобах і обладнаннях ТОВ «СНЕК-ПРОДАКШН». Розроблена методика дала змогу обґрунтувати раціональні режимні параметри калібрувальної машини ОКМФ і зерноочисного сепаратора БСХ-100 в залежності від технологічних характеристик вихідної насінневої суміші кондитерського соняшник.

Від ІОК НААНЗавідувач відділу техніко-
технологічного забезпечення
насінництва
Е.Б. Алієв

«19» 02 2018 р.

Від ТОВ «СНЕК ПРОДАКШН»Провідний фахівець
із зберігання насіння
М. М. Коркодола

«19» 02 2018 р.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР
(ІОК НААН)
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«СНЕК ПРОДАКШН»
(ТОВ «СНЕК ПРОДАКШН»)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор

ТОВ «СНЕК ПРОДАКШН»

О.В.Буякіна

«19» 02 2018 р.



ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор ІОК НААН,

д-р. тех. наук, проф.,

член-кор. НААН

І.А.Шевченко

«19» 02 2018 р.



**МЕТОДИКА З ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВИХ МАКСИМАЛЬНИХ ВТРАТ
МАСИ НАСІННЕВОЇ СУМІШІ КОНДИТЕРСЬКОГО СОНЯШНИКУ
ПРИ ЇЇ ОЧИЩЕНІ ТА РОЗДІЛЕНІ**

ПОГОДЖЕНО

Провідний фахівець

із зберігання насіння

ТОВ «СНЕК ПРОДАКШН»

М.М.Коркодола

«19» 02 2018 р.

РОЗРОБЛЕНО

Завідуючий відділом

техніко-технологічного

забезпечення насінництва ІОК НААН,

канд. тех. наук

Е.Б.Алієв

«19» 02 2018 р.

Методика розглянута і схвалена Вченою радою ІОК НААН,
протокол «1» 02 2018 р. № 2

Запоріжжя
Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконуючий обов'язки директора
Товариства з обмеженої
відповідальністю «Укрнасілляпром»
(ТОВ «Укрнасілляпром»)



Д.В. Іванов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних
культур Національної академії
аграрних наук України
(ІОК НААН)



І.А. Шевченко

м.п.

Акт

про впровадження результатів науково-дослідної роботи (НДР)

«18» грудня 2018 р.

Ми, що нижче підписалися, представник ТОВ «Укрнасілляпром» – головний технолог Зарицький О.М. та представник ІОК НААН – завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієв Е.Б. склали цей акт в тому, що ІОК НААН розробив, а ТОВ «Укрнасілляпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з виробничого контролю технологічних процесів очищення і розділення насінневого матеріалу олійних культур.

Зазначені науково-методичні рекомендації були розроблені в рамках виконання завдання 15.02.03.01.Ф «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур» (№ДР 0116U003095). Основний внесок в їх розробку вклав відповідальний виконавець НДР, канд. техн. наук Алієв Е.Б.

Прийняті рекомендації дозволили зменшити витрати електроенергії обладнання і машин для калібрування насіння на 12 % і зменшити витрати на працю на 7 %.

Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються окремими двосторонніми договорами.

Від ТОВ «Укрнасілляпром»
Головний технолог

Зарицький О.М.


Від ІОК НААН

Завідувач відділу техніко-технологічного
забезпечення насінництва

Е.Б. Алієв

Заступник директора з насінництва

П.Ф. Балабай

ЗАТВЕРДЖУЮДиректор Інституту олійних культур
Національної академії аграрних наук
України
І.А. Шевченко
«14» 03 2019 р.**ЗАТВЕРДЖУЮ**Фізична особа-підприємець
Лінчук Євгеній Володимирович
Є.В. Лінчук
«14» 03 2019 р.**А К Т****про використання результатів дослідження**

Ми, що нижче підписалися, представник Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієв Ельчин Бахтияр огли, з однієї сторони, і фізична особа-підприємець Лінчук Євгеній Володимирович (ФОП Лінчук Є.В.), з другої сторони, склали цей акт про те, що при проведенні виробничих випробувань згідно науково-дослідної роботи 15.02.03.02.П «Розробити сепаратор насінневого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U003093) встановлені раціональні залежності зміни режимних параметрів розробленого Алієвим Е.Б. фотоелектронного сепаратора від якісних характеристик вихідного насінневого матеріалу соняшнику і льону. Отримані залежності використані і прийняті ФОП Лінчук Є.В. в якості методичних засад для проведення налаштування і калібрування фотоелектронного сепаратора TAIHO 6SXZ-252 CCD COLOR SORTER. В результаті використання розроблених Алієвим Е.Б. методичних засад налаштування і калібрування фотоелектронних сепараторів встановлено питомий економічний ефект у розмірі 87 грн. на 1 тону насінневого матеріалу, який підлягає сепарації. Зазначене значення обумовлено зменшенням енерговитрат на 18,3 % і витрат на оплату праці на 12,4 %.

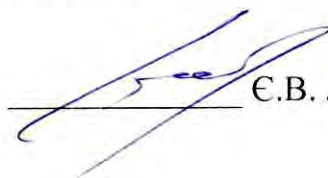
Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ІОК НААНЗавідувач відділу техніко-
технологічного забезпечення
насінництва
Е.Б. Алієв

Заступник директора з насінництва


П.Ф. Балабай«14» 03 2019 р.**Від ФОП Лінчук Є.В.**

Директор


Є.В. Лінчук«14» 03 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. заступника директора з наукової роботи Інституту олійних культур
 Національної академії аграрних наук
 України (ІОК НААН), канд. біол. наук

К.В. Ведмедева

2019 р.

**Довідка****про використання результатів дослідження**

Пристрій для автоматичного фенотипування насіння олійних культур, розроблений у відповідності з планами науково-дослідної роботи «Розробити приладовимірювальний комплекс для автоматичного фенотипування насіння олійних культур» (№ ДР 0119U100121) під керівництвом завідувача відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва ІОК НААН Алієва Ельчина Бахтияра огли, використовується при наукових дослідженнях в області селекції і генетики олійних культур.

Вищезазначений пристрій і спосіб автоматичного фенотипування насіння який покладено в його основу, зберігає точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння будь-якої культури, визначення їх форми і забарвлення, що відповідає сучасним вимірювальним засобам, та забезпечує низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками. Крім того, запропонований спосіб і пристрій для його здійснення дозволяє визначати морфологічні і маркерні ознаками (геометричний розмір, форма і забарвлення) всієї вибірки, що неможливо виконати за допомогою безпосереднього вимірювання, чим підвищує загальну продуктивність дослідження. При цьому також в значній мірі виключається вплив людського фактора на точність вимірювання морфологічних і маркерних ознак (геометричний розмір, форма і забарвлення) насіння.

Завідувач відділу агротехнологій та
 впровадження,
 д-р. біол. наук, стар. наук. співр.

О.І. Поляков

Завідувач відділу генетики та біотехнології,
 д-р. с.-г. наук, стар. наук. співр.

А.І. Сорока

Завідувач лабораторії селекції міжлінійних,
 гібридів соняшника, канд. с.-г. наук


Н.М. Кутіщева

Завідувач лабораторії селекції льону,
 канд. с.-г. наук

Ю.О. Махно

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України

 І.А. Шевченко
«28» 10 2019 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Нікертор»

 О.А. Деревенчук
«10» 10 2019 р.

**А К Т**

про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, яка була виконана кандидатом технічних наук, старшим дослідником Алієвим Ельчином Бахтияром огли впроваджені і використані на виробництві Товариства з обмеженою відповідальністю «Нікертор» (ЄДРПОУ 35923845, Запорізька обл., місто Мелітополь, пр. 50-річчя Перемоги, буд. 48, кв. 15).

Товариством з обмеженою відповідальністю «Нікертор» в особі головного інженера Зубченко Є.Ю. отримано рекомендації з ремонту і технічного обслуговування машин і устаткування для сепарації, розділення і очищення насіння олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей, конструктивно-технологічних і електричних принципових схем, які розроблені згідно науково-дослідної роботи «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U003095, 2016-2020 рр.) в Інституті олійних культур НААН.

Отримані рекомендації будуть використані для ремонту і удосконалення існуючих сепараторів різних типів (аеродинамічні, віброрешітні, вібропневматичні). Їх удосконалення буде виконуватися шляхом автоматизації керуючих елементів і раціонального узгодження їх конструктивно-режимних параметрів.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ІОК НААН


Завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва

 Е.Б. Алієв

«28» 10 2019 р.

Від ТОВ «Нікертор»

Головний інженер

 Є.Ю.Зубченко

«28» 10 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних культур
Національної академії аграрних наук
України


І.А. Шевченко
« 29 » 10 2019 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Приватного Підприємства
"ЛЕНДФОРТ ДНІПРО"


С. Буригін
« 29 » 10 2019 р.

**А К Т****про використання результатів наукових досліджень**

Ми, що нижче підписалися, представник Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Алієв Ельчин Бахтияр огли, з однієї сторони, і представник Приватного Підприємства "ЛЕНДФОРТ ДНІПРО" (ПП "ЛЕНДФОРТ ДНІПРО") головний агроном Волосок Вадим Олександрович, з другої сторони, склали цей акт про те, що розроблена Алієвим Е. Б. «Методика визначення несортованого насіння соняшнику в насінневій суміші» використовується ПП "ЛЕНДФОРТ ДНІПРО" під час закупівлі і прийомки насінневого матеріалу соняшнику різних сортів і гібридів. Методика заснована на використанні маркерних ознак насіння (форма, геометричні розміри, забарвлення та інші), які слугують для встановлення приналежності рослин до певного гібриду чи сорту.

Використання запропонованої методики дозволило запобігти отримання несортованого насіння в насінневій суміші від постачальників. Тим самим не допускаючи фальсифікацію насіння при прийомці.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ІОК НААН


Завідувач відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва


Е.Б. Алієв

« 29 » 10 2019 р.

Від ПП "ЛЕНДФОРТ ДНІПРО"

Головний Агроном


В.О. Волосок

« 29 » 10 2019 р.


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР
(ІОК НААН)

ПОГОДЖЕНО

Директор Приватного
Підприємства
"ЛЕНДФОРТ ДНІПРО"
О.С. Буригін
« 23 » 10 2019 р.


ЗАТВЕРДЖЕНО


Директор ІОК НААН,
д-р. тех. наук, проф.,
член-кор. НААН
І.А. Шевченко
« 23 » 10 2019 р.



**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ НЕСОРТОВАНОГО НАСІННЯ
СОНЯШНИКУ В НАСІННІВІЙ СУМІШІ**

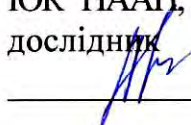
ПОГОДЖЕНО

Головний Агроном


В.О. Волосок
« 23 » 10 2019 р.

РОЗРОБЛЕНО

Завідуючий відділом техніко-
технологічного забезпечення насінництва
ІОК НААН, канд. тех. наук, старший
дослідник


Е. Б. Алієв
« 24 » 10 2019 р.

Методика розглянута і схвалена Вченою радою ІОК НААН,
протокол « 28 » 10 2019 р. № 11

Запоріжжя
2019

Додаток Ш

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с.
2. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54. No. 1. P. 129-138.
3. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 54, No. 1. P. 95-104.
4. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N. V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. Vol. 56, No. 3. P. 119-128.
5. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. Volume 12 Issue 4. P. 135-142.
6. Elchin Aliev, Viktor Pryshliak, Vitaly Yaropud. (2017). Research of physical and mechanical properties of oilseed crops. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin – Rzeszów. Vol. 19. No 3. P. 103-108.
7. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця. №2 (97). С. 19-23.
8. Алієв Е. Б., Шевченко, І. А. (2017). Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. №3 (769). С. 63-65.
9. Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під

дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. Житомир. №1 (58). Т.1 С. 173-180.

10. Алієв, Е. Б., Лабатюк, Ю. М. (2017). Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. Вип. 180. С. 67-71.

11. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2017). Результати чисельного моделювання процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. Вінниця. №4 (99). С. 18-23.

12. Алієв, Е. Б. (2017). Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією вібруючого решета. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 47. Ч. I. Кропивницький: ЦНТУ. С. 31-39.

13. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Драчов, А. В. (2017). Фізико-математична модель руху насіння по лопаті барабана вібродозатора. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка, сільськогосподарські науки, технічні науки, економічні науки*. Вип. 27. Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет. С. 97-104.

14. Алієв, Е. Б. (2017). Результати чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючого решета. *Механізація та електрифікація сільського господарства: [загальнодержавний збірник]*. Глеваха. Вип. 6 (105). С. 97-103.

15. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математична модель процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією вібруючої поверхні. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця: ВНАУ. № 1 (88). С. 54-59.

16. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б. (2018). Дослідження фотоелектронного процесу визначення забарвлення насіння олійних культур. *Техніка і технології АПК*. УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, № 4 (103). С. 40-43.

17. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого)*. Дослідницьке. Вип. 22 (36). С. 61-65.

18. Алієв, Е. Б. (2018). Результати експериментальних досліджень блока подачі фотоелектронного сепаратора насіння олійних культур. *Проблеми надійності машин: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. Вип. 192. С. 185-193.

19. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М., Гаврильченко, О. С., Кунда, В. Г. (2018). Фізико-математичний апарат взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. *Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”*. Вінниця. Вип. 3 (90) С. 5-10.

20. Алієв, Е. Б. (2018). Експериментальні дослідження процесу розділення насіння соняшнику під дією повітряного потоку. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Ukraine, Vol. 9, No. 3, P. 113-116.

21. Алієв, Е. Б., Яропуд, В. М. (2019). Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшника. *Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях”*. Вінниця. №1 (92). С. 40-47.

22. Алієв, Е. Б. (2018). Критерії оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 48. Кропивницький: ЦНТУ. С. 170-176.

23. Алієв, Е. Б., Гаврильченко, О. С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого

матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків. Вип. 201. С. 132-140.

24. Шевченко, І., Алієв, Е., Каминский Ян Р. (2019). Результати експериментальних досліджень процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшника за об'ємною вагою. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (УкрНДППВТ ім. Л. Погорілого)*. Дослідницьке. Вип. 24 (38). С. 252-259.

25. Алієв, Е. Б. (2019). Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника. *Науковий журнал «Наукові горизонти»*. № 5 (78). С. 23-30.

26. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка впровадження прецизійної технологічної лінії сепарації насінневого матеріалу соняшнику. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник*. ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха. Вип. № 9 (108). С. 81-87.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Алієв, Е. Б. (2016). Техніко-технологічне забезпечення процесів очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур. *Роль наукових досліджень в забезпеченні процесів інноваційного розвитку аграрного виробництва України. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і спеціалістів 25–26 травня 2016 р.* НААН, ДУ ІЗК НААН, М-во аграр. політики та прод. України, Укр. ін-т експертизи сортів рослин. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД». С. 4-5.

28. 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. Тернопіль: Крок, С. 219-220.

29. Алієв, Е. Б. (2018). Фізико-математичний апарат гранульованого газу шару насінневого матеріалу. *Технології АПК XXI століття: проблеми і перспективи розвитку: Зб. наукових-праць* (17-18 травня 2018 року, м. Ніжин). Ніжин. С. 285-294.

30. Алиев, Э. Б. (2018). Моделирование движения сыпучего материала под действием воздушного потока. *Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции* (Минск, 21–23 ноября 2018 года). Минск: БГАТУ. С. 126-129.

31. Алієв, Е. Б., Кутіщев, В. Л. (2016). Очищення та розділення насінневого матеріалу олійних культур. *Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. Тенденції та перспективи»* (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 134-135.

32. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., Кутіщев, В. Л. (2017). Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета. *Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур»* (16 листопада 2017 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. С. 170-171.

33. Aliiev Elchyn (2019). Research of separation of sunflower seeds on selecting surface. *Тези наукових доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розробки, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченої 85-річчю від дня народження академіка Л. В. Погорілого та 150-річчю від дня народження професора К. Г. Шиндлера.* 13 вересня 2019 року. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке. С. 90-91.

34. Aliev, E. B. (2017). Modeling of the mechanical and technological processes for the separation of oilseeds. *Internationals research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical*

sciences»: Conference Proceedings. December 27-28, 2017. Radom, Republic of Poland. Vol. 19. No 3. P. 107-110.

35. Aliiev, E. B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in aerodromic separator. *Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (26 жовтня 2018 р.)*. Запоріжжя: ІОК НААН. С. 70-71.

36. Алієв, Е., Яропуд В. (2018). *Математична модель взаємодії сипкого матеріалу із вібруючим решетом. “Вібрації в техніці та технологіях”, XVII Міжнародна науково-технічна конференція 11-12 жовтня 2018 р.: тези доповідей*. Дрогобич: Посвіт. С. 28-29.

37. Elchyn Aliiev. (2019). The results of studies of the separation of sunflower seed material by volume. *Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. 30 травн. 2019 р. Тернопіль: Крок. С. 96-98.*

38. Aliiev E. B., (2019). Results of the experimental study of separation process seeds in photoelectronic separator. *Олійні культури: інновації та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (14 травня 2019 р.)*. Запоріжжя. ІОК НААН, 2019. С. 89-90.

39. Алієв, Е. Б. (2019). Результати досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння соняшник. *Наукові читання до 100-річчя від дня народження професора Івана Вікторовича Яшовського (Матеріали міжнародної наукової конференції 14-15 серпня 2019 року, Чабани)*. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ». С. 90-92.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

40. 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.

41. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120235, МПК (2006) B07B 1/00, B07B 1/40 (2006.01), B07B 1/42 (2006.01), G05B 13/00, G05B 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.

42. Алієв, Е. Б. (2019). Патент на корисну модель України 136828, МПК B07B 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.

43. Алієв, Е. Б. (2019). Патент на корисну модель України 136829, МПК (2006) B07B 13/18, (2006.01) B07B 4/00. Фотоелектронний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № u201902091. Заявл. 01.03.2019. Опубл. 10.09.2019, бюл. № 17.

44. Алієв, Е. Б., Бакарджиєв, Р. О. (2014). Статистична оцінка показників роботи дозатора безперервної дії. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. Запоріжжя. Випуск 21. С.131-136.

45. Алієв, Е. Б. (2017). Модель системи фотоелектронного сепаратора насінневого матеріалу. *Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України»*. Вип. 14. Кіровоград, КОД. С. 135-138.

46. Алієв, Е. Б., Чеботарьов, В. П. (2018). Раціональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшника. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. Запоріжжя: ІОК НААН. С. 154-159.

47. Алієв, Е. Б. (2019). Економічна оцінка прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. *Економічний розвиток держави, регіонів і підприємств: проблеми та перспективи Зб. наук. праць*. Ніжин. С. 224-227.