

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ СІЛЬСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Алієв Ельчин Бахтияр огли**

УДК 633.85–042.52:631.362 (043.5)

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

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України.

**Науковий консультант:** Член-кореспондент НААН,  
доктор технічних наук, професор  
**Шевченко Ігор Аркадійович**,  
Інститут олійних культур  
Національної академії аграрних наук України,  
директор

**Офіційні опоненти:** Доктор технічних наук, професор  
**Завгородній Олексій Іванович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
завідувач кафедри вищої математики

Доктор технічних наук, професор  
**Котов Борис Іванович**,  
Подільський державний аграрно-технічний університет,  
професор кафедри агроінженерії і системотехніки

Доктор технічних наук, професор  
**Дідух Володимир Федорович**,  
Луцький національний технічний університет,  
завідувач кафедри аграрної інженерії

Захист відбудеться “19” лютого 2020 року о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий

“15 ” січня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Станом на кінець 2019 р. в Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, зареєстровано більше 1400 сортів і батьківських компонентів сояшнику і лише 17 % вітчизняної селекції. 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...». Посівна площа сояшнику в 2019 р. становить близько 5,8 млн. га, на яку витрачено близько 29 тис. т посівного насіннєвого матеріалу.

Створення нових високопродуктивних гібридів і сортів сояшнику, 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 витри. Існуюче обладнання для виконання технологічних процесів сепарації насіння сояшнику за морфологічними (в тому числі маркерними) показниками та фізико-механічними властивостями до встановленої сортової чистоти (98,0–99,9 %) в селекційно-насінницькому процесі вимагає великих капітальних вкладень і значних питомих експлуатаційних витрат, що підвищує собівартість насіннєвого матеріалу. Одним з 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 сояшнику в структурі систем автоматизованого керування їх конструктивно-режимними параметрами є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** 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 насіннєвого матеріалу олійних культур» (№ ДР 0116U4214005, 2016–2018 рр.), «Розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насіннєвого 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 насіннєвого матеріалу сояшнику.

### Задачі дослідження:

- розробити прецизійну технологічну лінію процесів сепарації насіннєвого матеріалу сояшнику на основі вимог до його якості та аналізу відповідного техніко-технологічного забезпечення;
- розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насіннєвого матеріалу сояшнику за аеродинамічними властивостями під дією повітряного потоку на основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень;
- розробити фізико-математичну модель механіко-технологічного процесу сепарації насіннєвого матеріалу сояшнику за геометричними розмірами під дією віброуючого 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, багатозв'язної взаємодії, лагранжевої багатозв'язності. 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.

лу 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).

**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 «Укрнасілляпром» 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 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 принципів 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.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладено у роботах [1 – 47]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [2 – 5, 7 – 9, 14, 21 – 22, 29, 39], де проведено чисельне моделювання і експериментальні дослідження технологічних процесів; [6, 11, 17, 32, 43], в яких проведено аналіз процесу і складено відповідні системи диференційних рівнянь; [19, 36, 38], де обґрунтовано технологічну лінію прецизійної сепарації насінневого матеріалу; [30], в якій запропоновано показники 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 Internationals 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 559 сторінок, у тому числі 22 додатки на 161 сторінці. Обсяг основного тексту дисертації становить 398 сторінок, містить 156 рисунків, 24 таблиці. Список використаних джерел нараховує 450 найменувань на 55 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі досліджень, представлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів наукових досліджень.

У **першому розділі** «Аналіз техніко-технологічного забезпечення процесів сепарації насінневого матеріалу. Проблеми та напрямки їх вирішення» наведено перспективність використання прецизійної сепарації насінневого матеріалу в селекційному процесі, технологічна лінія процесів очищення та розділення насінневого матеріалу, способи сепарації насінневого матеріалу, аналіз технічного забезпечення технологічних процесів очищення та розділення насіння, аналіз основних морфологічних показ-

ників і фізико-механічних властивостей насінневої суміші соняшнику, аналіз наукових досліджень процесів сепарації насіння.

Значний внесок у розвиток теоретичних і експериментальних досліджень післязбиральної обробки насіння, зокрема, її очищення, розділення і сепарації внесли такі вітчизняні та зарубіжні вчені, як Горячкін В. П., Василенко П. М., Погорілий Л. В., Заїка П. М., Гончаров Є. С., Тищенко Л. Н., Котов Б. І., Завгородній А. І., Дідух В. Ф., Ковріков І. Т., Галкин В. Д., Шевцов І. В., Сало В. М., Козаченко О. В., Харченко С. О., Захаров С. Є., Хессро М. Х., Дондокова Г. Ж., Мілохіна А. В., Перетягин Є. А., Перепелкін М. А., Пріпоров І. Є., Попов І. Ю., Ісупов В. І., Шевченко І. А., Шафоростов В. Д., Федоренко В. Ф., Чеботарьов В. П., Саїтов В. Е., Войтюк Д. Г., Пивень М. В., Thomson W., Pomerang Y., Kiratiratanapruk K., Sinthupinyo W. та інші.

Згідно Закону України «Про насіння і садивний матеріал» система насінництва складається з ланок добазового, базового і сертифікованого насіння. В результаті аналізу встановлено, селекційний процес в насінництві олійних культур висуває особливі вимоги до виконання технологічних операцій очищення, розділення та 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 насінневого матеріалу попереднього доопрацювання; машини повинні мати високу виборчу продуктивність, систему автоматизованого управління і контролю якості роботи.

Для добазового насінництва виключно стоїть завдання забирання з поля і виділення всього генетично цінного насінневого матеріалу з вороху. 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 насінневого матеріалу для подальшого якісного висіву з максимально можливою реалізацією його біологічного потенціалу.

Згідно з традиційною схемою 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 насінневого матеріалу, особливо на перших етапах селекційно-насінницького процесу. З метою зниження цих втрат та з урахуванням маси насінневого матеріалу соняшнику який підлягає сепарації запропоноване раціональне прецизійне техніко-технологічне забезпечення селекційно-насінницького процесу з елементами автоматизації. Прецизійна технологічна лінія процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику, отриманого на базі розсадників і індивідуальних ізоляторів, (рис. 1) включає ручне забирання головок соняшнику, стаціонарний або мобільний обмолот, очистку насінневого матеріалу, аеродинамічне сортування та 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.

Ефективність роботи існуючих приладових комплексів для систематизації насіння визначається оригінальною автоматизованою інформаційно-аналітичною системою поділу насінневого матеріалу соняшнику та розробляється під конкретні завдання се-

лекційних 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.

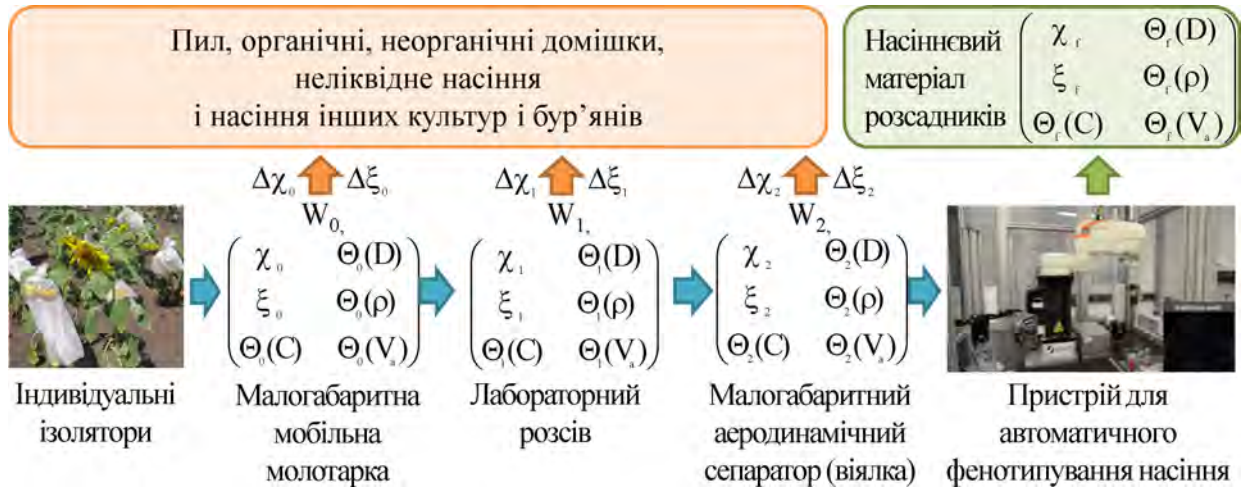


Рисунок 1 – Рациональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику розсадників

Технологічна лінія процесу збирання та доопрацювання супер елітного насінневого матеріалу соняшнику (рис. 2) включає етапи забору вороха 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 насінневого 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 фенотипом.

У другому розділі «Теоретичні дослідження процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику» наведено модель впливу агротехнологічних і техніко-технологічних параметрів на насінневу суміш і фізико-математичні моделі процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою, забарвленням та його фенотипування.

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 матриці перетворення зміни стану (фізико-механічних і морфологічних властивостей) насінневої суміші в результаті керованого фізичного впливу відповідно до рис. 1–2:

$$\begin{pmatrix} W_{st,0} \\ W_0 \\ \zeta_{st,0} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} W_{st,1} \\ W_0 \\ \zeta_{st,0} \end{pmatrix} \rightarrow W_0, \begin{pmatrix} \chi_0 & \Theta_0(D) \\ \xi_0 & \Theta_0(\rho) \\ \Theta_0(C) & \Theta_0(V_a) \end{pmatrix} \rightarrow W_1, \begin{pmatrix} \chi_1 & \Theta_1(D) \\ \xi_1 & \Theta_1(\rho) \\ \Theta_1(C) & \Theta_1(V_a) \end{pmatrix} \rightarrow W_f, \begin{pmatrix} \chi_f & \Theta_f(D) \\ \xi_f & \Theta_f(\rho) \\ \Theta_f(C) & \Theta_f(V_a) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $W$  – вологість насінневої суміші, %;  $\chi$  – вміст органічних і неорганічних домішок, %;  $\xi$  – 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  $\rho$ , %;  $\Theta(C)$  – фрак-



ційний склад за забарвленням сім'янок  $C - RGB$  або  $C - HSV$ , %; індекси  $0, i, f$  – початковий, проміжний і кінцевий стан насінневої суміші відповідно; індекс  $st$  – стеблова частина;  $\zeta$  – коефіцієнт солоmistості, %.

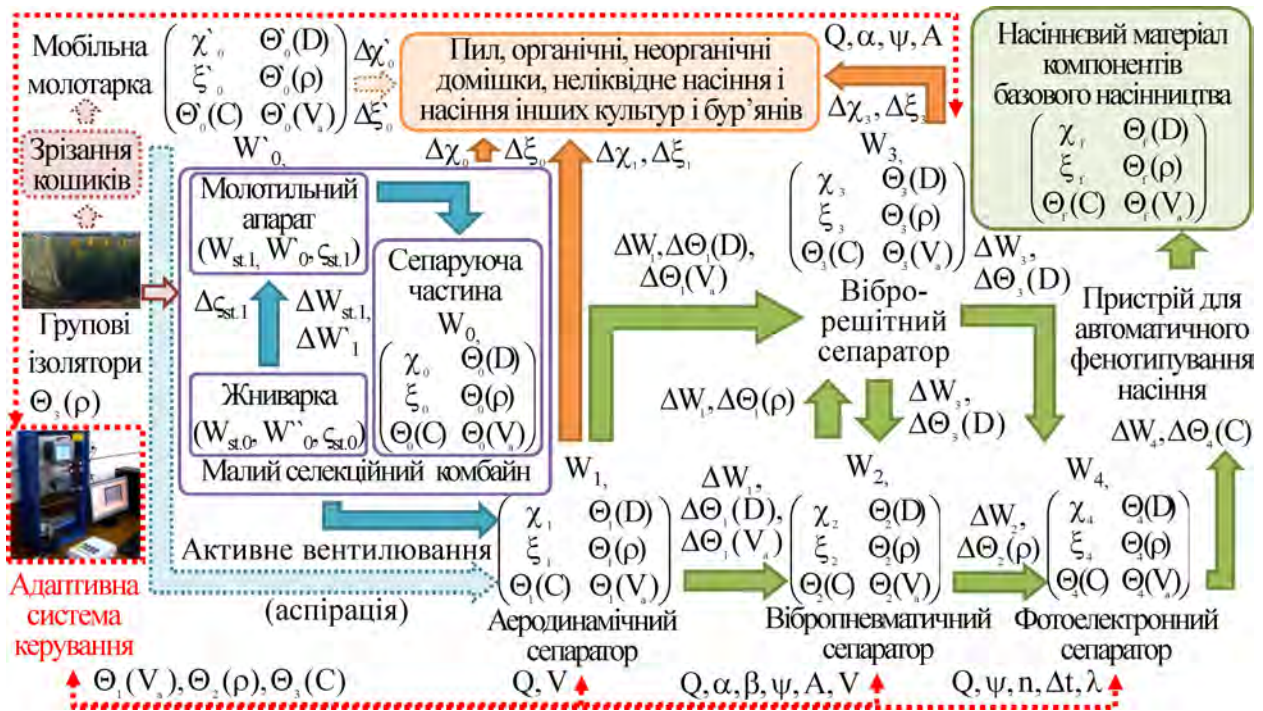


Рисунок 2 – Рациональна прецизійна технологічна лінія процесів сепарації супер елітного насінневого матеріалу соняшнику

В результаті теоретичних досліджень складено систему диференційних рівнянь руху насіння соняшнику, як гранульованого газу, під дією повітряного потоку і віброуючої поверхні з урахуванням пружно-демпферної взаємодії, що дає змогу визначити їх положення в просторі в залежності від фізико-механічних властивостей:

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

де  $\Omega_p = \pi \cdot D_p^3 / 6$  – об'єм насінини,  $\text{м}^3$ ;  $D_p$  – ефективний діаметр насінини,  $\text{м}$ ;  $\rho_p$  – щільність насінини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_a$  – щільність повітря,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\bar{V}_p$  – вектор швидкості руху насінини,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\bar{S}_p$  – вектор переміщення насінини,  $\text{м}$ ;  $\bar{g}$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\bar{V}_a$  – вектор швидкості руху повітря,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $f_M(\text{Re})$  – коефіцієнт в'язкого опору;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\bar{F}_{\text{contact}}$  – зусилля взаємодії між насінинами і поверхнею,  $\text{Н}$ ;  $K_n = 4E_{\text{eq}} \sqrt{d_n R_{\text{eq}}} / 3$  – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової,  $\text{кг}/\text{с}^2$ ;  $N_n = \sqrt{(5K_n M_{\text{eq}})} N_{n \text{ damp}}$  – нормальний коефіцієнт згасання демпферної складової,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $K_t = 8G_{\text{eq}} \sqrt{d_t R_{\text{eq}}}$  – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружної складової,  $\text{кг}/\text{с}^2$ ;  $N_t = \sqrt{(5K_t M_{\text{eq}})} N_{t \text{ damp}}$  – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферної складової,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\bar{V}_n$ ,  $\bar{V}_t$  – нормальна і тангенціальна компоненти відносної швидкості поверхні насінини в точці контакту,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $N_{\text{damp}}$  – коефіцієнт загасання;  $R_{\text{eq}} = (2/D_A + 2/D_B)^{-1}$  – еквівалентний

радіус двох насінин А і В, м;  $E_{eq} = \left( (1 - v_A^2)/E_A + (1 - v_B^2)/E_B \right)^{-1}$  – еквівалентний модуль Юнга двох насінин А і В, Па;  $M_{eq} = (M_A^{-1} + M_B^{-1})^{-1}$  – еквівалентна маса двох насінин А і В, кг;  $G_{eq} = \left( 2(2 - v_A)(1 + v_A)/E_A + 2(2 - v_B)(1 + v_B)/E_B \right)^{-1}$  – еквівалентний модуль зсуву двох насінин А і В, Па;  $d_n, d_t$  – віртуальне перекриття насінин А і В в нормальному і тангенціальному напрямках, м;  $M_A, M_B$  – маси насінин А і В (для поверхні  $M_{wall} = \infty$ ), кг;  $D_A, D_B$  – ефективні діаметри насінин А і В (для поверхні  $D_{wall} = \infty$ ), м;  $E_A, E_B$  – модулі Юнга насінин А і В, Па;  $v_A, v_B$  – коефіцієнти Пуассона насінин А і В.

Представлена система диференціальних рівнянь покладена в основу фізико-математичного апарату чисельного моделювання зазначеного процесу, який реалізовано 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. Для побудови фізико-математичних моделей прийняті припущення про те що насінини соняшнику представляються у вигляді еліпсоїдів з визначеною щільністю і ефективним діаметром.

Чисельне моделювання процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями були проведені в два етапи.

На першому етапі досліджувалася сепарація насіннєвої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки), розрахункова схема якого представлена на рис. 3. Факторами для чисельного моделювання є швидкість подачі повітря  $V$  (8–15 м/с), об'ємна маса  $\rho_p$  (140–260 кг/м<sup>3</sup>) і ефективний діаметр компонентів насіннєвої суміші  $D_p$  (3–7 мм). Потік маси насіннєвої суміші соняшнику був представлений 7 фракціями однаковою кількістю з однаковим ефективним діаметром і об'ємною масою в діапазоні 140–260 кг/м<sup>3</sup> (щільність 200–400 кг/м<sup>3</sup>). Чисельне моделювання було проведено за повним факторним експериментом із загальною кількістю дослідів – 24. Критерієм 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  $\xi(\rho)$  та безпосередньо об'ємної маси важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів від факторів чисельного моделювання.

В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) було отримано залежності масового розподілу компонентів за об'ємною масою на виходах важких і легких компонентів  $\xi_h$  і  $\xi_l$  від ефективного діаметру насіння соняшнику  $D_p$  і швидкості повітря  $V$ :

$$\xi_h = 50 - 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417 D + 0,0520833 \rho + 1,39583 V), R=0,92; \quad (3)$$

$$\xi_l = 50 + 31,831 \arctg(28,9167 + 0,260417 D + 0,0520833 \rho + 1,39583 V), R=0,93. \quad (4)$$

Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів від вищезазначених факторів досліджень (рис. 15):

$$\rho_h = -239,795 - 1,51159 D_p + 128,401 V - 11,6563 V^2 + 0,323668 V^3, R = 0,99; \quad (5)$$

$$\rho_l = -16,6528 - 1,27037 D_p + 83,8197 V - 7,73953 V^2 + 0,210855 V^3, R = 0,99. \quad (6)$$

Встановлено, що різниця між  $\rho_h$  і  $\rho_l$  практично не змінюється і складає  $58,2 \pm 2,2$  кг/м<sup>3</sup>. Отримані залежності дають змогу визначити швидкість потоку повітря  $V$  виходячи з необхідних об'ємних мас  $\rho_h$  і  $\rho_l$  та ефективного діаметру насіння соняшнику  $D_p$ .

Для реалізації другого етапу чисельного моделювання було складено розрахункову схему процесу переміщення падаючого насіння під дією повітряного потоку (рис. 4). За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні технологічні параметри: ефективний діаметр насінини  $D_p$  (3–7 мм), швидкість подачі повітря  $V$

(5–15 м/с), подача насіння  $Q$  (1–3 т/год). В зв'язку з тим, що насінини можуть бути заповнені, частково заповнені і пусті, то згідно досліджень їх щільність може змінюватися в діапазоні 200–400 кг/м<sup>3</sup> (об'ємна маса 140–260 кг/м<sup>3</sup>). Потік маси насіння був представлений 5 фракціями насіння однаковою кількістю з однаковим ефективним діаметром і щільністю в діапазоні 200–400 кг/м<sup>3</sup> (об'ємна маса 140–260 кг/м<sup>3</sup>). Чисельне моделювання було проведено за повним факторним експериментом із загальною кількістю дослідів –  $3^3 = 27$ .

В результаті розділення насіння під дією повітряного потоку розподіл кожної фракції за довжиною області може бути представлений нормальним розподілом із визначеним середнім  $\bar{x}$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  (рис. 5). Для нормального розподілу в області  $x \in [\bar{x} - 2\sigma; \bar{x} + 2\sigma]$  спостерігається ймовірність 95,45%. Відповідно до рисунку 6 найкраще розділення досягається при умові:

$$2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5 \leq \bar{x}_5 - \bar{x}_1, \text{ або} \quad (7)$$

$$\chi = (\bar{x}_5 - \bar{x}_1) / (2\sigma_1 + 2(2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4) + 2\sigma_5) \rightarrow \max, \quad (8)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт заповнення.

Вищезазначені коефіцієнт заповнення  $\chi$ , середні значення розподілу фракцій за довжиною  $\bar{x}$  та їх середньоквадратичні відхилення  $\sigma$  характеризують розміри і розташування забірних областей (забірників). Однак зазвичай в 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  $\delta$ , який визначається наступним чином. Нехай вхідний матеріал необхідно розділити на  $N$  фракцій, тоді кількість забірних областей повинна дорівнювати  $N$ . Для кожної забірної області визначається фракційний склад насінневої суміші, який математично можна представити у вигляді квадратної матриці  $N \times N$ :

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{N1} & w_{N2} & \dots & w_{NN} \end{pmatrix}; w_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m_{ij}} \cdot 100\% \quad (9)$$

де  $w_{ij}$  – масова доля фракції  $i$  в забірнику  $j$ ;  $m_{ij}$  – маса фракції  $i$  в забірнику  $j$ .

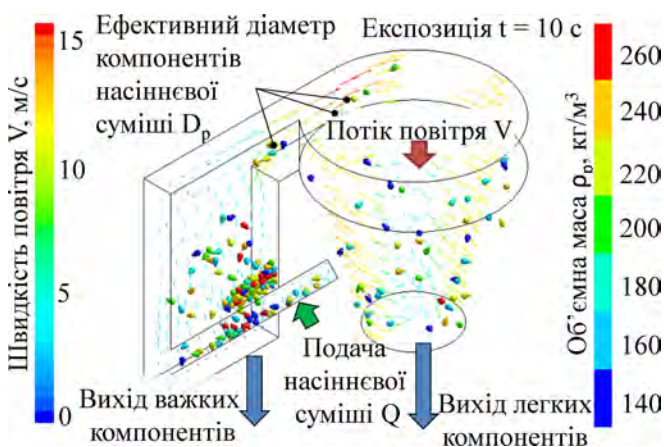


Рисунок 3 – Розрахункова схема процесу сепарації насінневої суміші на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)

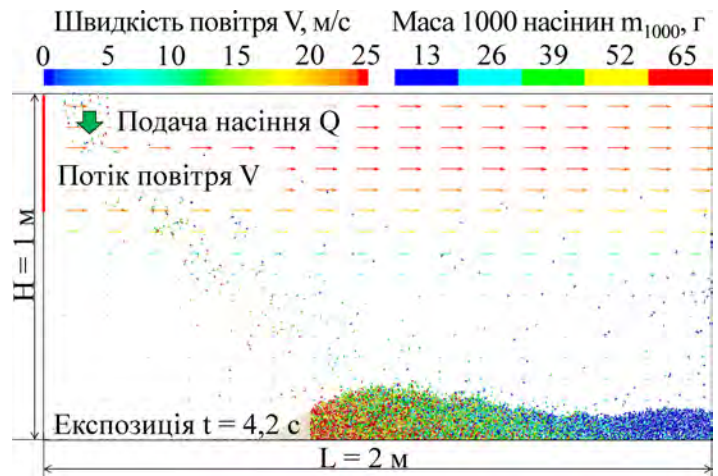


Рисунок 4 – Розрахункова схема процесу переміщення падаючого насіння під дією повітряного потоку

Коефіцієнт розподілу  $\delta$  визначається як найбільша сума діагональних елементів матриці (9):

$$\delta = \max \left( \sum_{k=1}^N w_{kk}, \sum_{k=1}^{N-1} w_{k(k+1)}, \dots, \sum_{k=1}^1 w_{k(k+N-1)}, \sum_{k=1}^{N-1} w_{(k+1)k}, \dots, \sum_{k=1}^1 w_{(k+N-1)k} \right); \quad (10)$$

де  $k$  – натуральне число.

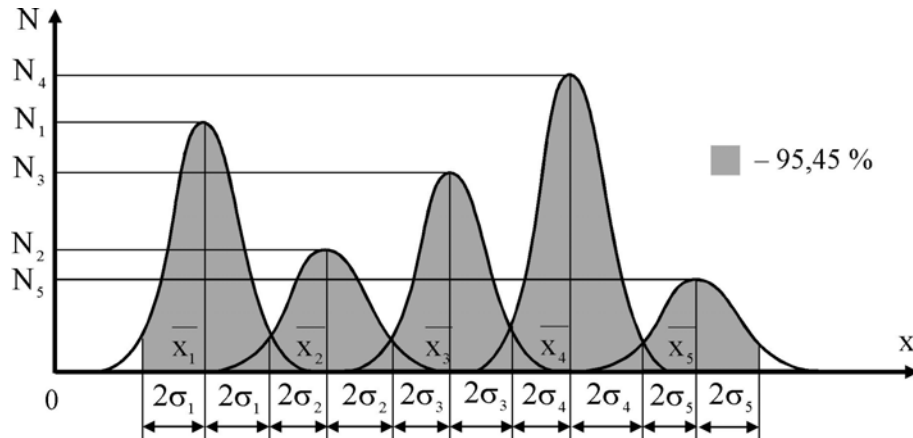


Рисунок 5 – Функції нормального розподілу кожної фракції за довжиною області

У результаті чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією повітряного потоку отримані залежності розподілу кожної фракції насіння за довжиною області (середнє значення  $\bar{x}$ ; середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ ; коефіцієнт заповнення  $\chi$ ; коефіцієнт розподілу  $\delta$ ) від ефективного діаметра насінини  $D_p$ , швидкості подачі повітря  $V$  та подачі насіння  $Q$  (рис. 16):

$$\chi = 0,489163 + 0,0125713 D_p - 0,00711689 D_p^2 - 0,0642273 Q - 0,00346568 \times D_p Q - 0,025941 V + 0,00683085 D_p V + 0,00479817 Q V - 0,00138784 V^2; \quad (11)$$

$$\delta = 83,2606 - 2,89786 D_p - 1,05729 D_p^2 + 3,71835 Q - 1,67698 Q^2 - 2,64955 V + 1,28688 D_p V + 0,298956 Q V - 0,219139 V^2. \quad (12)$$

За умови максимуму коефіцієнта заповнення  $\chi$  і коефіцієнта розподілу  $\delta$  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.

Для реалізації чисельного моделювання процесу переміщення насіння соняшнику під дією вібруючого решета було складено розрахункову схему, яка покладена в основу роботи різноманітних насінночисних і калібруючих машин (рис. 6).

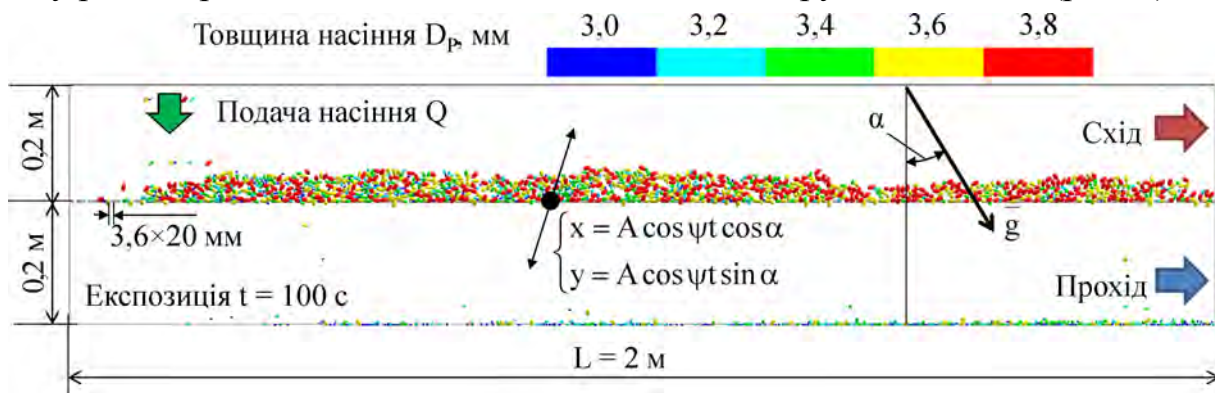


Рисунок 6 – Розрахункова схема процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета

Згідно з вимог, які ставлять селекціонерами, найбільш ліквідною фракцією для насіння соняшнику є «фракція 3,6+» (схід решета  $3,6 \times 20$  мм). Тому подальші дослідження проведені на базі вищезазначеного решета. Відносна корисна площа решета

складала 0,56. Решето виконує періодичний рух за законом:  $x = A \cos \psi t \cos \alpha$ ,  $y = A \cos \psi t \sin \alpha$ , де  $A$  – амплітуда коливань, м;  $\psi$  – частота коливань,  $\text{с}^{-1}$ . 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 знаходилася в діапазоні 37,78–143,68 г. За фактори чисельного моделювання були прийняті найбільш вагомні режимно-технологічні параметри: подача насіння  $Q$  (1100–2100 кг/год), кут нахилу решета  $\alpha$  (1–7°), частота коливань решета  $\psi$  (4–6  $\text{с}^{-1}$ ), амплітуда коливань решета  $A$  (0,008–0,012 м). Кут нахилу решета  $\alpha$  задається шляхом зміни кута нахилу прискорення вільного падіння  $\bar{g}$ , що є абсолютно тотожним. Чисельне моделювання було проведено за повним факторним експериментом 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)  $\theta^c$  та пройшло крізь нього (прохід)  $\theta^n$ . В зв'язку з тим, що розмір отвору решета був прийнятий  $3,6 \times 20$  мм, необхідною умовою якісного розділення насінневої суміші була 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 сходу, яка розраховується за формулою:

$$\theta = \theta_{D_p=3,6}^c + \theta_{D_p=3,4}^c + \theta_{D_p=3,2}^c + \theta_{D_p=3,0}^c \quad (13)$$

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

$$q = q^n + q^c \quad (14)$$

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючого решета отримані залежності зміни сумарної концентрації  $\theta$  і продуктивність  $q$  від подачі насіння  $Q$ , кута нахилу решета  $\alpha$ , частоти коливань решета  $\psi$  і амплітуди коливань решета  $A$  (рис. 17):

$$q = -6637,82 + 162,22 \alpha + 33577,7 A + 0,013423 Q + 2433,85 \psi - 32,444 \alpha \psi + 0,140125 Q \psi - 227,453 \psi^2; \quad (15)$$

$$\theta = 198,853 - 1,733 \alpha - 14055,2 A + 284999 A^2 + 0,00852581 Q - 39,653 \psi + 0,303737 \alpha \psi + 1364,8 A \psi - 0,00170516 Q \psi + 2,27037 \psi^2. \quad (16)$$

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  $\theta$  повинна бути максимальною  $\theta = 10,83$  %, а  $\alpha = 1^\circ$ ,  $\psi = 5,62 \text{ с}^{-1}$ ,  $A = 0,012$  м.

Для реалізації чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією вібруючої поверхні було складено розрахункову схему (рис. 7). Поверхня виконує періодичний рух за трьома координатами за законом:  $x = A \cos \psi t \cos \alpha \cos \beta$ ,  $y = A \cos \psi t \sin \alpha \cos \beta$ ,  $z = A \sin \psi t \sin \beta$ , де  $A$  – амплітуда коливань, м;  $\psi$  – частота коливань,  $\text{с}^{-1}$ . Кути нахилу решета  $\alpha$  і  $\beta$  задаються 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  $Q$  (1000–1800 кг/год), кути нахилу решета  $\alpha$  і  $\beta$  (1–5°), частота коливань решета  $\psi$  (5–10  $\text{с}^{-1}$ ), амплітуда коливань решета  $A$  (0,005–0,015 м) і швидкість потоку повітря  $V$  (3–4 м/с). Чисельне моделювання було проведено з використанням не композиційного плану Бокса-Бенкіна для 6 факторів. Тривалість експозиції

складала 100 с. За якісні критерії досліджень було обрано коефіцієнт заповнення  $\chi$  і коефіцієнт розподілу  $\delta$ , які визначалися за формулами (7)–(10). За кількісний критерій оцінки ефективності процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією віброуючої поверхні було прийнято продуктивність на виході  $q$ .

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу соняшнику під дією віброуючої поверхні отримані залежності зміни коефіцієнта заповнення  $\chi$ , коефіцієнта розподілу  $\delta$  і продуктивності  $q$  від подачі насіння  $Q$ , кутів нахилу віброуючої поверхні  $\alpha$  та  $\beta$ , частоти коливань  $\psi$ , амплітуди коливань  $A$  і швидкості повітряного потоку  $V$  (рис. 18):

$$q = -3448,66 + 482,402 \alpha - 51,0518 \alpha^2 + 138739 A - 8373,72 \alpha A - 3,54768 \cdot 10^6 A^2 - 18,1987 \beta + 3746,37 A \beta - 0,00755229 Q + 0,094723 \alpha Q + 15,8784 A Q + 509,047 V - 28,0576 \alpha V + 385,786 \psi - 8697,01 A \psi + 0,0276348 Q \psi - 48,721 V \psi - 9,15336 \psi^2; \quad (17)$$

$$\chi = -69,5749 - 11,9369 \alpha - 7114,48 A + 35,6531 \beta - 1,13708 \beta^2 - 0,0501428 Q + 0,739384 A Q + 0,0000204407 Q^2 + 182,782 V - 7,24514 A V - 23,1227 V^2 - 43,56 \psi + 1,19056 \alpha \psi + 640,774 A \psi - 0,31971 \beta \psi - 0,001373 Q \psi + 1,431 V \psi + 1,648 \psi^2; \quad (18)$$

$$\delta = -295,934 - 10,8956 \alpha - 0,435885 \alpha^2 + 5565,86 A + 73,9266 \alpha A - 110004 A^2 + 38,5016 \beta + 0,269007 \alpha \beta - 273,603 A \beta - 1,47409 \beta^2 - 0,0345825 Q + 0,00219932 \alpha Q - 0,989529 A Q + 0,00273373 \beta Q + 0,0000172619 Q^2 + 207,328 V + 1,65037 \alpha V - 454,323 A V - 7,90544 \beta V - 24,7288 V^2 - 13,3735 \psi + 0,232407 \alpha \psi - 0,382959 \beta \psi - 0,00187299 Q \psi + 0,848669 \psi^2. \quad (19)$$

За умови забезпечення ефективності процесу розділення насіння під дією віброуючої поверхні необхідно, щоб його продуктивність  $q$  була максимальною і дорівнювала значенню подачі насіння  $Q = q = 1092$  кг/год, при цьому коефіцієнт заповнення  $\chi$  повинен бути максимальним  $\chi = 74,21$  %, а  $\alpha = 3,5$  °,  $\beta = 3,9$  °,  $\psi = 5,0$  с<sup>-1</sup>,  $A = 0,013$  м,  $V = 4$  м/с.

Для реалізації чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було складено розрахункову схему (рис. 8).

За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні технологічні параметри: подача насіння  $Q$  (30–150 кг/год), частота коливань вібрототка  $\psi$  (5–10 с<sup>-1</sup>), частота обертання барабана  $n$  (5–15 об/хв). Чисельне моделювання було проведено за повним факторним експериментом із загальною кількістю дослідів –  $3^3 = 27$ . 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 вібрототок складається з 10 однакових повздовжніх каналів, за якими переміщуються насіння. Експозиція складала 100 с.

В результаті чисельного моделювання процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було розроблено 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 вібрототка  $\psi$  і частоти обертання барабана  $n$  (рис. 20):

$$q = 37,9771 + 0,403651 Q - 0,00381064 Q^2 - 13,8361 \psi + 0,0710524 Q \psi + 1,01452 \psi^2; \quad (20)$$

$$t = 0,42485 + 0,00075 n - 0,00194734 Q + 7,0409 \cdot 10^{-6} Q^2 - 0,0555903 \psi + 0,0000534722 Q \psi + 0,00222222 \psi^2. \quad (21)$$

В результаті вирішення компромісної задачі, а саме для забезпечення ефективною 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 максималь-

ним, встановлені раціональні параметри блока подачі насіння:  $Q = q = 47,1$  кг/год,  $\psi = 10$  c<sup>-1</sup>,  $n = 12$  об/хв,  $t = 0,047$  с.

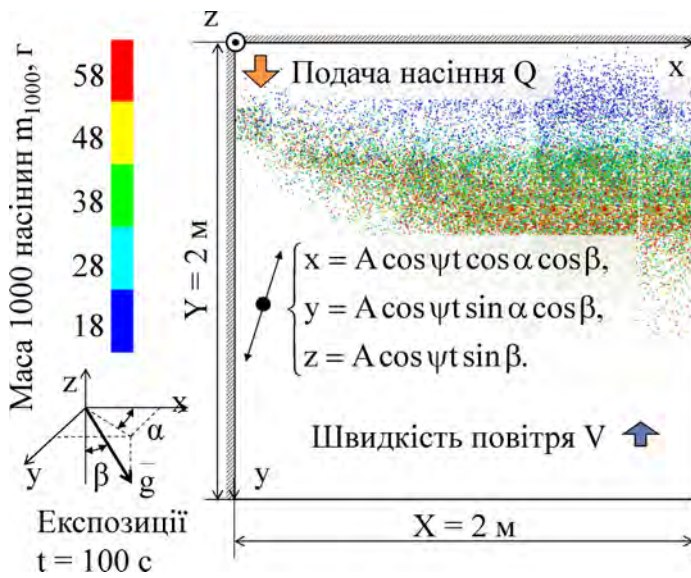


Рисунок 7 – Розрахункова схема процесу переміщення насінневого матеріалу соняшнику під дією віброуючої поверхні

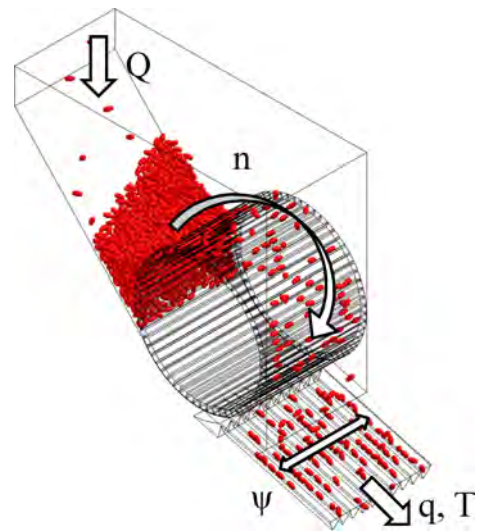


Рисунок 8 – Розрахункова схема процесу переміщення насіння під дією робочого органу блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора

Розроблена структурна модель замкнутої системи автоматичного фенотипування насіння, що реалізує принцип відбракування за кількома параметрами (забарвлення, форма, геометричні розміри) за допомогою перетворювачів зображення, які основані на визначенні забарвлення і контуру насіння у кольоровому просторі HSV.

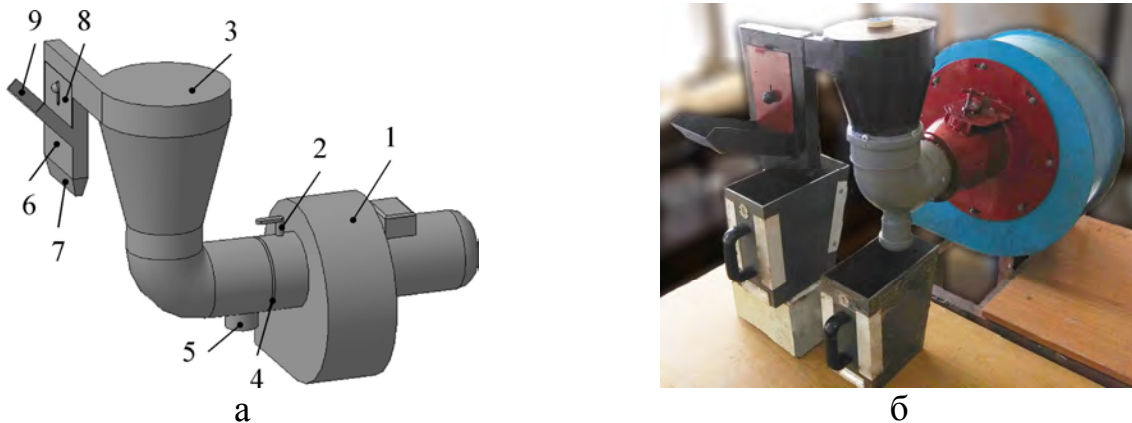
У **третьому розділі** «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» описано програму досліджень; наведено методику лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику; методики експериментальних досліджень процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою, забарвленням його околоплоддя; методику експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння; засоби статистичного оцінювання експерименту.

Для досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику була розроблена відповідна програма лабораторних досліджень, яка передбачала визначення: показників, що характеризують сипкість насіння (кут природного укусу  $\phi$ ); фрикційних властивостей насіння (статичного коефіцієнта тертя  $f$  насіння соняшнику по сталі із шорсткістю поверхні  $\sqrt[12.5]{}$ ); об'ємної маси  $\rho$ ; 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 обране насіння соняшнику селекції ІОК НААН (м. Запоріжжя): Надійний, Пріоритет, Прометей, Каменяр. Задачею лабораторних досліджень було передбачено проведення аналізу впливу вологості насіння  $W_b$  на досліджувані показники.

Експериментальні дослідження процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями були проведені в два етапи. На першому етапі досліджувалися режимні параметри розробленого малогабаритного аеродинамічного сепаратора (рисунок 9). Для забезпечення певної подачі насіння використовується відкалібрована заслінка. Задана подача повітря встановлювалася за допомогою заслінки циклону і контролювалася анемометром GM816. Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень було насіння соняшнику гібриду Пріоритет, се-

лекції ІОК НААН. Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок 200 г насіння. Об'ємна маса вихідного матеріалу складала  $202\text{--}211 \text{ кг/м}^3$ .

Факторами для експериментальних досліджень є швидкість подачі повітря  $V$  (5–15 м/с) і ефективний діаметр компонентів насінневої суміші  $D_p$  (3–7 мм), який визначається за фракційним складом. Експериментальні дослідження були проведені за повнофакторним експериментом для 2 факторів (9 дослідів) у трикратній повторності. Критерієм оцінки якості було прийнято масові концентрації  $\xi$  об'ємної маси важких  $\rho_h$  і легких  $\rho_l$  компонентів. Потужність, що витрачається приводом вентилятора визначається з використанням лічильника електроенергії NIK 2303 АРПЗ 1140.



1 – генератор повітря; 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 9 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) малогабаритного аеродинамічного сепаратора (віялки)

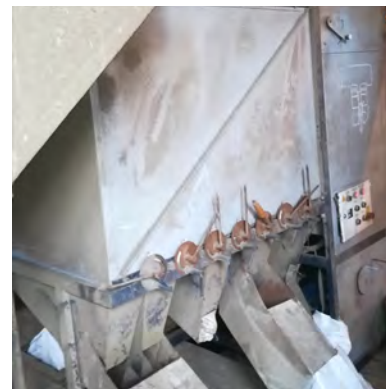
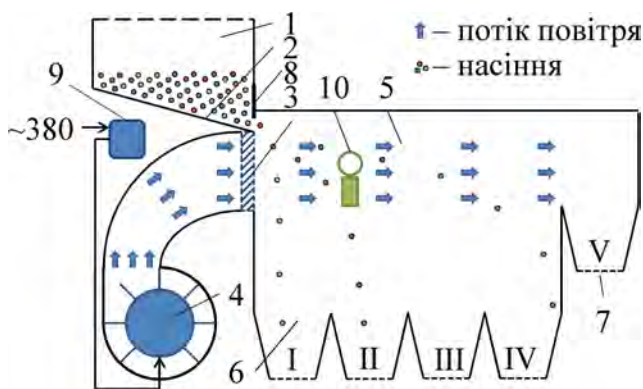
Другий етап експериментальних досліджень був проведений на установці із базою аеродинамічного сепаратора серії «Алмаз», який представлено на рисунку 10. Для забезпечення певної подачі насіння використовувалась відкалібрована заслінка, яка обмежує вхідну продуктивність. Задана подача повітря встановлювалася за допомогою частотного перетворювача (Danfoss VLT Micro Drive), а контролювалася з використанням анемометра (GM816). Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень було насіння соняшнику гібриду Пріоритет, селекції ІОК НААН, які були відкалібровані до фракції 3,2–3,4 мм. Один дослід проводився при пропусканні через установку 100 кг насіння.

Факторами для експериментальних досліджень є швидкість подачі повітря  $V$  (5–15 м/с) і подача насіння  $Q$  (1–3 т/год). В якості критеріїв оптимізації було прийнято споживану потужність –  $P$  і коефіцієнт розподілу –  $\delta$ . Потужність, що витрачається приводом вентилятора, вимірювалася з використанням однієї з додаткових функцій частотного перетворювача. Так як задачею сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією повітряного потоку є розділення на 4 фракції (заповнені  $\rho = 272 \pm 18 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_a = 7,8 \pm 0,6 \text{ м/с}$ ; частково заповнені 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  $\rho = 213 \pm 20 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_a = 5,1 \pm 0,7 \text{ м/с}$ ), то на експериментальній установці виставлено 4 забірні області. При кожному досліді визначається фракційний склад згідно з загальноприйнятою методикою і розраховується відповідний коефіцієнт розподілу  $\delta$  за формулами (9)–(10). Експериментальні дослідження були проведені за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 2 факторів (9 дослідів) у трикратній повторності.

Дослідження процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику за геометричними розмірами були проведені на експериментальному стенді на базі калібрувальної



машини ОКМФ (рис. 11). 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  $Q$  (1100–2100 кг/год), кут нахилу решета  $\alpha$  ( $1-7^\circ$ ), частота коливань решета  $\psi$  ( $4-6 \text{ с}^{-1}$ ). Згідно результатів чисельного моделювання було встановлено, що амплітуда коливань решета  $A$  не значно впливає на сумарну продуктивність  $q$  (вплив фактора – 8,1 %). Однак сумарна концентрація насіння  $\theta$  є найменшою в досліджуваному діапазоні факторів при амплітуді коливань решета  $A = 0,012$  м, що і приймає 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. 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 ваг ТВЕ-0,6 згідно з загальноприйнятою методикою. Для проведення досліджень було підібрано насінневу суміш соняшнику гібриду Пріоритет, 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 %. При кожному досліді через калібрувальну машину пропускатись 300 кг насінневої суміші соняшнику. В результаті досліджувалася концентрація кожної фракції насіння, що відбилося від поверхні решета (схід)  $\theta^c$  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.



1 – бункер; 2 – вібрлоток; 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 10 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки для дослідження процесу сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією повітряного потоку

Згідно отриманих даних визначалися залежності сумарної концентрації насіння відповідно до формули (13) та сумарної продуктивності відповідно до формули (14) від факторів досліджень. Для порівняння отриманих залежностей з теоретичними використовувався коефіцієнт кореляції. З використанням частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive визначалася залежність споживаної потужності калібрувальної машини від факторів досліджень.

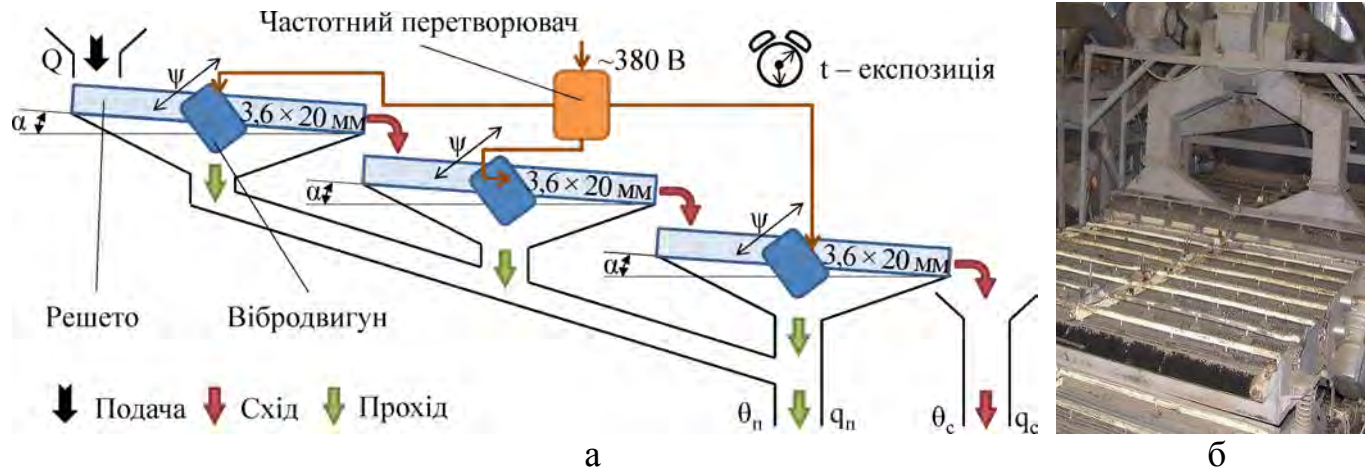
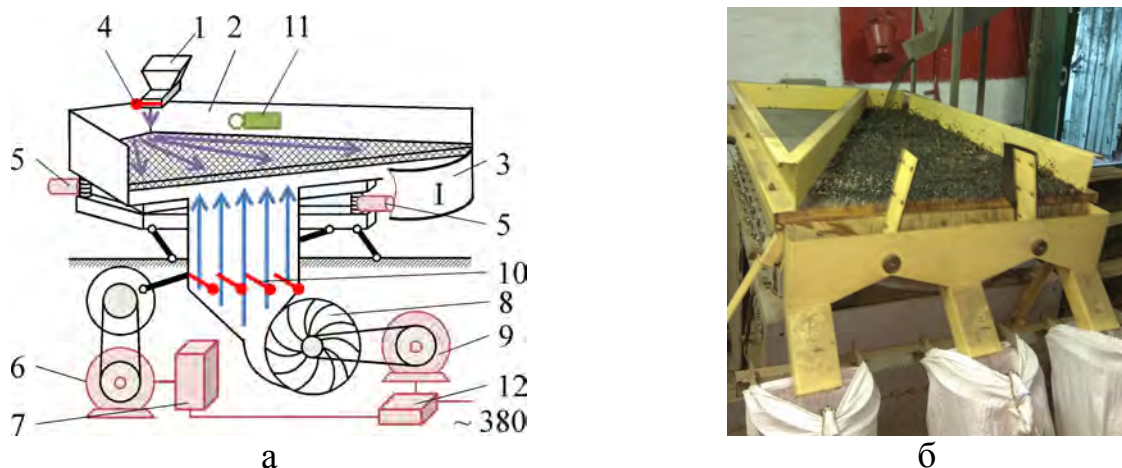


Рисунок 11 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального стенда на базі калібрувальної машини ОКМФ

Експериментальну перевірку отриманих теоретичних моделей процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою було проведено на експериментальному стенді на базі пневмовібростолу типу ПВС (рисунок 12). Подача насіння змінювалася за допомогою відкаліброваної заслінки на бункері. Кути нахилу деки пневмовібростолу встановлювалися за рахунок регулювання відповідних важелів і контролювався електронним кутоміром Digital inclinometer. Частота коливань решета пневмовібростолу прямо пропорційна частоті обертання вала асинхронного електродвигуна і змінювалася за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive. Швидкість потоку повітря крізь деку пневмовібростолу встановлювалося за допомогою заслінок, а контролювалася з використанням анемометра (GM816).



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 НІК 2303 АРПЗ 1140

Рисунок 12 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки для дослідження процесу сепарації насіння соняшнику за об'ємною масою

Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень було насіння соняшнику гібриду Пріоритет, відкаліброване до фракції 3,2–3,4 мм і містило рослинні домішки, масова частка яких складала 12,3 %. Один дослід проводився при пропусканні 100 кг насіння через експериментальний зразок блока подачі. Факторами для експериментальних досліджень є подача насіння  $Q$  (1000–1800 кг/год), кути нахилу деки  $\alpha$  і  $\beta$  (1–5 °), частота коливань  $\psi$  (5–10 с<sup>-1</sup>), швидкість повітря  $V$  (3–4 м/с). Згідно результатів чисельного моделювання було встановлено, що амплітуда коливань деки  $A$  не значно впливає на продуктивність  $q$  (вплив фактора – 7,4 %). Однак коефіцієнт заповнення  $\chi$  і коефіцієнт розподілу  $\delta$  мають оптимум при амплітуді коливань деки  $A = 0,013$  м, що і приймається в якості умови при проведенні експериментальних досліджень. В якості критеріїв оптимізації було прийнято продуктивність –  $q$ , споживану потужність –  $P$  і коефіцієнт розподілу –  $\delta$ . Продуктивність пневмовіброскола  $q$  визначалася шляхом вимірювання маси насіння  $M$ , що пройшло через нього, і відповідного часу  $\tau$ . Потужність, що витрачається установкою, вимірювалася з використанням повіреного лічильника електроенергії. Так як задачею сепарації насіння соняшнику при його переміщенні під дією віброуючої поверхні є розділення на 3 фракції (заповнені  $\rho = 263 \pm 17$  кг/м<sup>3</sup>; частково заповнені, пусті і органічні (рослинні) домішки  $\rho = 224 \pm 21$  кг/м<sup>3</sup>; голе ядро і уражене грибковими хворобами  $\rho = 301 \pm 14$  кг/м<sup>3</sup>), то на експериментальній установці виставлено 3 забірних області. При кожному досліді для кожної забірної області визначається фракційних склад згідно з загальноприйнятою методикою і розраховується відповідний коефіцієнт розподілу  $\delta$  за формулами (9)–(10). Експериментальні дослідження були проведені за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 5 факторів (45 дослідів) у трикратній повторності.

Експериментальні дослідження блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора 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). Для забезпечення певної подачі насіння використовували відкалібровану заслінку, яка обмежує вхідну продуктивність. Частоту і амплітуду вібрації вібрлотка забезпечували за допомогою зміни напруги лабораторного блока живлення, приєднаного до вібродвигуна. Обертання барабану здійснювалося з використанням двигуна постійного струму, що дозволило змінювати частоту його обертання шляхом зміни напруги. Вібрлоток складається з 20 однакових повздовжніх каналів, по яким переміщується насіння. Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень експериментального зразка блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було насіння соняшнику сортозразків колекції ІОК НААН, 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: подача насіння  $Q$  (30–150 кг/год), частота коливань вібрлотка  $\psi$  (5–10 с<sup>-1</sup>), частота обертання барабана  $n$  (5–15 об/хв). В якості критеріїв оптимізації були прийняті: продуктивність блока подачі насіння  $q$ ; споживана потужність  $P$ ; середній інтервал часу між падаючим насінням  $t$ . Продуктивність блока подачі насіння  $q$  визначалася шляхом вимірювання маси насіння  $M$ , що пройшло через нього, і відповідного часу  $\tau$ . Потужність, що витрачається блоком подачі насіння, вимірювалася з використанням повіреного електrolічильника NIK 2303 АРПЗ 1140. Середній інтервал часу між падаючим насінням визначався за допомогою фотопереривачів під'єднаних через аналого-цифровий перетворювач до персонального комп'ютера і розраховувався за формулою:

$$t = \sum_{i=1}^N t_i / N, \quad (22)$$

де  $N$  – кількість насінин;  $t_i$  – інтервал часу між двома падаючими насінинами, с.

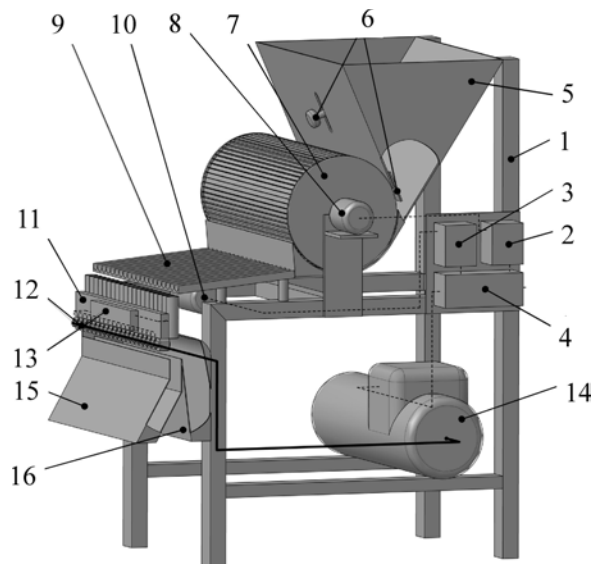
Один дослід проводився при пропусканні 10 кг насіння через експериментальний зразок блока подачі. Дослідження проводились за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 3 факторів у трикратній повторності.

Експериментальні дослідження блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора 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. В якості фактора досліджень було обрано інтервал часу між двома падаючими насінинами  $t$  від 0,03 с до 0,2 с, який задавався шляхом встановлення певних режимних параметрів блока подачі насіння. Один дослід проводився при пропусканні 10000 насінин через експериментальний зразок блока виходу. В якості критерію оцінки ефективності роботи блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора була обрана ймовірність реагування газової форсунки, яка розраховувалась за формулою:

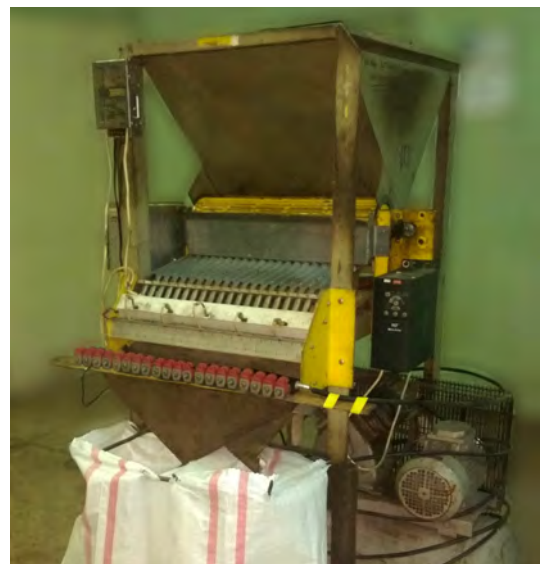
$$p = N_n / N_z, \quad (23)$$

де  $N_n$  – кількість насінин, які потрапили під потік повітря з газової форсунки, шт;  $N_z$  – загальна кількість насінин, шт.

Експериментальні дослідження фотоелектронного сепаратора насіння 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 13).



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 – вібрлоток; 10 – вібродвигун; 11 – фотоелектронна 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 13 – Конструктивно-технологічна схема (а) та загальний вигляд (б) експериментальної установки

Для забезпечення певної подачі насіння використовувалася відкалібрована за-слінка, яка обмежує вхідну продуктивність. За допомогою зміни напруги здійснюва-лася зміна частоти обертів ротора електродвигуна постійного струму і, як наслідок, барабана. Зміна частоти вібрації вібралотка здійснювалася за допомогою зміни на-пруги лабораторного блока живлення, який приєднано до вібродвигуна. Часова за-тримка спрацьовування газової форсунки і чутливість фотодатчиків фотоелектрон-ної системи реєстрації насіння змінюється за допомогою відповідних змінних резис-торів. Вихідним матеріалом при проведенні експериментальних досліджень була суміш насінин соняшнику, відкаліброваних до розміру 2,8–3,0 мм. На основі прове-дених попередніх теоретичних і попередніх експериментальних досліджень в якості найбільш вагомих факторів були обрані: подача насіння  $Q$  (3–15 кг/год), частота ко-ливань вібралотка  $\psi$  (5–10  $\text{с}^{-1}$ ), частота обертання барабана  $n$  (5–15 об/хв), часова за-тримка спрацьовування форсунки  $\Delta t$  (20–140 мс), чутливість фотодатчика  $\lambda$  (50–90 %). В якості критеріїв оптимізації були прийняті: продуктивність  $q$ , споживана потужність  $P$ , сумарна концентрація насіння  $\theta$ . Продуктивність фотоелектронного сепаратора  $q$  і споживана потужність  $P$  визначалися відповідно до методики дослі-джень блока подачі насіння. Сумарна концентрація насіння  $\theta$  – це сума масових кон-центрацій неліквідних насінин у приймальній камері ліквідних насінин і ліквідних насінин у приймальній камері неліквідних насінин. Один дослід проводився при пропусканні 10 кг насінневої суміші через експериментальний зразок блока подачі. Дослідження проводились за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого поряд-ку для 5 факторів у трикратній повторності.

Дослідження процесу автоматичного фенотипування насіння були проведені на стенді, який складався з наступних елементів: відеокамери Video Microscope Camera 1080P 16MP HDMI USB, набору світлодіодів трьох типів (червоний, зеле-ний, синій) і персонального комп'ютера. 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 насінини і передає отримані дані на персональний комп'ютер. Алгоритм програмного забез-печення складається з наступних етапів: отримання зображення з відеокамери; пере-клад зображення з колірного простору RGB в HSV; фільтрація за кольором (на-стройка колірної маски); проведення основних морфологічних перетворень – розтя-гування та звуження; знаходження контурів знайденого об'єкта; відтисовка мітки. Для реалізації алгоритму було вирішено написати програму з використанням бібліо-теки OpenCV (рис. 14).

В якості об'єкту дослідження було обрано насіння соняшнику сортозразків коле-кції ІОК НААН. Обрані насіння сортозразків соняшнику відрізнялися між собою за мар-керними ознаками, а саме за забарвленням. В якості фактору досліджень було обрано 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 (межі) насіння у вікні чорно-білого зображення розробленого програмного за-безпечення встановлювалися діапазони значень шкал кольорового простору HSV. Кри-теріями ідентифікації насінин є їх геометричні розміри (довжина  $L$ , ширина  $B$  і їх від-ношення) і гістограми розподілу кольорів областей насінин в колірному просторі RGB. В результаті досліджень слід було встановити похибку вимірювання геометричних ро-змірів, яка визначалася шляхом порівняння отриманих цифрових даних із показниками мікрометра 1 класу точності ( $\pm 2,0$  мкм). Окрім цього необхідно визначити узагальне-ний універсальний показник забарвлення насіння.

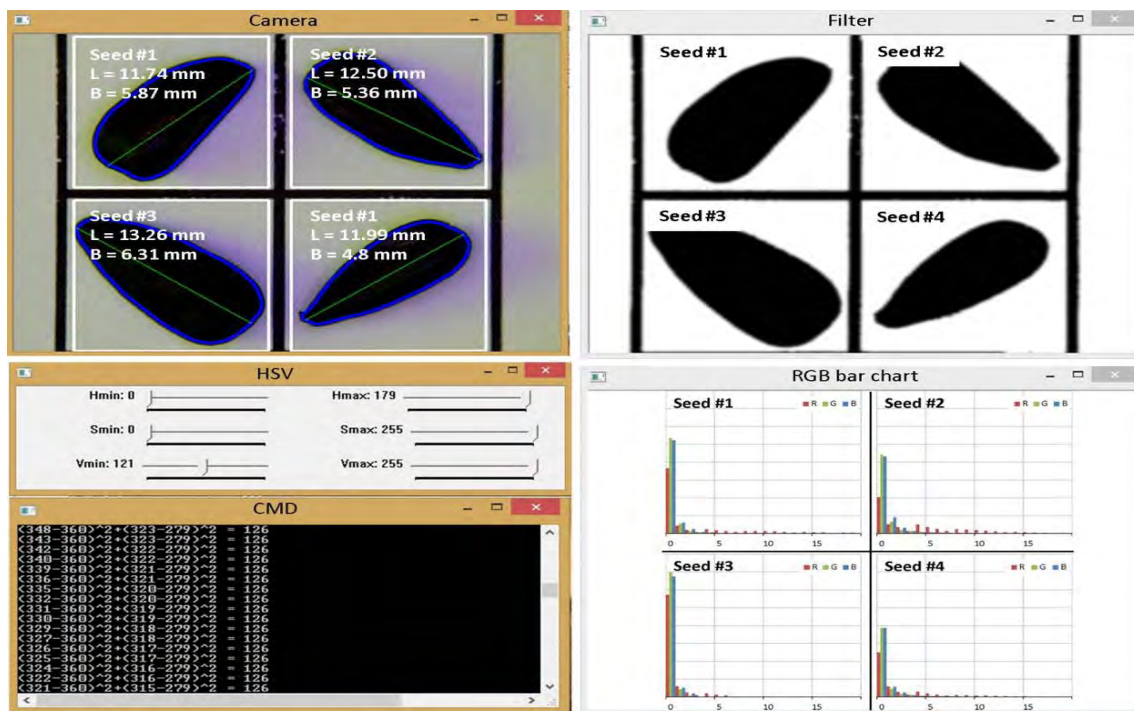


Рисунок 14 – Програмне забезпечення пристрою для автоматичного фенотипування насінневого матеріалу соняшнику

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» подано результати лабораторних досліджень фізико-механічних і морфологічних властивостей насіння соняшнику; результати експериментальних досліджень процесу розділення насінневого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями, геометричними розмірами, об'ємною масою і забарвленням; результати експериментальних досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння.

В результаті досліджень отримані залежності впливу вологості  $W_b$  насіння соняшнику сортрозривів ІОК НААН на ефективний діаметр  $D_p$ , масу 1000 насінин  $M_{1000}$ , об'ємну масу  $\rho$ , кут природного ухилу  $\varphi$ , коефіцієнт тертя  $f$ :

$$D_p = 0,0443 W_b + 6,8008, R^2 = 0,2694; \quad (24)$$

$$M_{1000} = 0,768 W_b + 67,934, R^2 = 0,7374 \quad (25)$$

$$\rho = 4,6925 W_b + 195,45, R^2 = 0,8603; \quad (26)$$

$$\varphi = 1,3148 W_b + 35,682, R^2 = 0,7987; \quad (27)$$

$$f = -0,0119 W_b + 0,6386, R^2 = 0,7809. \quad (28)$$

В результаті досліджень аеродинамічних властивостей насіння соняшнику в повітряному потоці отримані залежності зміни швидкості витання  $V_a$  від ефективного діаметру  $D_p$ :

$$V_a = 0,8067 D_p + 0,1953, R^2 = 0,7116. \quad (29)$$

З колекції соняшнику було виділено 12 груп, які відрізнялися між собою забарвленням і наявністю панцирності і антоціана (чорне, темно-коричневе, світло-коричневе, чорне з сірими смугами, світло-сіре з білими смугами, чорне з бурими смугами, чорне зі світло-сірими смугами, чорно-красне, чорно-бордове, чорне з темно-красними смугами, темно-сіре з коричневими смугами, біле).

В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації насінневого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки) перевірено адекватність теоретичних залежностей зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  (5) і легких  $\rho_l$  (6) компонентів (рис. 15) за критерієм Фішера, який складає  $F = 2,21 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$  для рівняння (5) і  $F = 2,16 < F_{0,05}(9, 18) = 2,46$  для рівняння (6) і коефіцієнтом ко-

реляції, який становить  $R = 0,953$  для рівняння (5) і  $R = 0,948$  для рівняння (6).

В результаті експериментальних досліджень механіко-технологічного процесу розділення насіннєвого матеріалу соняшнику за аеродинамічними властивостями було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала коефіцієнт розподілу  $\delta$  і споживану потужність  $P$  від подачі насіння  $Q$  і швидкості повітря  $V$  (рис. 16):

$$\delta = 54,7034 - 1,74862 Q + 3,25366 V - 0,10025 V^2; \quad (30)$$

$$P = -0,364444 + 0,199111 V. \quad (31)$$

Так як значення критерію Фішера складає  $F_{(25)} = 1,26 < F_{0,05}(5, 18) = 2,77$ ;  $F_{(26)} = 1,59 < F_{0,05}(7, 18) = 2,58$ ; то моделі (25) і (26) адекватні на 95 % рівні довірчої ймовірності. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (12) і експериментальною (30) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,86. В процесі досліджень була вирішена компромісна задача, а саме мінімізація споживаної потужності  $P$  експериментальної установки при максимальному значенні коефіцієнта розподілу  $\delta$  і подачі насіння  $Q$ :  $Q = 1,49$  кг/с,  $V = 5,49$  м/с,  $\delta = 66,9$  %,  $P = 0,72$  кВт.

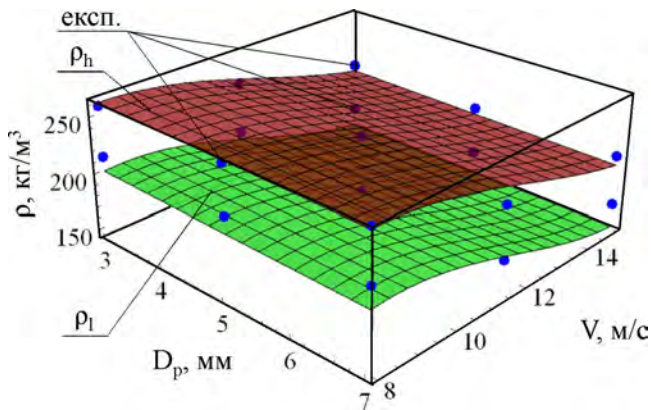
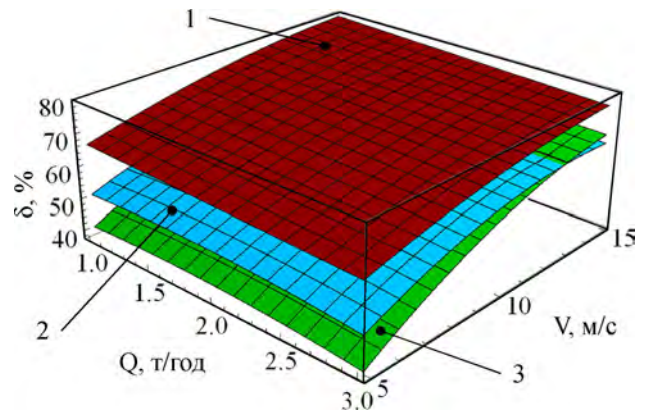


Рисунок 15 – Порівняння теоретичних залежностей зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  (5) і легких  $\rho_l$  (6) компонентів та експериментальних даних (краски) процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на малогабаритному аеродинамічному сепараторі (віялки)



1 – експериментальна залежність (30); 2 – теоретична залежність (12) при  $D_p = 6$  мм; 3 – теоретична залежність (12) при  $D_p = 7$  мм

Рисунок 16 – Залежність коефіцієнта розподілу  $\delta$  аеродинамічного сепаратора від подачі насіння  $Q$  і швидкості повітря  $V$

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  $\theta$ , продуктивності  $q$  і споживаної потужності  $P$  експериментальної установки від подачі насіння  $Q$ , кута нахилу  $\alpha$  і частоти коливань  $\psi$  решета (рис. 17):

– для пробивних решіт:

$$q = -5592,57 + 0,527369Q + 177,915 \alpha - 35,583 \psi \alpha + 2113,22 \psi - 179,262 \psi^2; \quad (32)$$

$$\theta = 109,431 + 0,008675 Q - 0,001735 \psi Q - 2,687 \alpha + 0,433 \psi \alpha - 30,9 \psi + 2,56 \psi^2; \quad (33)$$

$$P = -0,00351984 + 0,0000625 Q + 0,03125 \psi; \quad (34)$$

– для пруткових решіт:

$$q = -7202,09 + 0,706424 Q + 171,881 \alpha - 34,3762 \psi \alpha + 2670,95 \psi - 229,179 \psi^2; \quad (35)$$

$$\theta = 98,66 + 0,00845 Q - 0,00169 \psi Q - 2,311 \alpha + 0,392 \psi \alpha - 28,09 \psi + 2,33 \psi^2; \quad (36)$$

$$P = 0,0803921 + 0,000106 Q + 0,0111 \psi; \quad (37)$$

– для точних решіт:

$$q = -7277,2 + 0,642679 Q + 177,512 \alpha - 39,6273 \psi \alpha + 2721,17 \psi - 232,098 \psi^2; \quad (38)$$

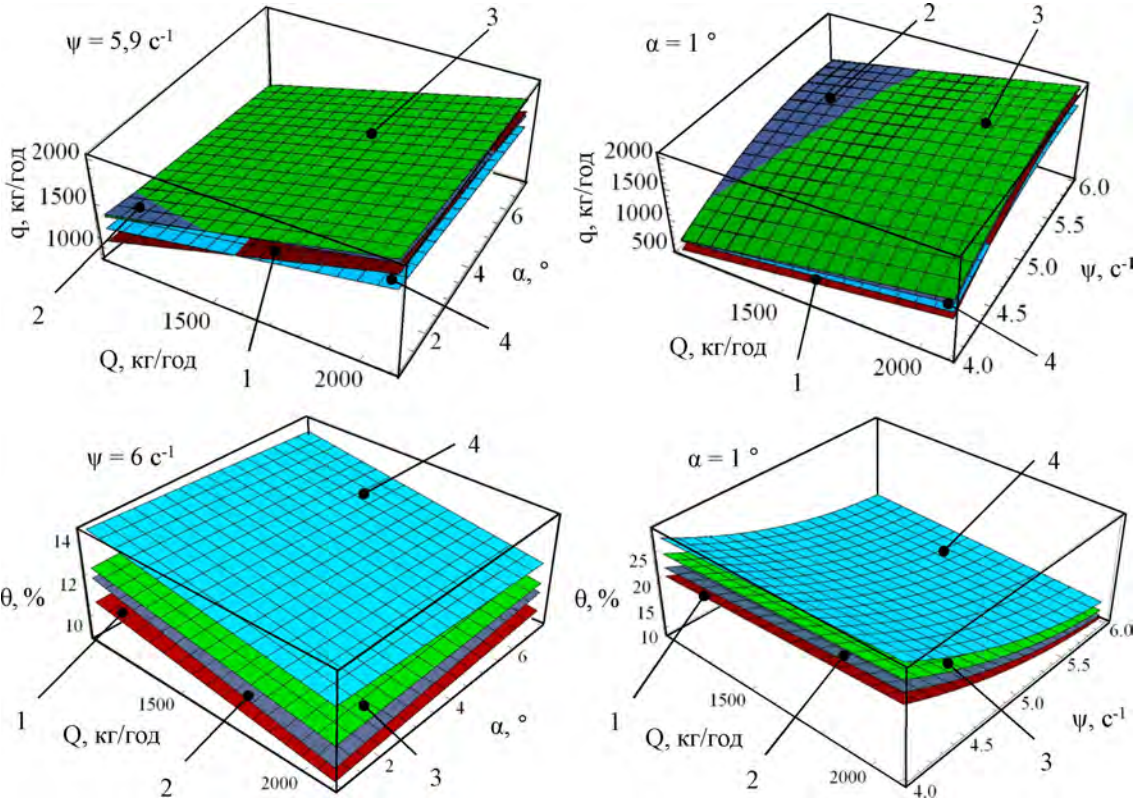
$$\theta = 88,203 + 0,01116 Q - 0,0022 \psi Q - 2,17 \alpha + 0,384 \psi \alpha - 26,265 \psi + 2,322 \psi^2; \quad (39)$$

$$P = 0,0913286 + 0,0000793333 Q + 0,0198333 \psi. \quad (40)$$

Статистичний аналіз отриманих експериментальних даних і математичних моделей (32)–(40) представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичний аналіз експериментальних залежностей за критерієм Фішера

Вид решета	Продуктивність $q$ , кг/год	Сумарна концентрація насіння $\theta$ , %	Потужність $P$ , кВт
Пробивні	$F = 1,85 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$	$F = 1,62 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$	$F = 1,34 < F_{0,05}(11, 30) = 2,13$
Пруткові	$F = 1,39 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$	$F = 1,15 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$	$F = 1,49 < F_{0,05}(11, 30) = 2,13$
Точні	$F = 1,88 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$	$F = 1,26 < F_{0,05}(8, 30) = 2,27$	$F = 1,37 < F_{0,05}(11, 30) = 2,13$



1 – дані чисельного моделювання; 2 – пробивні решета; 3 – пруткові решета; 4 – точні решета

Рисунок 17 – Залежність продуктивності  $q$  і сумарної концентрації насіння  $\theta$  калібрувальної машини від подачі насіння  $Q$ , кута нахилу решета  $\alpha$  і частоти коливань решета  $\psi$

В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику за об'ємною масою під дією віброуючої поверхні отримані залежності зміни коефіцієнта розподілу  $\delta$ , продуктивності  $q$  і споживаної потужності  $P$  експериментальної установки від подачі насіння  $Q$ , швидкості повітряного потоку  $V$ , частоти коливань деки  $\psi$ , кутів нахилу деки  $\alpha$  і  $\beta$  (рис. 18):

$$\delta = -294,326 - 9,721\alpha - 0,921938\alpha^2 + 56,3625\beta - 2,09817\beta^2 + 211,655V + 3,64629\alpha V - 10,6318\beta V - 26,6666V^2 - 20,2457\psi - 0,945367\psi^2 + 1,2V\psi + 0,986169\psi^2; \quad (41)$$

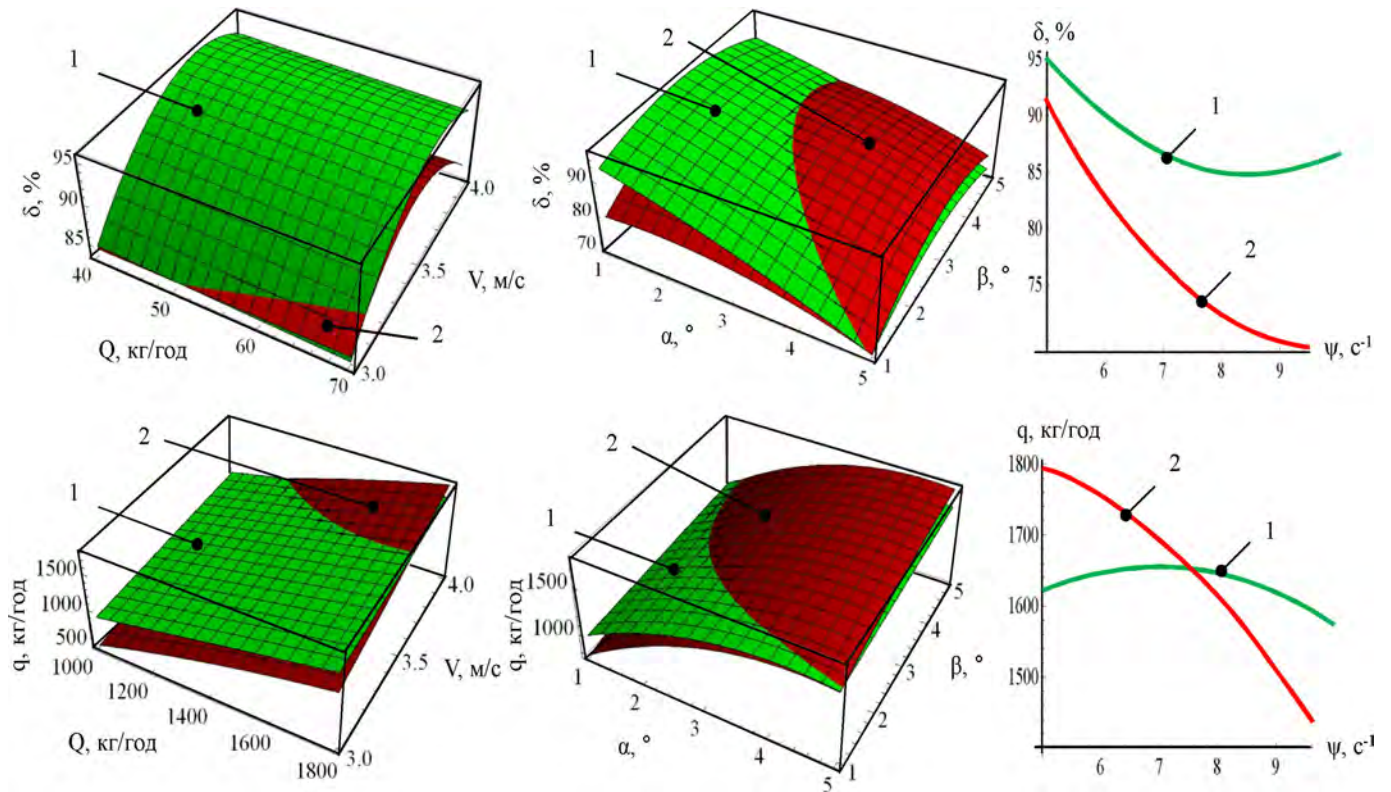
$$q = -1901,46 + 159,113\alpha - 60,3788\alpha^2 + 136,126\beta - 12,7299\beta^2 + 0,46994Q + 0,136598\alpha Q + 0,04875\beta Q - 0,000329705Q^2 - 208,153V + 42,6091\alpha V + 0,185833QV + 74,1V^2 + 370,19\psi - 7,067\alpha\psi - 13,7667\beta\psi - 51,654V\psi - 9,56714\psi^2; \quad (42)$$

$$P = 1,19276 - 0,300625\alpha - 0,00630208\alpha^2 - 0,0780208\beta - 0,011093\beta^2 + 0,000789236Q + 0,0000604167\beta Q - 3,3463 \cdot 10^{-7}Q^2 - 0,0525V + 0,06\alpha V + 0,000195833QV + 0,0936667\psi - 0,0101667\beta\psi. \quad (43)$$

Так як значення критерію Фішера складає  $F_{(41)} = 1,46 < F_{0,05}(31, 90) = 1,57$ ;  $F_{(42)} = 1,55 < F_{0,05}(26, 90) = 1,62$ ;  $F_{(43)} = 1,12 < F_{0,05}(30, 90) = 1,58$  то моделі (41)–(43) адекватні на 95 % рівні довірчої ймовірності. 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 споживана потужність пневмовібросепаратора  $P = 1,94$  кВт – найменшою. Відповідно до вищезазначеного  $\alpha = 3,8$  °,  $\beta = 4,0$  °,  $\psi = 5$  Гц,  $V = 4$  м/с. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичною (19) і експериментальною (41) залежностями при варіюванні значеннями факторів в заданому діапазоні складає 0,92.



1 – дані чисельного моделювання; 2 – експериментальна залежність

Рисунок 18 – Залежність коефіцієнта розподілу  $\delta$  і продуктивності пневмовібросіла  $q$  експериментальної установки, від подачі насіння  $Q$ , швидкості повітряного потоку  $V$ , частоти коливань деки  $\psi$ , кутів нахилу деки  $\alpha$  і  $\beta$

В результаті експериментальних досліджень блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора було розроблено математичну модель, яка зв'язала продуктивність блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора  $q$ , його споживану потужність  $P$  і середній інтервал часу між падаючим насінням  $t$  від подачі насіння  $Q$ , частоти коливань вібрототки  $\psi$  і частоти обертання барабана  $n$  (рис. 19):

$$t = 0,415665 - 0,0000461111 n^2 + 7,02933 \cdot 10^{-6} Q^2 + 0,00246598 n + 6,59722 \cdot 10^{-6} Q n - 0,000191667 \psi n - 0,00203901 Q + 0,00005625 \psi Q - 0,0498236 \psi + 0,00194889 \psi^2; \quad (44)$$

$$q = 97,4785 - 0,170222 n^2 - 0,00798765 Q^2 + 2,35944 n - 0,009 Q n + 0,247333 \psi n + 0,769931 Q + 0,166611 \psi Q - 39,405 \psi + 2,48578 \psi^2; \quad (45)$$

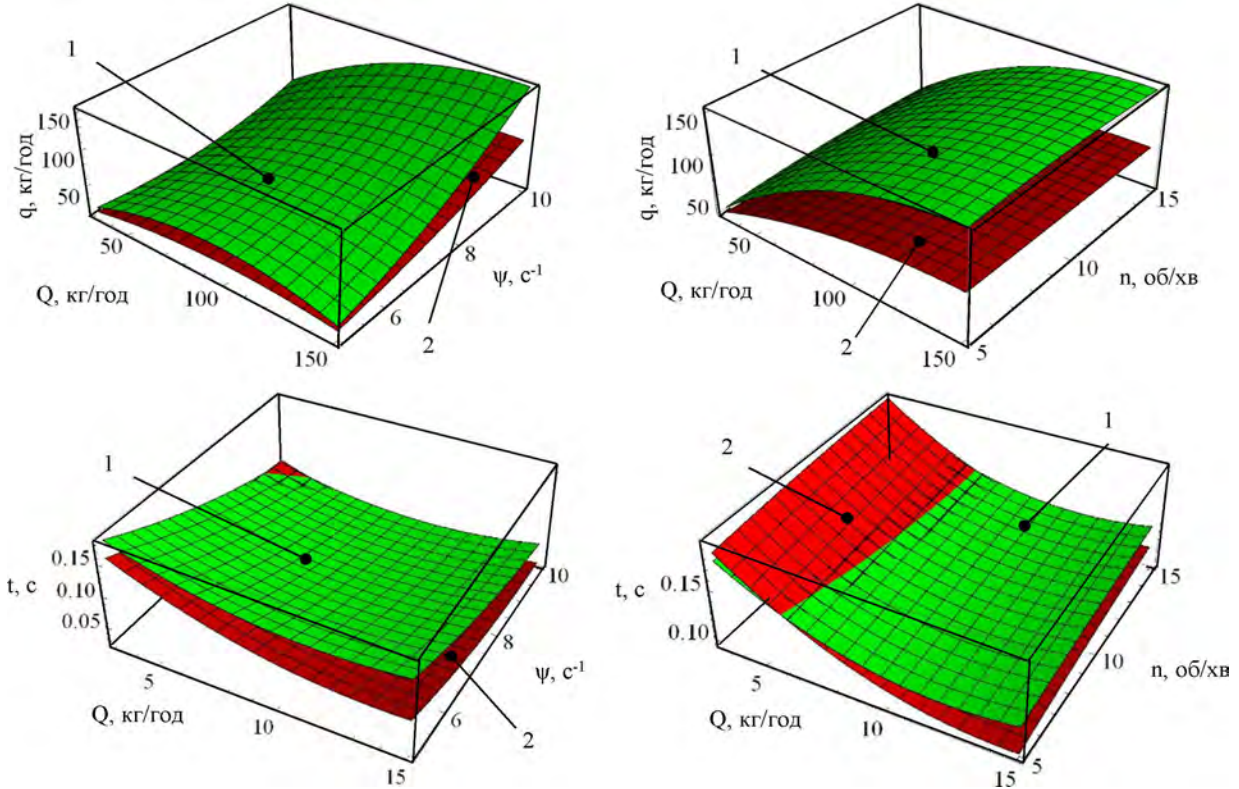
$$P = -2,0208 + 0,271667 n^2 + 0,810417 Q + 7,20833 n - 0,613333 \psi n + 13,13 \psi. \quad (46)$$

Так як значення критерію Фішера складає  $F_{(44)} = 2,12 < F_{0,05}(5, 30) = 2,53$ ;  $F_{(45)} = 1,98 < F_{0,05}(6, 30) = 2,42$ ;  $F_{(46)} = 2,11 < F_{0,05}(9, 30) = 2,21$ ; то моделі (44)–(46) адекватні на 95 % рівні довірчої ймовірності. В зв'язку з тим, що при теоретичних дослідженнях в блоці подачі насіння використовувалося 10 каналів, а при експериментальних – 20, то продуктивності будуть відрізнятися у 2 рази. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними (20)–(21) і експериментальними даними (44)–(45) при варіюванні значеннями факторів складає 0,92–0,94.

В результаті експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора встановлено експоненціальну залежність зміни ймовірності реагування газової форсунки  $p$  від інтервалу часу між двома падаючими насінинами  $t$ :

$$p = 0,939841 - 1,07229 e^{-20,9153 t} \quad (47)$$

При цьому згідно критерію Стьюдента всі коефіцієнти є значимими, а коефіцієнт кореляції складає  $R = 0,995$ .



1 – експериментальна залежність; 2 – дані чисельного моделювання

Рисунок 19 – Залежність середнього інтервалу часу між падаючим насінням  $t$  і продуктивністю  $q$  блока подачі насіння від подачі насіння  $Q$ , частоти коливань вібролотка  $\psi$  і частоти обертання барабана  $n$

В результаті експериментальних досліджень фотоелектронного сепаратора було розроблено фізико-математичну модель, яка зв'язала сумарну концентрацію насіння  $\theta$ , продуктивність фотоелектронного сепаратора  $q$  і його споживану потужність  $P$  від подачі насіння  $Q$ , частоти коливань вібролотка  $\psi$ , частоти обертання барабана  $n$ , часової затримки спрацьовування форсунки  $\Delta t$ , чутливості фотодатчика  $\lambda$  (рис. 20):

$$\begin{aligned} \theta = & 803,784 - 1,50833 n + 0,21075 n^2 - 1,70708 Q + 0,00256308 Q^2 - 3,92507 \Delta t - \\ & - 0,0103333 n \Delta t + 0,00420833 Q \Delta t - 0,010408 \Delta t^2 - 5,30823 \lambda + 0,0347552 \lambda^2 - \\ & - 86,2992 \psi - 0,248 n \psi + 0,101167 Q \psi + 0,257333 \Delta t \psi + 3,67633 \psi^2; \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} q = & 99,3576 + 1,67222 n - 0,167778 n^2 + 0,652431 Q - 0,00716049 Q^2 + 0,046875 \Delta t + \\ & + 0,00666667 n \Delta t + 0,0458333 \lambda - 0,0125 n \lambda - 0,00166667 \Delta t \lambda - 37,775 \psi + \\ & + 0,32 n \psi + 0,145 Q \psi + 0,0283333 \lambda \psi + 2,24 \psi^2; \end{aligned} \quad (49)$$

$$P = -16,9896 + 6,875 n + 0,26 n^2 + 1,06563 Q + 15,4 \psi - 0,52 n \psi - 0,0333333 Q \psi. \quad (50)$$

В процесі досліджень була вирішена компромісна задача, а саме мінімізація сумарної концентрації насіння  $\theta$  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 є:  $Q = q = 97$  кг/год;  $\psi = 8,6$  с<sup>-1</sup>;  $n = 9,7$  об/хв;  $\Delta t = 66$  мс;  $\lambda = 76,4$  %;  $P = 239$  Вт;  $\theta = 11,0$  %.

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  $F = 1,15 < F_{0,05}(91, 100) = 1,39$ .

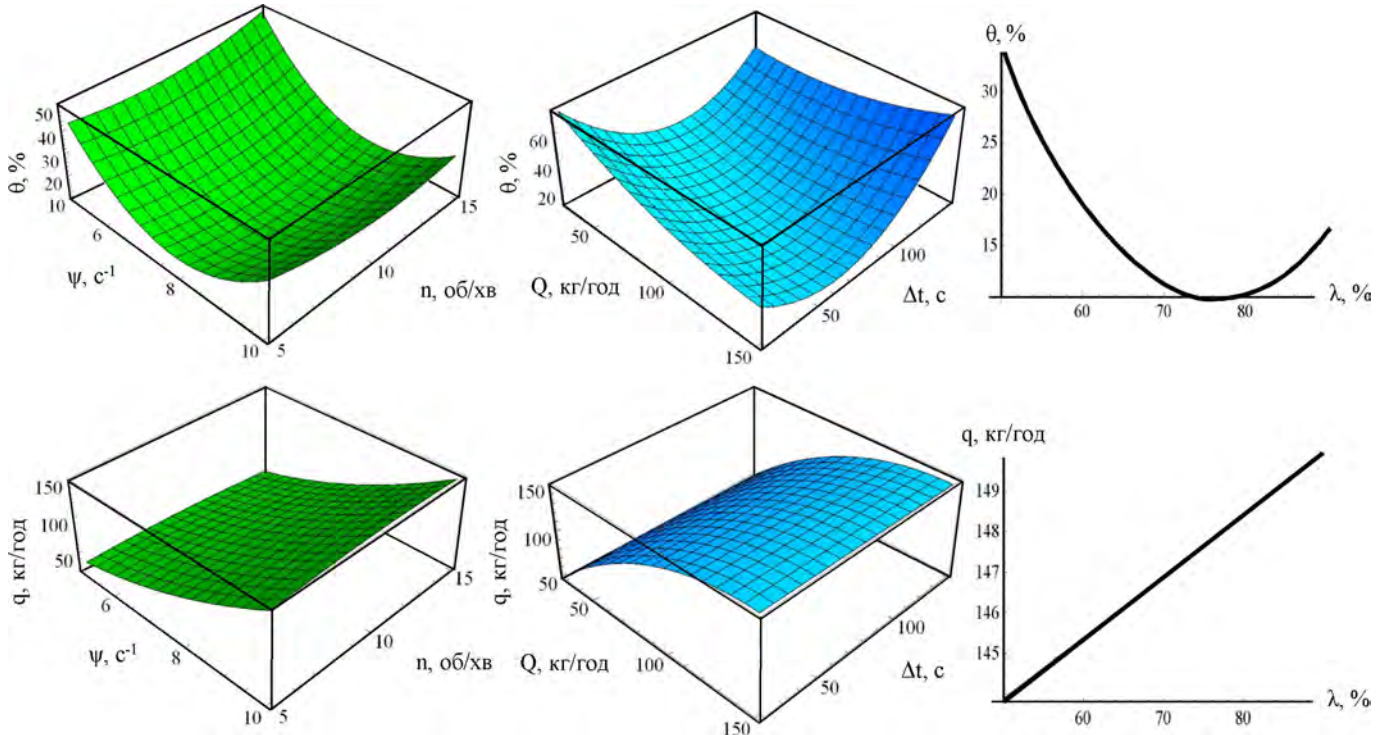


Рисунок 20 – Залежність сумарної концентрації насіння  $\theta$  і продуктивності фотоелектронного сепаратора  $q$  від подачі насіння  $Q$ , частоти коливань віброрізка  $\psi$ , частоти обертання барабана  $n$ , часової затримки спрацьовування форсунки  $\Delta t$ , чутливості фотодатчика  $\lambda$

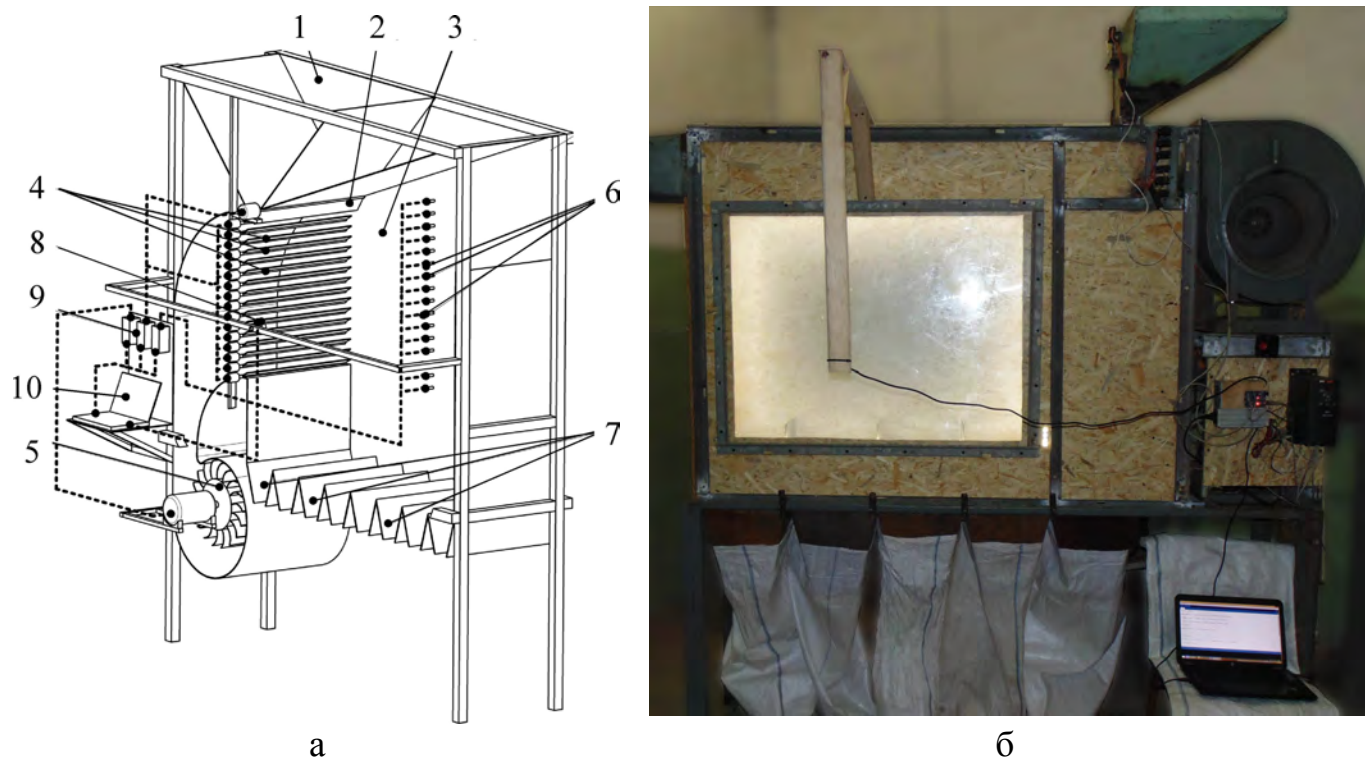
Встановлено розподіл кольорів областей насіння соняшнику різних сортозразків в колірному просторі RGB при різному освітленні. В результаті аналізу отриманих гістограм розподілу кольорів областей насіння соняшнику в колірному просторі RGB встановлено, що у випадку однорідності кольору найбільш виразно 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 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 освітленні насіння:

$$C = \begin{pmatrix} R_{1\max} & f_{R1\max} & R_{2\max} & f_{R2\max} \\ G_{1\max} & f_{G1\max} & G_{2\max} & f_{G2\max} \\ B_{1\max} & f_{B1\max} & B_{2\max} & f_{B2\max} \end{pmatrix}. \quad (51)$$

У п'ятому розділі «Реалізація результатів досліджень» наведено обґрунтування конструктивно-технологічних схем адаптивних аеродинамічного, віброрешіт-

ного, вібропневматичного, фотоелектронного сепараторів насіння соняшнику, способу та пристроїв для їх автоматичного фенотипування.

На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (11)–(12), (30)–(31) розроблено адаптивний аеродинамічний сепаратор (рис. 21), продуктивність якого складає  $q = 114 \pm 9$  кг/год, а якість сепарації (коефіцієнт розподілу) –  $\delta = 96,3 \pm 2,6$  %.



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

Рисунок 21 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора

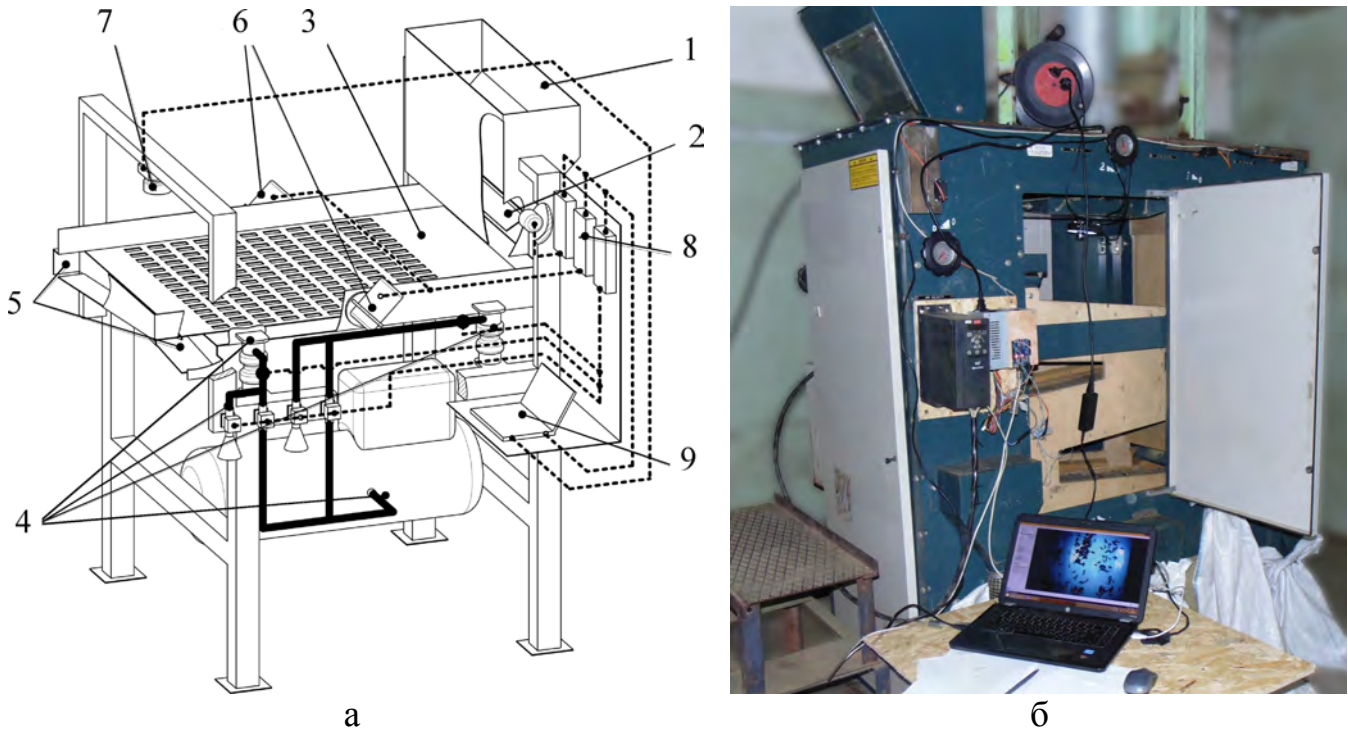
Спираючись на отримані дані чисельного моделювання встановлено, що з використанням автоматизованого каскаду заслінок можна досягти вирівнювання швидкості повітряного потоку ( $\pm 0,2$ – $0,4$  м/с) в сепараційній камері адаптивного аеродинамічного сепаратора. Однак при цьому відбувається втрата номінальної швидкості на 5–15 %. Підвищення її може бути здійснено за рахунок збільшення продуктивності генератора повітряного потоку (наприклад, за рахунок збільшення частоти обертання лопатей вентилятора).

На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (15)–(16), (32)–(40) розроблено адаптивний віброрешітний сепаратор на базі калібрувальної машини Cimbria Unigrain (рис. 22), продуктивність якого складає  $q = 189 \pm 13$  кг/год, а якість сепарації (сумарна концентрація насіння) –  $\theta = 3,4 \pm 1,3$  %.

В результаті досліджень розроблено відповідне програмне забезпечення для визначення фракційного складу насіння за фотозображенням, яке основане на перетворенні зображення з повнокольорового в чорно-біле за допомогою методу сегментації, подальшої обробки на основі морфологічних операцій із використанням детектора меж Кенні та перетворення Хафа для автоматичного визначення границь кожної насінини з наступним обчисленням довжини, ширини, площі та периметра насіння.

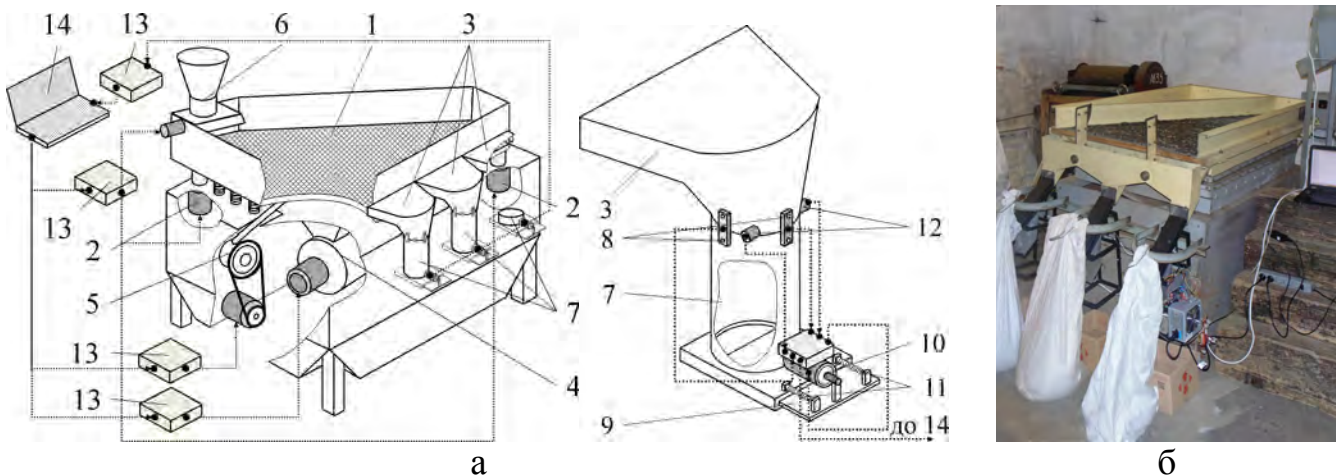
На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (17)–(19), (41)–(43) розроблено адаптивний вібропневматичний сепаратор на базі пневмовіб-

ростолу типу ПВС (рис. 23), продуктивність якого складає  $q = 131 \pm 6$  кг/год, а якість сепарації (коефіцієнт розподілу) –  $\delta = 95,5 \pm 1,5$  %. Розроблено і проведено калібрування блока вимірювання об'ємної маси адаптивного вібропневматичного сепаратора. За розрахованим критерієм Пірсона ( $\chi^2$ ) нормальність розподілу похибок вимірювань складає 2,13, що більше за табличне значення  $\chi^2(0,95;5) = 1,15$ .



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

Рисунок 22 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного віброрешітного сепаратора

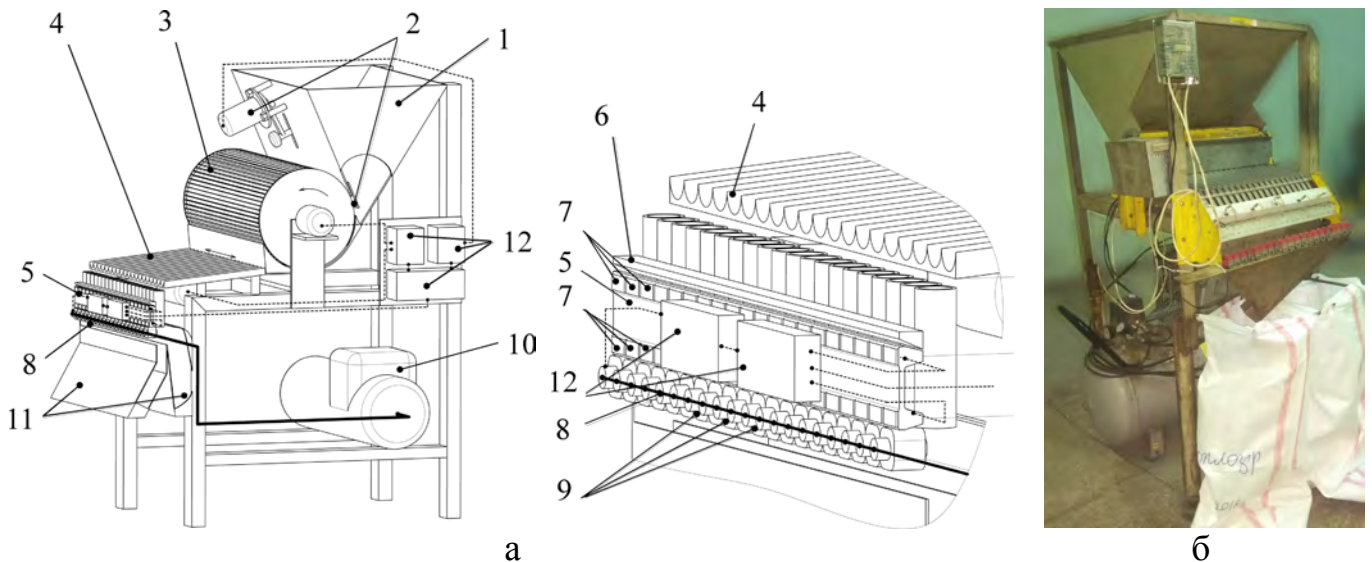


1 – дека; 2 – система регулювання кутів нахилу деки; 3 – вивантажувальні вікна; 4 – вентилятор із електроприводом; 5 – кривошипно-шатунний механізм із електроприводом; 6 – блок подачі насіння; 7 – блок вимірювання об'ємної маси; 8 – тензOMETричні датчики; 9 – заслінка; 10 – штовхаючий електромагніт (соленоїд);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

Рисунок 23 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного віброрешітного сепаратора

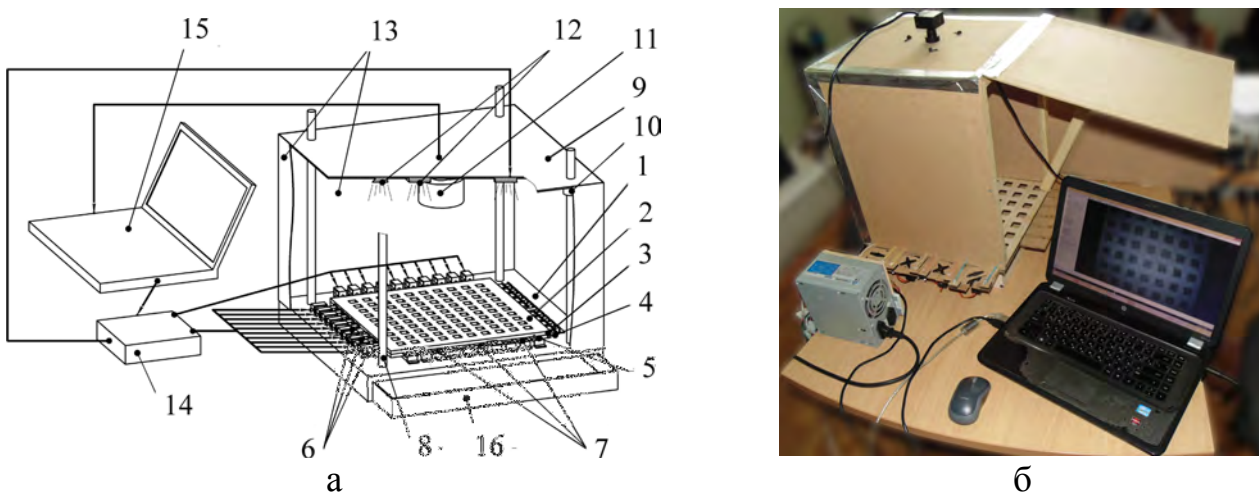
На основі отриманих залежностей (20)–(21), (48)–(50) удосконалено фотоелектронний сепаратор (рис. 24), продуктивність якого складає  $q = 38 \pm 3$  кг/год, а якість сепарації (сумарна концентрація насіння) –  $\theta = 1,2 \pm 0,1$  %.

Розроблено матричний (рис. 25) і стрічковий (рис. 26) пристрої для автоматичного фенотипування насіння, які зберігають точність індивідуального вимірювання геометричних розмірів насіння соняшнику, визначення їх форми і забарвлення та забезпечують низьку трудомісткість і високу технологічність реалізації процедури фенотипування (визначення, ідентифікації і сепарації) насіння, як селекційного матеріалу, за його морфологічними і маркерними ознаками.



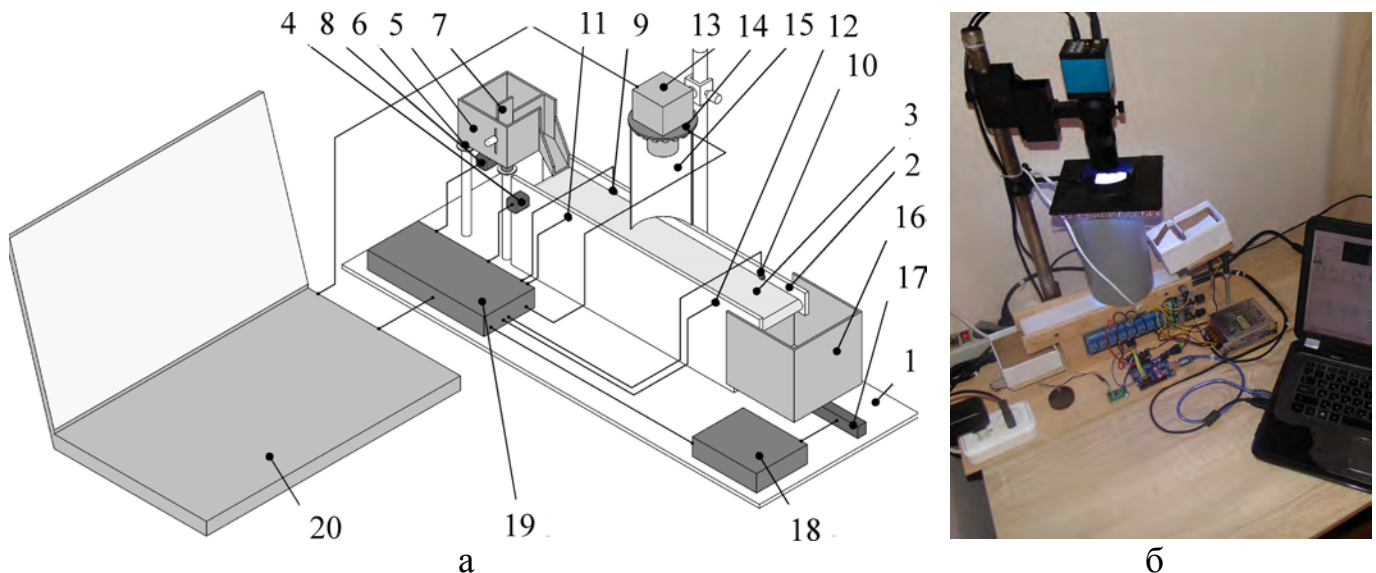
1 – бункер; 2 – заслінка із кроковим електродвигуном; 3 – барабан із радіальними лопатями з електроприводом; 4 – вібрлоток із вібродвигуном; 5 – блок реєстрації насіння; 6 – освітлювач; 7 – реєструючі і контролюючі фотоприймачі; 8 – блок виходу насіння; 9 – газові форсунки; 10 – компресор із повітряним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

Рисунок 24 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка удосконаленого фотоелектронного сепаратора



1 – рама; 2 – матриця; 3, 4 – пластини; 5 – смуги; 6 – тягучий електромагніт (соленоїд); 7 – пружина розтягування; 8 – напрямні; 9 – основа; 10 – фіксатори; 11 – фотокамера; 12 – різнокольорові лампи; 13 – стінка; 14 – блок керування; 15 – персональний комп'ютер; 16 – піддон

Рисунок 25 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) макетного зразка матричного пристрою для автоматичного фенотипування насіння



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

Рисунок 26 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) макетного зразка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння

У п'ятому розділі «Техніко-економічна оцінка результатів досліджень» наведена економічна оцінка впровадження результатів досліджень, розроблена методика визначення несортованого насіння соняшнику в насіннєвій суміші, приведено впровадження результатів у виробництво. Розрахунки показують, що пропонується 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. 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.

## ВИСНОВКИ

В роботі вирішена проблема підвищення ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику. Розроблено механіко-технологічні основи проектування систем автоматизованого керування конструктивно-режимними параметрами технічного забезпечення технологічного процесу сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. За вимогами до технологічних процесів очищення та розділення насіннєвої суміші для отримання насіннєвого 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 автома-

тизацію 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  $\xi_h$  (3) і  $\xi_l$  (4) від ефективного діаметру насіння соняшнику  $D_p$  і швидкості повітря  $V$ . Окрім цього отримані залежності зміни об'ємних мас важких  $\rho_h$  (5) і легких  $\rho_l$  (6) компонентів від вищезазначених факторів досліджень. Отримані залежності дають змогу визначити швидкість потоку повітря  $V$  виходячи з необхідних об'ємних мас  $\rho_h$  і  $\rho_l$  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  $\bar{x}$ ; середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ ; коефіцієнт заповнення  $\chi$ : (11); коефіцієнт розподілу  $\delta$ : (12), (30)) і споживаної потужності  $P$  (31) від ефективного діаметра насіння  $D_p$ , швидкості подачі повітря  $V$  та подачі насіння  $Q$ .

4. На підставі результатів досліджень (11)–(12), (30)–(31) 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, 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  $\theta$  (16), (33), (36), (39), продуктивності  $q$  (15), (32), (35), (38) і споживаної потужності  $P$  калібрувальної машини (34), (37), (40) від подачі насіння  $Q$ , кута нахилу решета  $\alpha$ , частоти  $\psi$  і амплітуди коливань решета  $A$ .

6. За результатами проведених досліджень (15)–(16), (32)–(40) розроблено адаптивний віброрешітний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння  $Q$ , кут нахилу  $\alpha$  і частота коливань  $\psi$  решета) за рахунок використання програмного забезпечення на основі створеного алгоритму, 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 вібруючої поверхні визначається коефіцієнтом заповнення  $\chi$  (18), коефіцієнтом розподілу  $\delta$  (19), (41), продуктивністю  $q$  (17), (42) і споживаною потужністю пневмовібросепаратора  $P$  (43), які залежать від подачі насіння  $Q$ , кутів нахилу вібруючої поверхні  $\alpha$  та  $\beta$ , частоти коливань  $\psi$ , амплітуди коливань  $A$  та швидкості повітряного потоку  $V$ .

8. На основі отриманих теоретичних і експериментальних залежностей (17)–(19), (41)–(43) розроблено адаптивний вібропневматичний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння  $Q$ , швидкість повітряного потоку  $V$ , частота коливань деки  $\psi$ , кути нахилу деки  $\alpha$  і  $\beta$ ) 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 ( $q = 131 \pm 6$  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  $t$  (21), (44), сумарну концентрацію насіння  $\theta$  (48), продуктивність фотоелектронного сепаратора  $q$  (20), (49) і його споживану потужність  $P$  (50) від подачі насіння  $Q$ , частоти коливань вібротолотка  $\psi$ , частоти обертання барабана  $n$ , часової затримки спрацьовування форсунки  $\Delta t$ , чутливості фотодатчика  $\lambda$ . В результаті експериментальних досліджень блока виходу насіння фотоелектронного сепаратора встановлено експоненціальну залежність зміни ймовірності реагування газової форсунки  $p$  (47) від інтервалу часу між падаючим насінням  $t$ .

10. На підставі результатів досліджень (20)–(21), (48)–(50) удосконалено фотоелектронний сепаратор із раціонально узгодженими режимними параметрами (подача насіння  $Q$ , частота коливань вібротолотка  $\psi$ , частота обертання барабана  $n$ , часова затримка спрацьовування форсунки  $\Delta t$ , чутливість фотодатчика  $\lambda$ ) 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 ( $q = 38 \pm 3$  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 сортосазків 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  $R = 182\text{--}189$ ,  $G = 194\text{--}202$ ,  $B = 211\text{--}218$ , а для білого  $R = 112\text{--}118$ ,  $G = 124\text{--}129$ ,  $B = 133\text{--}139$ . 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  $S$ , як матрицю частот  $f$  відповідних максимумів ( $\max$ ) в колірному просторі RGB при червоному освітленні насіння (51).

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 насіннєвого 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 насіннєвого матеріалу F1 (80000 грн/т) складає 12006,86 грн/т. При цьому строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,76 років.

### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ 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 confecti- nery 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 віброуючого решета. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 47. Ч. І. 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 віброуючого 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 віброуючої 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 віброуючим 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 соняшника 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» (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. 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 насіннєвого 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 насіннєвого 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 насіннєвого матеріалу олійних культур під дією вібруючого 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) A01C 1/00, G01B 11/00, G01B 11/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G06T 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., 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.

#### АНОТАЦІЯ

**Алієв Е.Б.** Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Харківсь-

кий національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему – підвищення ефективності функціонування техніко-технологічного забезпечення первинного насінництва шляхом обґрунтування адаптивних механотронних систем цільового поділу та відбору насінневого матеріалу соняшнику.

Проведено аналіз техніко-технологічного забезпечення процесів очищення та розділення насінневого матеріалу. Виконані теоретичні дослідження процесів сепарації насінневого матеріалу соняшнику за морфологічними показниками і фізико-механічними властивостями та розроблені відповідні фізико-математичні моделі. На основі експериментальних досліджень підтверджені розроблені фізико-математичні моделі. Розроблено і створено автоматизоване технічне забезпечення сепарації насінневого матеріалу соняшнику батьківських компонентів з раціонально узгодженими режимними параметрами: адаптивний аеродинамічний, віброрешітний, вібропневматичний, фотоелектронний сепаратори, спосіб та пристрої для автоматичного фенотипування. Розраховані техніко-економічні показники впровадження результатів досліджень.

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

### АННОТАЦИЯ

**Алиев Е.Б.** Механико-технологические основы процесса прецизионной сепарации семенного материала подсолнечника. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 – Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2020.

В диссертации решена научно-техническая проблема – повышение эффективности функционирования технико-технологического обеспечения первичного семеноводства путем обоснования адаптивных механотронных систем целевого разделения и отбора семенного материала подсолнечника.

Проведен анализ технико-технологического обеспечения процессов очистки и разделения семенного материала. Выполнены теоретические исследования процессов сепарации семенного материала подсолнечника по морфологическим показателям и физико-механическим свойствам и разработаны соответствующие физико-математические модели. На основе экспериментальных исследований подтверждены разработанные физико-математические модели. Разработано и создано автоматизированное техническое обеспечение сепарации семенного материала подсолнечника родительских компонентов с рационально согласованными режимными параметрами: адаптивный аэродинамический, виброрешетный, вибропневматический, фотоэлектронный сепараторы, способ и устройства для фенотипирования. Рассчитаны технико-экономические показатели внедрения результатов исследований.

**Ключевые слова:** подсолнечник, семенной материал, сепаратор, прецизионность, фенотипирование, геометрический размер, объемная масса, аэродинамические свойства, окраска, автоматизация, алгоритм.

### 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. – 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 mechatronic 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.

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.

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

Підписано до друку 08.01.2020 р. Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Обсяг – 2,67 обл.-вид. арк. Наклад. 100 прим. Зам. № 3/2020.

---

Надруковано з готового-оригінал макету у друкарні ФОП Пугач Л.В.  
69000, Україна, м. Запоріжжя, вул. Незалежної України, 15,  
тел. 0959098034