

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**«ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ПНЕВМАТИЧНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ НАСІННЯ»**

Виконав:

здобувач освітнього ступеня «Магістр»
освітньо-професійної програми
«Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
денної форми навчання

КОГУН Артем Володимирович

Керівник:

канд. тех. наук, доцент

ПІДЛІСНИЙ Віталій Володимирович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« _____ » _____ 20__ р.

Допускається до захисту:

« _____ » _____ 20__ р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»

канд. тех. наук, доцент

(підпис)

ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович

м. Кам'янець-Подільський, 2025

З М І С Т

	Стор.	
ЗАВДАННЯ.....	4	
АНОТАЦІЯ.....	5	
РЕФЕРАТ.....	6	
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7	
ВСТУП.....	8	
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
ПНЕВМОСЕПАРУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ.....	11	
1.1. Аналіз стану та проблематика післязбиральної підготовки насіння	11	
1.2. Огляд методів очищення дрібного насіння.....	12	
1.3. Аналіз засобів пневмосепарування насіннєвих сумішей.....	14	
1.4. Аналіз використання електричного поля в очисних машинах як додаткового робочого органу.....	20	
Задачі дослідження.....	23	
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПНЕВМАТИЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ.....		24
2.1. Фізичні основи руху насінин у висхідному повітряному потоці	24	
2.2. Визначення міделевої площі частинки насінневої суміші у вертикальному пневмо каналі.....	25	
2.3. Аеродинамічний та електричний вплив на частинку еліпсоїдної форми у пневмоелектричному каналі.....	28	
2.4. Моделювання насінин та силової дії на них.....	33	
2.5. Моделювання насінин та силової дії на них.....	38	
Висновок до другого розділу.....	39	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....		40
3.1. Формулювання завдання та програма експериментів.....	40	
3.2. Конструкція та принцип дії експериментальної установки.....	40	
3.3. Планування багатофакторного експерименту.....	44	
Висновок до третього розділу.....	50	

РОЗДІЛ 4. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО ПНЕВМОЕЛЕКТРИЧНОГО СЕПАНУВАННЯ	51
4.1. Дослідження процесу відокремлення насінин без зародків.	51
4.2. Дослідження сепарування насінин важко відділюваних бур'янів	54
4.3. Обґрунтування ефективності пневмо електричного сепарування. .	58
Висновок до четвертого розділу.	60
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
5.1. Загальні положення щодо забезпечення безпеки праці.	61
5.2. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів.	61
5.3. Технічні та організаційні заходи забезпечення безпеки.	62
5.4. Вимоги до виробничої санітарії та умов праці.	63
5.5. Пожежна безпека виробничого середовища.	64
5.6. Охорона праці при обслуговуванні та ремонті обладнання.	64
5.7. Дії персоналу в надзвичайних ситуаціях.	64
Висновок до п'ятого розділу.	65
РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПНЕВМО ЕЛЕКТРОСЕПАНУВАННЯ НАСІННЯ	66
Висновок до шостого розділу.	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	73
ДОДАТКИ.	77

АНОТАЦІЯ

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування та встановлення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів пневматичного сепаратора для насіння, що забезпечують ефективне розділення насіннєвих сумішей за якісними та фізико-біологічними характеристиками. У роботі проведено аналіз сучасного стану та технічних характеристик існуючих пневмосепараторів, визначено їхні недоліки та обмеження, що виникають під час експлуатації.

Розроблено математичні моделі руху частинок насіння у вертикальному пневмоканалі з урахуванням впливу аеродинамічних та електростатичних сил. Виконано чисельне моделювання траєкторій руху різних типів насіння, що дозволило оцінити ефективність розділення якісного насіння, насіння без зародків, бур'янів та сторонніх домішок. На основі отриманих результатів визначено оптимальні параметри повітряного потоку, напруженості електричного поля та геометричні розміри робочої частини сепаратора.

Практичне значення роботи полягає у створенні обґрунтованих рекомендацій щодо конструктивно-технологічних параметрів пневматичного сепаратора, що дозволяють підвищити якість сортування насіння, знизити втрати та підвищити продуктивність обладнання у насіннєвому виробництві.

THE SUMMARY

The purpose of the qualification work is to substantiate and establish the optimal design and technological parameters of a pneumatic separator for seeds, which ensure the effective separation of seed mixtures according to qualitative and physical and biological characteristics. The work analyzes the current state and technical characteristics of existing pneumatic separators, identifies their shortcomings and limitations that arise during operation.

Mathematical models of the movement of seed particles in a vertical pneumatic channel have been developed, taking into account the influence of aerodynamic and

electrostatic forces. Numerical modeling of the trajectories of movement of different types of seeds has been performed, which allowed to assess the efficiency of separation of high-quality seeds, seeds without germs, weeds and foreign impurities. Based on the results obtained, the optimal parameters of the air flow, electric field strength and geometric dimensions of the working part of the separator have been determined.

The practical significance of the work lies in creating substantiated recommendations on the design and technological parameters of a pneumatic separator, which allow to improve the quality of seed sorting, reduce losses and increase the productivity of equipment in seed production.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, виконаної на 77 аркушах друкованого тексту формату А4, яка вміщує 6 розділів, 15 таблиць, 30 рисунків, 62 формули, 40 найменувань використаних джерел і презентаційний матеріал на 15 слайдах.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищенні якості посівного матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом їх додаткового оброблення в пневмоелектросепараторі за умов комплексної дії гравітаційних та електричних сил, а також керованого повітряного потоку, з подальшим обґрунтуванням оптимальних параметрів процесу пневмоелектросепарування.

В процесі виконання роботи виконано теоретичні дослідження пневматичного сепарування насіння злакових трав. Представлена методика та проведенні експериментальних досліджень.

В результаті досліджень обґрунтовано теоретичне узагальнення й подано новий розв'язок актуальної задачі з обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів та режимів пневмо електросепарування дрібнонасінневих сумішей. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Також проведено техніко-економічне обґрунтування ефективності пневмо електросепарування насіння

Ключові слова: НАСІННЄВА СУМІШ, ПНЕВМО ЕЛЕКТРОСЕПАРАТОР, ПОВІТРЯНИЙ ПОТІК, ВОЛОГІСТЬ, АЕРОДИНАМІЧНА СИЛА.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ, СИМВОЛІВ, ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення	Розшифровка скорочень
ОС	Освітній ступінь
КР	Кваліфікаційна робота
ДСТУ	Державний стандарт України
ЕК	Екзаменаційна комісія
ДНС	Дрібнонасінева суміш
ПЕС	Пневмоелектричний сепаратор
КТП	Конструктивно-технологічні параметри
ТУ	Технічні умови
ЗМ	Зернова маса
ДВН	Джерела високої напруги
Ф	Фракції насіння
ТМ	Теоретична модель
Q	Подача насіння
V	Швидкість повітряного потоку
E	Напруженість електричного поля
ρ	Насипна щільність матеріалу
G	Гравітаційна сила
F_{π}	Аеродинамічна сила
m	Маса насінини
A_M	Площа міделевого перерізу

В С Т У П

Актуальність теми. Наявні технічні засоби очищення насінневого матеріалу не забезпечують достатньої ефективності видалення широкого спектра бур'янових домішок, зокрема важкорозділюваних, а також відокремлення мертвих або неповноцінних насінин культури. Основна складність полягає у близькості фізико-механічних характеристик компонентів суміші, що істотно ускладнює процес їх якісного сепарування традиційними методами. За таких умов виникає необхідність пошуку нових критеріїв подільності, які б дозволили виконувати розділення з урахуванням не лише фізико-механічних, але й електричних властивостей частинок.

Застосування електричного поля створює додаткову силову дію на елементи сепарувальної суміші. Оскільки насіння культурних рослин та бур'янів належать до різних біологічних видів, їхні електрофізичні характеристики відрізняються, що забезпечує можливість вибіркової взаємодії з робочими органами електросепаратора. Це відкриває перспективи підвищення ефективності процесу розділення.

Ще один напрям підвищення результативності сепарування полягає у поєднанні електричних впливів з іншими силовими факторами, зокрема дією повітряного потоку. Проте процес пневмоелектро сепарування нині вивчений недостатньо: існує потреба як у розробленні теоретичних моделей, так і в проведенні експериментальних досліджень для підтвердження їх достовірності.

З огляду на це, питання, розглянуті в даній роботі, є науково та практично актуальними й потребують подальшого ґрунтовного опрацювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами досліджень. Робота виконувалась у відповідності з Державною науковою програмою “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” на 2020-2025 рр.

Мета і завдання досліджень. Мета кваліфікаційної роботи полягає у підвищенні якості посівного матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом їх додаткового оброблення в пневмоелектросепараторі за умов комплексної дії

гравітаційних та електричних сил, а також керованого повітряного потоку, з подальшим обґрунтуванням оптимальних параметрів процесу пневмоелектросепарування.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань дослідження:

1. Провести аналіз сучасних технологій і технічних засобів, що використовуються для післязбиральної обробки дрібнонасіньових культур;
2. Розробити математичну модель руху еліпсоїдних частинок насінневої суміші у висхідному повітряному потоці з урахуванням дії сили тяжіння та електростатичних сил і оцінити їх вплив на траєкторію руху насіння;
3. Обґрунтувати оптимальні конструктивні та технологічні параметри пневмоелектросепаратора;
4. Установити взаємозв'язки між налаштованими параметрами й режимами сепараційного процесу та якісними характеристиками посівного матеріалу дрібнонасіньових культур;
5. Оцінити техніко-економічну доцільність застосування пневмоелектросепаратора у процесі післязбиральної підготовки насіння.

Предмет досліджень. Предметом дослідження є орієнтація частинок еліпсоїдної форми в каналі пневмоелектросепаратора під дією висхідного повітряного потоку, гравітаційних та електричних сил, а також зміна показників якості посівного матеріалу дрібнонасіньових культур залежно від конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи пневмоелектросепаратора.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження процесу пневмоелектросепарування дрібнонасіньових культур проводилися із застосуванням положень теоретичної механіки та аеродинаміки, методів диференціального й інтегрального числення, а також математичного моделювання.

Експериментальні дослідження виконувались на лабораторній установці з використанням методів планування багатofакторного експерименту та подальшого аналізу результатів. Оброблення експериментальних даних

проводилося статистичними методами із застосуванням пакета прикладних програм Statistica 8.0.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати мають важливе практичне значення для підвищення ефективності післязбиральної підготовки дрібнонасіневих культур. Розроблені теоретичні положення щодо руху та орієнтації частинок еліпсоїдної форми у поєднаному полі гравітаційних, електричних сил і повітряного потоку забезпечують можливість удосконалення процесу сепарування та підвищення якості посівного матеріалу.

Запропоновані технічні рішення можуть бути впроваджені в технологічні лінії підприємств із переробки та підготовки насіння, що сприятиме зниженню втрат, підвищенню енергоефективності процесу і загальному покращенню якості посівного матеріалу.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися й обговорювалися на науково-практичних конференціях Закладу Вищої освіти «Подільський державний університет» у 2024-2025р. Основний зміст роботи опубліковано в 1 друкованій публікації: Когун А.В., Підлісний В.В. Обґрунтування конструктивних параметрів зерноочисних машин // Перші наукові кроки – 2025: збірник наукових праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський). – Кам'янець-Подільський, 2025. – 40 с.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПНЕВМО СЕПАРУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ

1.1 Аналіз стану та проблематика післязбиральної підготовки насіння

Після збиральна підготовка насіння є одним із ключових етапів формування високо якісного посівного матеріалу, що визначає рівень схожості, енергію проростання та майбутню урожайність. На практиці цей процес включає очищення, сортування, сушіння, калібрування та доведення насінневих партій до показників, установлених чинними стандартами. Незважаючи на значний розвиток зерноочисної техніки, для багатьох дрібнонасінневих культур післязбиральна доробка залишається складною і малоефективною.

Основна проблема полягає у подібності фізико-механічних властивостей культурних насінин та домішок бур'янів. Часто вони мають близькі геометричні розміри, масу, густину та форму поверхні, що ускладнює їх відокремлення традиційними гравітаційними, ситовими та пневматичними методами. Особливі труднощі виникають під час видалення важковідділюваних домішок та біологічно неповноцінних насінин – щуплих, недорозвинених або тих, що втратили зародок.

Сучасні повітряно-ситові та пневматичні сепаратори здатні забезпечувати лише базову очистку, проте їх ефективність знижується при роботі з культурами, характерними дуже малим розміром насіння (конюшина, люцерна, тимофіївка тощо). У багатьох випадках вихід посівного матеріалу не відповідає стандартам через перевищення частки дрібних органічних домішок, уламків, мінеральних частинок та маложиттєздатних насінин.

Одним із напрямів підвищення ефективності післязбиральної підготовки є застосування фізичних полів - електричних або електростатичних. Використання електрофізичних принципів дозволяє частково компенсувати обмеження, притаманні традиційним машинам, оскільки насіння різних біологічних видів та різного ступеня повноцінності відрізняється за

електричними характеристиками, вологістю та провідністю, що може слугувати додатковою ознакою подільності.

На сьогодні розроблено низку електроочисних та діелектричних сепараторів, які демонструють підвищену точність виділення важковідділюваних домішок і одночасно сприяють стимулюванню посівних властивостей матеріалу. Однак їх застосування обмежене складністю конструкції, необхідністю високого рівня енергопостачання та недостатньою вивченістю процесів взаємодії насіння з електричним полем, особливо в умовах роботи у повітряному потоці.

Таким чином, сучасний стан післязбиральної підготовки дрібнонасінневих культур характеризується потребою в удосконаленні технологій та обладнання. Перспективним напрямом є поєднання пневматичного розділення із дією електричного поля, що дозволяє підвищити повноту очищення, зменшити втрати кондиційного насіння та покращити якість посівного матеріалу.

1.2 Огляд методів очищення дрібного насіння

Аеродинамічне очищення метод ґрунтується на відмінності в аеродинамічних властивостях: швидкості витання, площі опору та густині частинок.

Використовуються аспіратори, колонні та каналові повітряні сепаратори.

Особливості: добре видаляють легкі домішки (луску, пил, легкі фрагменти рослин); складно відокремити домішки, близькі за масою та швидкістю витання до основної фракції; необхідність точного регулювання швидкості повітряного потоку.

Решітне очищення використовуються різні типи сит з мікроперфорацією.

Метод ефективний для відокремлення: крупних домішок (солома, стебла); часток, що різко відрізняються за розмірами.

Недоліки: для дуже дрібного насіння потрібні малі отвори сит, що підвищує ризик забивання; низька ефективність при близьких геометричних розмірах частинок.

Триєрування застосовується для культур з відмінностями у довжині або формі насіння. Для більшості дрібнонасіньєвих культур метод має обмежену ефективність через подібність форми насіння до домішок.

Сучасні методи підвищення ефективності очищення:

- пневмосепарація з керованими повітряними потоками. Використовуються: імпульсні повітряні струмені; ламінарні та турбулентні канали; вертикальні та похилі потоки зі змінною швидкістю. Переваги: можливість точного налаштування параметрів залежно від маси та форми насіння; зменшення механічного травмування;

- вібраційно-повітряні системи поєднання коливань робочої поверхні з повітряним потоком підвищує розпушуваність шару, сприяє розшаруванню за масою та розміром;

- електросепарація базується на різній поляризованості, електропровідності та діелектричних властивостях частинок. Переваги для дрібнонасіньєвих культур: можливість відокремлення насіння бур'янів, які мають близькі аеродинамічні характеристики; виділення слабо розвинених та порожніх насінин (низька електропровідність); мінімальне механічне навантаження.

Електричні поля різної структури (коронні, неоднорідні, біжучі хвилі) забезпечують селекцію частинок за електрофізичними властивостями, що істотно підвищує якість очищення.

Комбіновані технології очищення

Найвищий ефект забезпечують системи, що інтегрують кілька фізичних принципів впливу:

- пневмоелектросепарація – поєднання електричного поля з вертикальним повітряним потоком;
- вібро-пневматичні комплекси – механічні коливання + повітря + електростатичне поле;

– каскадні модулі очищення – послідовне застосування різних методів.

Комбіновані системи дозволяють: відокремлювати домішки, які мають дуже близькі масо-геометричні та аеродинамічні властивості до основної культури; підвищувати енергетичний потенціал насіння за рахунок електрофізичного впливу; зменшувати кількість проходів через обладнання.

Традиційні механічні методи очищення мають обмеження при роботі з дрібнонасіньовими культурами через подібність домішок і високий ризик травмування. Найперспективнішими є технології, що поєднують аеродинамічні та електрофізичні принципи розділення. Пневмоелектросепарація забезпечує підвищену точність селекції насіння, зменшує енерговитрати та підвищує вихід чистої фракції. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів таких комбінованих сепараторів.

1.3 Аналіз засобів пневмосепарування насіннєвих сумішей

Аеродинамічні властивості є основною ознакою подільності в більшості сепарувальних машин. До ключових показників належать критична швидкість - мінімальна швидкість повітряного потоку, за якої частинка переходить у завислий стан, та коефіцієнт парусності, що відображає опір частинки повітряному середовищу.

Повітряний потік у сепараторах створюється вентиляторами, а повітряні системи класифікують за такими ознаками:

- за напрямом потоку: вертикальні та похилі;
- за способом подачі повітря: всмоктувальні, нагнітальні, нагнітально-всмоктувальні;
- за кількістю каналів: одно- та двоканальні;
- за схемою циркуляції: замкнені та розімкнені.

У похилих або горизонтальних потоках матеріал, що надходить з бункера, підхоплюється струменем повітря та розподіляється на легку і важку фракції відповідно до своїх аеродинамічних властивостей. У вертикальних потоках легкі домішки засмоктуються або підхоплюються та переносяться в

осаджувальну камеру, тоді як важча частина суміші переміщується по решетній поверхні.

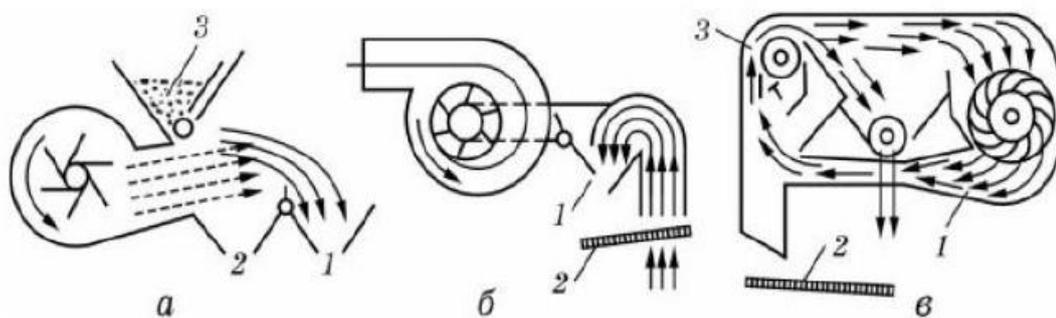


Рисунок 1.1 - Схема розподілу насіння за їхніми аеродинамічними характеристиками в повітряних потоках:

а – напірний похилий повітряний струмінь (1 – легка фракція; 2 – важка фракція; 3 – вихідний ворох); б – аспіраційна система з відцентровим вентилятором (1 – легкі домішки; 2 – решето); в – аспіраційна система з діаметральним вентилятором (1 – повітряний потік; 2 – решето; 3 – легкі домішки).

Процес розділення вороху в повітряному каналі можливий лише за умови, що критичні швидкості насіння та домішок у стані зависання відрізняються. Саме різниця у цих значеннях забезпечує можливість ефективного відокремлення компонентів суміші.

Сортування насінневого матеріалу з урахуванням одночасного впливу аеродинамічних та вагових характеристик, а також стану поверхні частинок, реалізується в пневматичних сортувальних столах (рис. 1.2).

У пневматичному сепарувальному столі відбір насіння з найвищим рівнем фізіологічної стиглості здійснюється завдяки поєднанню просторового положення сортувальної деки (поздовжній і поперечній кути нахилу), її коливального руху та впливу повітряного потоку, який подається вентилятором 5 і спрямовується під робочу поверхню. Насінневий шар, що надходить на деку, інтенсивно продувається повітрям і переходить у так званий киплячий стан.

Утворюється вертикальне фракціонування частинок: легкі домішки й дрібні насінини переміщуються у верхні шари потоку, тоді як важчі залишаються ближче до поверхні деки. Поступально-коливальний рух сітчастої

поверхні, яка має певний кут нахилу, сприяє переміщенню та подальшому відокремленню матеріалу на фракції, що сходять з деки через відповідні лотки.

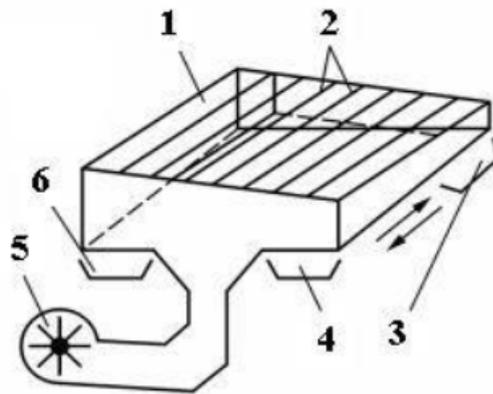


Рисунок 1.2 - Схема розділення насіння за комплексом аеродинамічних характеристик, параметрами поверхні та питомою вагою в пневматичному сепарувальному столі:

1 – пневматичний сортувальний стіл; 2 – рифлення деки; 3, 4, 6 – лотки для відведення фракцій з малою, середньою та високою питомою вагою відповідно; 5 – вентилятор.

Пневмосепаратори застосовують як окремі машини або як складові елементи комплексів для післязбиральної підготовки насіння. Основними робочими вузлами таких агрегатів є вентилятори, сепарувальні канали, осаджувальні камери та пиловідокремлювачі. У технологічних процесах очищення дрібнонасінневих культур використовуються пневмосепаратори різних типів і конструкцій [23].

Гравітаційний сепаратор СГ-25 призначений для первинного очищення насінневого матеріалу за допомогою решіт і повітряного потоку. Він забезпечує відокремлення великих, дрібних та легких домішок у зернових, зернобобових культурах, соняшнику, кукурудзі та інших видах насіння, що надходять із зернозбиральних комбайнів (рис. 1.3, а).

Конструктивно машина виконана у вигляді вертикальної колони без рухомих елементів. Переміщення вороху здійснюється самопливом під дією сили тяжіння через нерухомі решета, де відбувається поступове відокремлення домішок. За увімкненого вентилятора додатково видаляються легкі частинки. Продуктивність сепаратора – 25 т/год; привод вентилятора потужністю – 3,2

кВт; блоки сепарації й аспірації масою – 150 та 208 кг.

Пневматична сортувальна колонка (ПСМК) - використовується при очищенні та сортуванні дрібнонасіньових культур у селекційних умовах, складається з вертикального каналу 1, який розширюється догори, вентилятора відцентрового типу 2, живильника електромагнітного 3, приймачів 4 та камери осаджувальної 5 (рис. 1.3, б).

Основною перевагою цієї колонки є висока точність розділення насіння завдяки рівномірному повітряному потоку та стабілізованій подачі матеріалу. Процеси очищення та сортування відбуваються одночасно. Продуктивність обладнання становить 5-20 кг/год, потужність вентилятора – 0,37 кВт, маса – 60 кг.

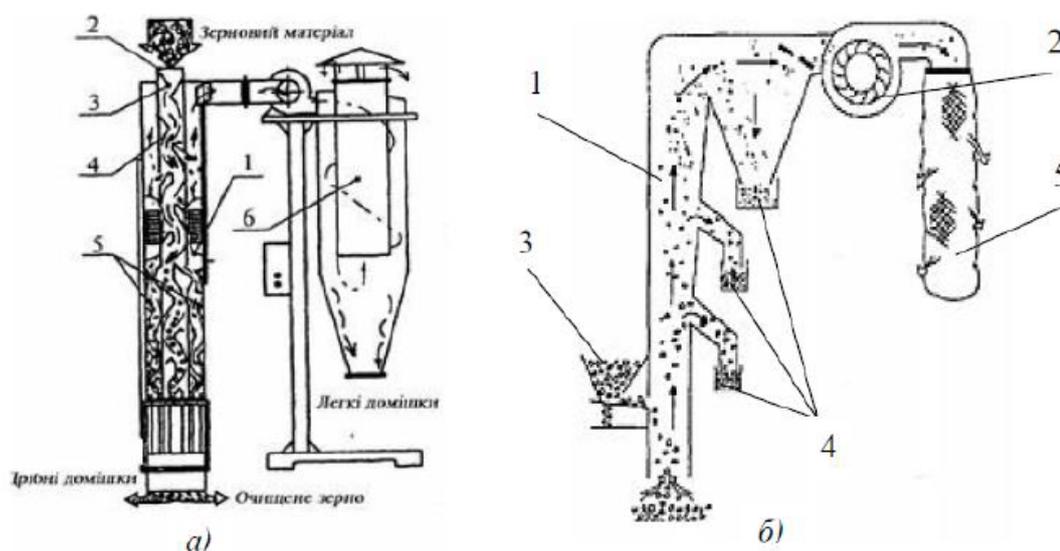


Рисунок 1.3 - Технологічні схеми роботи гравітаційного сепаратора СГ-25 (а) та пневматичної сортувальної колонки ПСМК (б)

а) 1 – блок сепарації; 2 – приймальна камера; 3 – засувка; 4 – решета для виділення великих домішок; 5 – решета для виділення дрібних домішок; 6 – блок аспірації; б) 1 – пневмоканал; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – електромагнітний живильник; 4 – приймачі фракцій; 5 – осаджувальна камера.

Лабораторний повітряний сепаратор LASTI використовується для очищення та поділу насінневого матеріалу в потоці повітря на три окремі фракції. Пристрій забезпечує селективне розділення частинок за їх аеродинамічними властивостями та масово-розмірними характеристиками (рис.

1.4а). Насіннєвий матеріал із бункера 1 через лоток 2 потрапляє до вертикального каналу 3, де відбувається його розподіл. Найважчі очищені насінини спрямовуються до приймача 6, легкі – до приймача 7, а проміжна фракція – у приймач 8. Пристрій виконаний як окремий модуль із жорстким корпусом, виготовленим із деревини та оснащеним прозорою фронтальною кришкою. Вентилятор із фільтром встановлений під металевим столом. Подача насіння здійснюється електромагнітним бункером. Продуктивність - 10-25 кг/год, вентилятор потужністю - 0,38 кВт, вага - 96 кг.

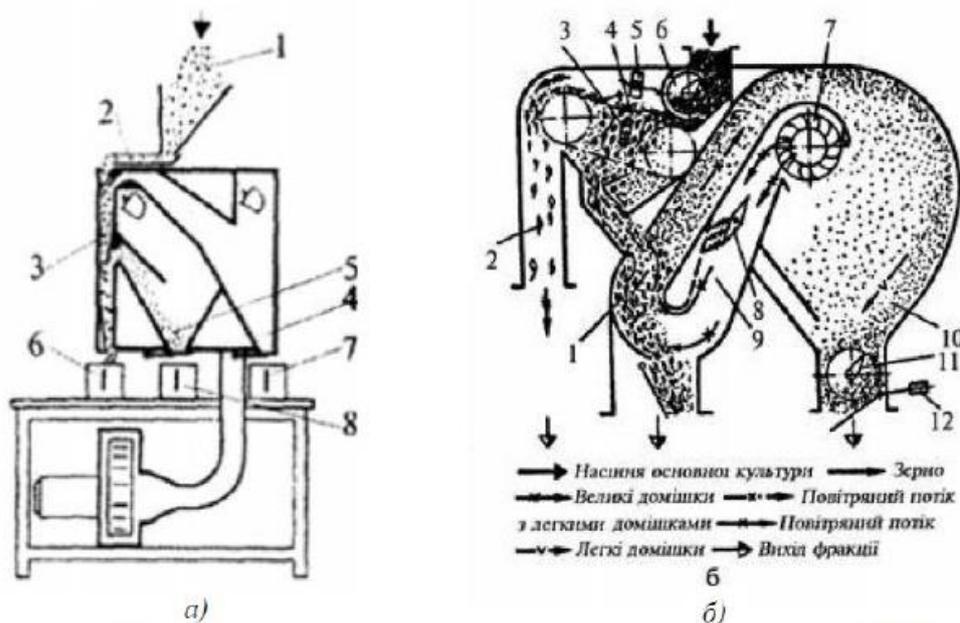


Рисунок 1.4 - Технологічні схеми повітряних сепараторів а) LASTI та б) МПО-50 1 – приймальний бункер; 2 – лоток подачі насіннєвої суміші; 3 – сепарувальний канал; 4, 5 – пневмоканали; 6, 7, 8 – приймачі фракцій насіння; б) 1 – всмоктувальний пневмоканал; 2 – трубопровід; 3 – підбивальник; 4 – сітчастий транспортер; 5, 12 – тягарці; 6 – завантажувальний шнек; 7 – вентилятор; 8 – дросельна заслінка; 9 – напірний пневмоканал; 10 – камера осадження домішок; 11 – шнек.

Машина для первинного очищення зернової маси МПО-50 включає приймальну камеру та блок пневматичного сепарування. У верхній частині приймальної камери розміщені розподільний шнек 6 (рис. 1.4б), сітчастий транспортер 4, підбивальні елементи 3 та повітропровід 2. Пневмосистема включає діаметральний вентилятор 7, напірний канал 9, всмоктувальний канал 1, камеру осадження 10, шнек для виведення домішок 11 і дросельну заслінку 8.

У зоні взаємодії з повітряним потоком із зернової суміші вилучаються легкі домішки, які надходять у камеру осадження 10, а потім шнеком 11 виводяться за межі машини. Очищене зерно, втративши легкі включення, опускається вниз і виходить із агрегату.

Швидкість повітряного потоку в пневмоканалах регулюється через зміну частоти обертання вентилятора та положення дросельної заслінки. Під час очищення зернових культур застосовують транспортерні сітки з отворами 12×12 мм, а для великонасінневих культур – 15×15 мм. Продуктивність МПО-50 становить до 50 т/год, що дозволяє ефективно використовувати її у складі потокових ліній насіннеочисних агрегатів і комплексів.

Порівняльну характеристику розглянутих пневматичних сепараторів, та відображено їх основні експлуатаційні переваги та недоліки а табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки пневматичних сепараторів

№	Вид пневмо-сепаратора	Недоліки	Переваги
1	СГ-25	– недостатня ефективність очищення та сепарування; – самопливне переміщення вороху.	– простота конструкції; – нерухомі робочі органи; – сепарування за геометричними та аеродинамічними властивостями.
2	ПСМК	– сепарування лише за аеродинамічними параметрами; – неможливість роботи в безперервному режимі.	– висока точність очищення дрібного насіння; – одночасне очищення й сортування; – проста конструкція та надійність; – довговічність.
3	LASTI	– відсутність безперервного режиму; – недостатня якість очищення;	– низьке енергоспоживання; – простота конструкції; – зручність експлуатації; – довговічність.

		– нерівномірність повітряного потоку.	
4	МПО-50	– складність конструкції; – висока металомісткість; – ускладнене очищення та переналаштування.	– можливість попереднього очищення; – наявність відбивника для покращення сепарації; – регулювання швидкості повітряного потоку; – висока продуктивність.

Підвищення ефективності пневмосепарування можливе за рахунок вибіркової орієнтації частинок насінневого матеріалу таким чином, щоб їхня довга вісь була спрямована перпендикулярно дії повітряного потоку. Такий ефект досягається шляхом створення додаткової силової дії на частинки, величина якої повинна відрізнятися для життєздатного насіння сільськогосподарських культур і для нежиттєздатних або бур'янових насінин. Це підсилює відмінності в їхніх аеродинамічних характеристиках і забезпечує більш чітке та ефективне розділення.

Застосувати спрямовану силову дію на частинки дрібнонасінневих сумішей можна шляхом формування в сепараційному каналі рівномірного електричного поля. Для цього необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження впливу такого поля на рух частинок під час сепарування, визначити оптимальні параметри й режими роботи пневмоелектросепаратора, що стане основою для створення його вдосконаленої конструкції.

Однак процес пневмоелектросепарації саме дрібнонасінневих сумішей наразі вивчений недостатньо й потребує ґрунтовного теоретичного аналізу та подальшої експериментальної перевірки.

1.3 Аналіз використання електричного поля в очисних машинах як додаткового робочого органу

Накопичені наукові дані свідчать, що застосування електросепарації у процесі очищення насінневих сумішей забезпечує високу ефективність вилучення важковідділюваних домішок бур'янів, а також насіння, яке втратило біологічну повноцінність (пошкодженого, щуплого або без зародка).

Дослідження, присвячені застосуванню електричних полів під час післязбиральної підготовки посівного матеріалу, детально висвітлені у джерелах [5, 6]. На їх основі розроблено низку конструкцій насіннеочисних машин [8], технологічні схеми яких подано на рис. 1.5.

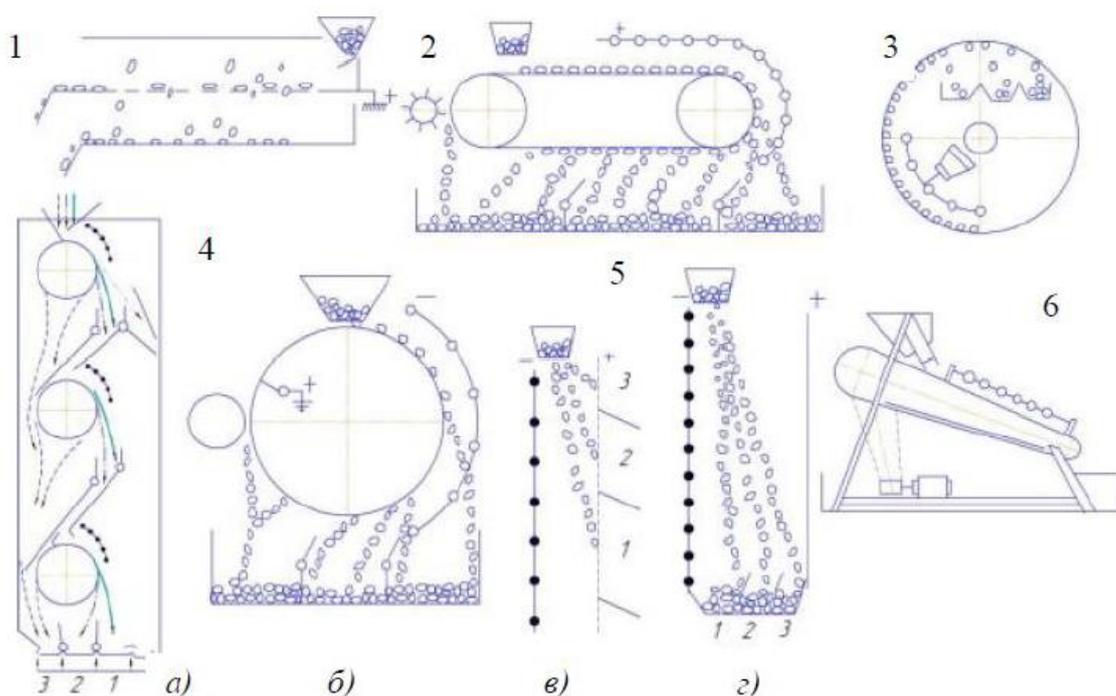


Рисунок 1.5 - Технологічні схеми електроочисних машин коронного розряду

1 – електроочисна машина решітного типу; 2 – електроочисна машина з транспортерною подачею; 3 – електрофрикційний циліндр (варіант розділення на внутрішній поверхні); 4 – барабанні електроочисні машини (а – багатосекційна; б – односекційна); 5 – електрокоронні камерні сепаратори (в – розділення у вертикальній площині; г – у горизонтальній); 6 – електрокоронна гірка.

У порівнянні з традиційними сепараторами обладнання коронного розряду забезпечує більш повне та точне розділення насінневого матеріалу, одночасно зменшуючи втрати кондиційних насінин у процесі очищення [10].

Під час очищення на барабанних електрокоронних машинах повторне

пропускання насіннєвого матеріалу дозволяє повністю видалити важковідділювані домішки бур'янів; при цьому втрата схожих насінин не перевищує 3 % [5].

Електроочисні машини реагують також на вологісний стан окремих насінин, що є важливим чинником поділу. Оскільки водоутримувальна та водопоглинальна здатність насіння пов'язана з його біологічною повноцінністю, зміни електричних характеристик дозволяють підсилити відмінності між фракціями та підвищити якість сепарації.

Окрім коронного сепарування, у післязбиральній підготовці посівного матеріалу широко застосовується поділ насіння в електростатичному полі за допомогою діелектричних сепараторів. Дослідження [13, 18] показали, що для насінин еліпсоїдної форми характерне індивідуальне значення напруженості орієнтації, за якої вони вирівнюються вздовж силових ліній поля. Насінини округлої форми мають власне значення напруженості старту, при досягненні якого вони відриваються від електрода й переміщуються до протилежної пластини. Встановлено, що ці параметри можуть використовуватись як показники якості та технологічні ознаки подільності під час поділу насіння на фракції з різними властивостями. Насіння з меншою напруженістю орієнтації характеризується нижчою масою та густиною, підвищеною електричною проникністю й більшою вологістю. На основі цих закономірностей створено конструкції діелектричних сепараторів, технологічні схеми яких наведено на рис. 1.6.

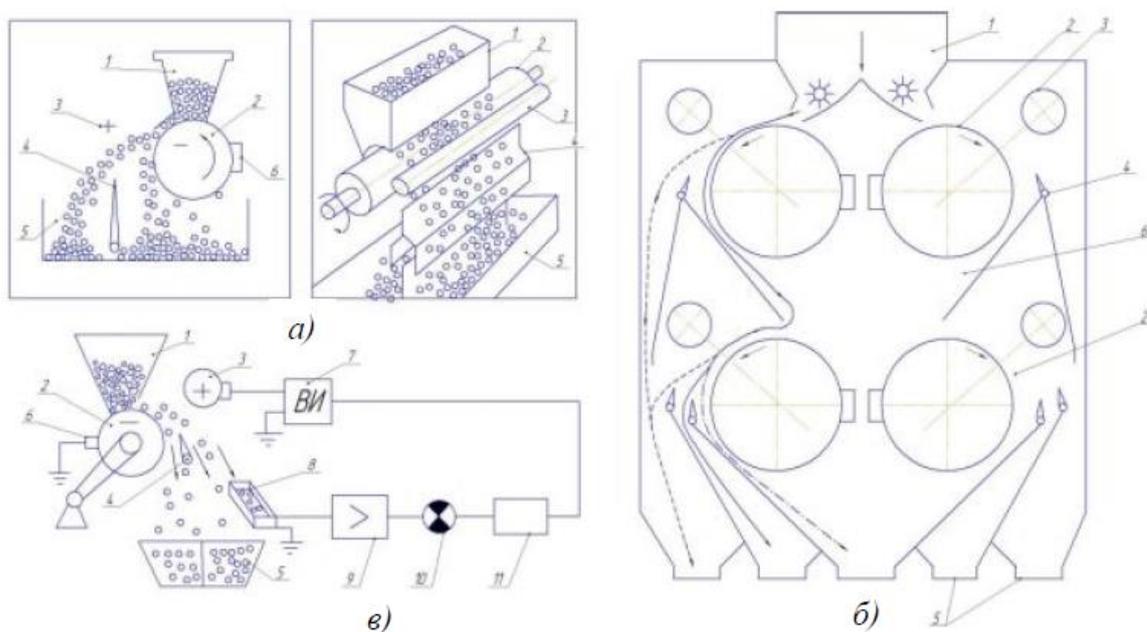


Рисунок 1.6 - Технологічні схеми діелектричних сепараторів:

а – односекційний; б – багатосекційний; в – схема автоматизованої системи електросепаратора. 1 – завантажувальний бункер; 2 – рухомий заземлений барабанний електрод; 3 – нерухомий ізольований електрод; 4 – розділювальна площина; 5 – приймальні ємності; 6 – щітка для очищення; 7 – джерело живлення; 8 – датчик заряду насіння; 9 – підсилювальний блок; 10 – елемент порівняння; 11 – виконавчий механізм.

Покращити розділення дрібнонасіньових сумішей у повітряному потоці можливо шляхом створення додаткової силової дії, величина якої відрізняється для біологічно повноцінних насінин культури та маложиттєздатних або бур'янових насінин. Реалізувати це можна шляхом накладання в сепараційному каналі однорідного електричного поля.

Одним із ключових параметрів, що визначає результативність процесу розділення в пневматичному каналі, є площа поперечного перерізу насінини, яка взаємодіє з повітряним потоком. Оскільки насіння культурних рослин і бур'янів належать до різних біологічних видів і мають різні електрофізичні властивості, їх взаємодія з електричним полем буде неоднаковою. У результаті насінини орієнтуються під різними кутами відносно силових ліній поля. За таких умов компоненти суміші сприйматимуть дію повітряного потоку по-різному, що створює передумови для їх ефективного розділення.

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз сучасних технологій і технічних засобів, що використовуються для післязбиральної обробки дрібнонасіньових культур;
2. Розробити математичну модель руху еліпсоїдних частинок насінневої суміші у висхідному повітряному потоці з урахуванням дії сили тяжіння та електростатичних сил і оцінити їх вплив на траєкторію руху насінин;
3. Обґрунтувати оптимальні конструктивні та технологічні параметри пневмоелектросепаратора;

4. Установити взаємозв'язки між налаштованими параметрами й режимами сепараційного процесу та якісними характеристиками посівного матеріалу дрібнонасіневих культур

5. Оцінити техніко-економічну доцільність застосування пневмоелектросепаратора у процесі післязбиральної підготовки насіння.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПНЕВМАТИЧНОЇ СЕПАРАЦІЇ НАСІНЄВОГО МАТЕРІАЛУ

2.1 Фізичні основи руху насінин у висхідному повітряному потоці

Процес переміщення насінин у висхідному повітряному потоці є результатом взаємодії комплексу сил, що діють на частинку під час її руху в газовому середовищі. Фізична природа цього руху визначається співвідношенням між аеродинамічними, гравітаційними та інерційними характеристиками насінини, а також геометричною формою частинки, яка суттєво впливає на характер її орієнтації та режим взаємодії з потоком.

Основною умовою переходу насінини у зважений стан є досягнення такої швидкості повітряного потоку, за якої аеродинамічна сила опору компенсує вагу частинки. Сила опору F_p , що діє на насінину, визначається площею її міделевого перерізу та залежить від форми частинки, її положення у просторі та густини повітряного середовища. Приймання насінини як тіла еліпсоїдної форми дозволяє більш точно врахувати вплив орієнтації на величину аеродинамічної сили, оскільки проекція міделевого перерізу змінюється при повороті частинки на кут φ відносно горизонтальної площини.

Висхідний потік створює поле швидкостей, у якому частинка зазнає не лише вертикального переміщення, але й обертального руху, що виникає внаслідок нерівномірного розподілу тиску по її поверхні. Орієнтація насінини в потоці встановлюється у положенні, яке забезпечує динамічну рівновагу між моментом аеродинамічних сил та моментом інерції частинки. Саме тому реальна траєкторія руху насінини є складною та поєднує поступальний і кутовий рухи.

Гравітаційна сила ($G = mg$) діє вертикально вниз і визначається масою частинки та прискоренням вільного падіння. Аеродинамічна сила F_p спрямована протилежно до напрямку дії сили тяжіння і зростає пропорційно квадрату швидкості потоку. Додатковим фактором, що впливає на поведінку

насінин у пневматичних системах, є виникнення турбулентних відхилень у потоці, які можуть спричиняти коливальні рухи частинок та зміну їх орієнтації.

Важливою характеристикою процесу є гранична швидкість витання, за якої вертикальна складова швидкості частинки стає рівною нулю. Якщо швидкість потоку менша за цю величину, насінина опускається вниз; якщо більша – піднімається. Таким чином, регулювання швидкості повітря дозволяє забезпечити селекцію частинок за масою, формою та аеродинамічними властивостями.

Фізична модель руху насінин у висхідному потоці дозволяє враховувати реальні особливості їх геометрії та різних варіантів орієнтації, що є принципово важливим для підвищення точності пневматичного сепарування. Ці положення є базою для подальшого аналітичного опису силових взаємодій та формування математичної моделі руху частинок у пневмоканалі сепаратора.

2.2 Визначення міделевої площі частинки насінневої суміші у вертикальному пневмоканалі

Для оцінювання величини аеродинамічної сили, що діє на частинку насінневої суміші у вертикальному каналі пневмоелектричного сепаратора, необхідно встановити її міделеву площу A_m , тобто площу проєкції насінини на площину, перпендикулярну напрямку руху повітряного потоку. Під час такого розрахунку слід враховувати два важливі аспекти.

По-перше, більшість частинок досліджуваного матеріалу мають геометричну форму, наближену до еліпсоїда обертання з півосями (a) та (b) (рис. 2.3). По-друге, під дією додаткового електричного поля насінина здатна змінювати просторову орієнтацію: вона повертається навколо півосі (b) на певний кут (φ) відносно горизонтальної площини (рис. 2.1).

Урахування зазначених факторів є необхідним для коректного визначення міделевої площі та подальшого розрахунку аеродинамічних характеристик частинок у пневмоканалі.

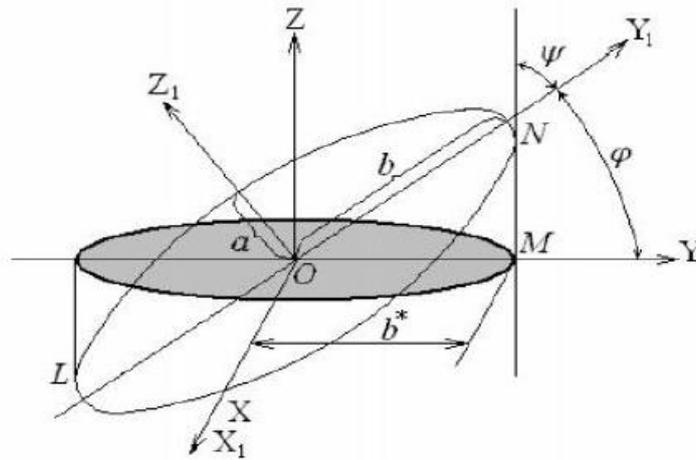


Рисунок 2.1 - Схема для визначення міделєвого перерізу частинки еліпсоїдної форми

Найбільшим поперечним перерізом частинки вважається еліпс, півосі якого дорівнюють (a) та (b*). При цьому величина (b*) визначається як відстань (OM) від початку координат до прямої (MN), що є дотичною до контуру зернини, представленої еліпсом з півосями (a) та (b), і розташованою перпендикулярно до осі ординат (OY).

Розглянемо площину ($X_1 = 0$). Припустімо, що точка дотику (N) у цій площині має координати (Y_{10}) та (Z_{10}). Дотична (MN) утворює з віссю (OY_1) кут ψ , а її напрям визначається кутовим коефіцієнтом ($k = \tan \psi = \cot \varphi$). Таким чином, рівняння дотичної, як прямої, що проходить через задану точку у визначеному напрямку, у координатній системі (OY_1Z_1) може бути записане у відповідній аналітичній формі:

$$Z_1 = Z_{10} + \operatorname{ctg} \varphi (Y_1 - Y_{01}). \quad (2.3)$$

З іншого боку, рівняння дотичної до еліпса може бути записане у загальному вигляді, якщо відомі координати точки дотику. У цьому випадку аналітичний вираз для такої дотичної має форму [14]:

$$\frac{Z_1 Z_{10}}{a^2} + \frac{Y_1 Y_{10}}{b^2} = 1. \quad (2.4)$$

Порівнявши кутові коефіцієнти рівнянь (2.1) і (2.2), отримуємо співвідношення, яке містить два невідомі – координати (Y_{10} та Z_{10}). Для визначення цих величин необхідне ще одне рівняння, яке випливає з того, що точка (N) лежить на еліпсі, що описує контур зернини. Таким чином, систему

рівнянь для знаходження координат точки дотику можна подати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} \varphi = -\frac{a^2 Y_{10}}{b^2 Z_{10}}; \\ \frac{Z_{10}^2}{a^2} + \frac{Y_{10}^2}{b^2} = 1. \end{cases} \quad (2.3)$$

Розв'язавши подану систему рівнянь, отримуємо координати двох точок дотику – (N і L), які розташовані симетрично відносно осей еліпса (рис. 2.1). Однак у подальшому розгляді нас цікавитимуть координати саме точки (N), які набувають такого вигляду:

$$Y_{10} = \frac{b^2}{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2}}, \quad Z_{10} = -\frac{a^2 \operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2}}. \quad (2.4)$$

Підставивши отримані залежності (2.4) у формулу (2.1) та виконавши необхідні алгебраїчні перетворення, можна вивести загальний аналітичний вираз для прямої (MN), який має такий вигляд:

$$Z_1 \sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2} - Y_1 \sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2} \operatorname{ctg} \varphi + a^2 \operatorname{tg} \varphi + b^2 \operatorname{ctg} \varphi = 0. \quad (2.5)$$

Подальше визначення півосі (b^*) ґрунтується на використанні відомої формули обчислення відстані від точки D (x_0, y_0) до прямої, заданої рівнянням ($Ax + By + C = 0$):

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (2.6)$$

У даному випадку необхідно визначити відстань від початку координат O(0; 0) до прямої, поданої рівнянням (2.5):

$$b^* = \frac{a^2 \operatorname{tg} \varphi + b^2 \operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2 + (a^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + b^2) \operatorname{ctg}^2 \varphi}}. \quad (2.7)$$

У даному виразі враховано, що кут φ є гострим, а тому виконується нерівність $a^2 \operatorname{tg} \varphi + b^2 \operatorname{ctg} \varphi > 0$.

Після здійснення необхідних алгебраїчних перетворень і спрощення формула (2.7) набуває остаточного вигляду:

$$b^* = \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}. \quad (2.8)$$

Таким чином, значення площі міделевого перерізу можна подати у

такому вигляді:

$$A_M = \pi a b^* = \pi a \sqrt{a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi}. \quad (2.9)$$

Подана формула дає можливість обчислити площу міделевого перерізу як функцію кута повороту насінини φ . При цьому максимальне значення ця площа набуває за умови $\varphi = 0$, і в такому випадку воно визначається наступним співвідношенням:

$$A_M^{\min} = \pi a b. \quad (2.10)$$

Мінімальне значення площі міделевого перерізу спостерігається при ($\varphi = 90^\circ$):

$$A_M^{\min} = \pi a^2. \quad (2.11)$$

2.3 Аеродинамічний та електричний вплив на частинку еліпсоїдної форми у пневмоелектричному каналі

Для дослідження поведінки частинки насінневої суміші у пневмоелектричному каналі доцільно розглянути всі сили, що діють на неї.

Аналіз формули (2.9) показує, що площа міделевого перерізу визначається не лише геометричними параметрами еліпсоїдної частинки, представленими малою піввіссю (a) та великою піввіссю (b), але й кутом її повороту φ відносно осі Y .

Характеристика силового впливу частинки була виконана на основі аналізу даних, представлених на рис. 2.2.

На частинку діє рівнодійна трьох силових компонентів: гравітаційної сили G , електричної сили F_e та сили аеродинамічного потоку F_p .

Сила тяжіння G спрямована вертикально вниз і прикладена в центрі маси частинки, точці C (рис. 2.2).

$$G = m g, \quad (2.12)$$

де m – маса насінини;

g – прискорення вільного падіння.

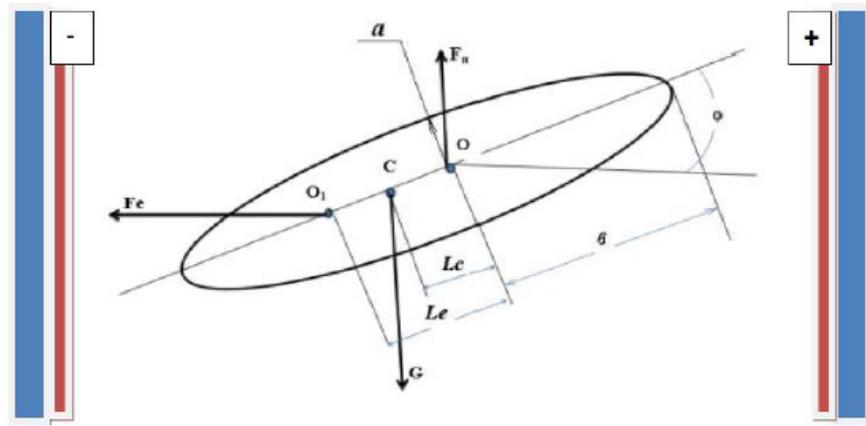


Рисунок 2.2 - Схема силового впливу на частинку насінневої суміші у пневмоелектричному каналі:

F_e – електрична сила; G – сила тяжіння; F_n – сила аеродинамічного потоку; C – центр маси частинки; O_1 – центр заряду; O – геометричний центр; L_c – відстань від геометричного центру O до центру мас C ; L_e – відстань від геометричного центру O до центру заряду O_1 ; φ – кут між піввіссю b та горизонтальною площиною.

Рівнодійна електричних сил F_e спрямована горизонтально і прикладена вздовж півосі симетрії еліпсоїдної частинки у точці центру заряду O_1 (рис. 2.2).

$$F_e = E q, \quad (2.13)$$

де E – напруженість електростатичного поля, створеного між пластинами з протилежними зарядами;

q – заряд частинки.

Рівнодійна сили аеродинамічного потоку F_n спрямована вертикально вгору і прикладена в геометричному центрі еліпсоїдної частинки O (рис. 2.2).

$$F_n = K V_n A_m, \quad (2.14)$$

де K – коефіцієнт опору середовища;

V_n – швидкість повітряного потоку;

A_m – площа міделевого перерізу частинки.

Для більш детального аналізу процесу пневмоелектричного сепарування під дією зазначених сил на частинку насінневої суміші доцільно розглянути окремі часткові випадки:

а) Випадок, коли сила аеродинамічного потоку F_n дорівнює силі тяжіння

G

У цьому випадку рівнодійна трьох сил спрямована вздовж електричної сили F_e і проходить через центр мас C , за умови виконання наступного співвідношення:

$$\sum_{k=1}^n M_c(F_n) = 0. \quad (2.15)$$

Умову (2.15) можна подати у вигляді наступного аналітичного виразу:

$$F_n \times L \times \cos \varphi - F_e \times L_e \times \sin \varphi = 0. \quad (2.16)$$

Враховуючи, що $F_n = G$, з рівності (2.16) можна отримати значення кута φ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{G \cdot L_c}{F_e \cdot L_e}. \quad (2.17)$$

Використовуючи співвідношення (2.16) та (2.17), можна визначити швидкість повітряного потоку:

$$V_n = \frac{G}{K A_m} = \frac{G \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + e^2 \sin^2 \varphi}}{K \pi a^2 b}. \quad (2.18)$$

Беручи до уваги співвідношення (2.16), вираз (2.18) набуває наступної форми:

$$V_n = \frac{G}{K \pi a^2 b} \sqrt{\frac{(a F_e L_e)^2 + (b G L_c)^2}{(F_e L_e)^2 + (G L_c)^2}}. \quad (2.19)$$

Формула (2.19) дозволяє визначити швидкість повітряного потоку, за якої частинки насіннєвої суміші перебувають у пневмоелектричному каналі у стані рівноваги. У цьому стані підйомна сила, створювана потоком, за величиною дорівнює силі тяжіння, але діє у протилежному напрямі, що забезпечує відсутність вертикального переміщення насінини.

б) Випадок, коли сила повітряного потоку менша за силу тяжіння частинки

У такому разі:

$$G > K \cdot V_n \cdot A_m. \quad (2.20)$$

Зазначена нерівність справджується для будь-якого значення кута φ , за умови:

$$V_n < \frac{G}{K \pi a b}. \quad (2.21)$$

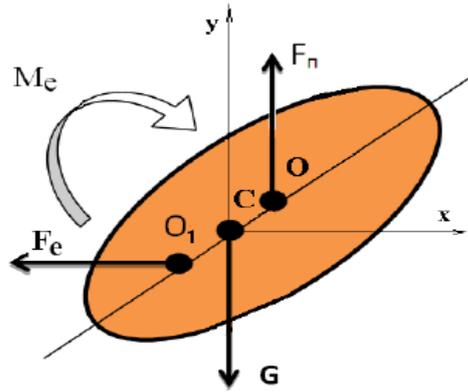


Рисунок 2.3 - Схема сил, що діють на частинку еліпсоїдної форми

Розглянемо визначення головного вектора F_φ та моменту аеродинамічних сил, які виникають у процесі обертання насінини навколо осі x , що проходить через центр мас C :

$$F_\varphi = K \frac{d\varphi}{dt} \iint_A y dA, \quad (2.22)$$

де A – площа еліпса.

$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{(Y_1 - L_c)^2}{b^2} = 1. \quad (2.23)$$

Враховуючи наведене $dA = 2a \sqrt{1 - \frac{(Y_1 - L_c)^2}{b^2}} dY_1$, підставивши відповідні значення у формулу (2.22), отримуємо вираз:

$$F_\varphi = K \frac{d\varphi}{dt} \int_{-b+L_c}^{b+L_c} 2ay_1 \sqrt{1 - \frac{(Y_1 - L_c)^2}{b^2}} dy_1, \quad (2.24)$$

Для обчислення інтеграла у формулі (2.24) доцільно здійснити заміну змінної:

$$y_1 = L_c + b \sin \theta;$$

$$dy_1 = b \cos \theta d\theta.$$

При таких умовах:

$$F_\varphi = K \frac{d\varphi}{dt} \cdot 2ab \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (L_c + b \sin \theta) \cos^2 \theta d\theta = K \frac{d\varphi}{dt} \cdot 2ab \left(L_c \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\sin \theta}{4} - \frac{b \cos^3 \theta}{3} \right) \right) \Bigg|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}};$$

$$F_\varphi = K \frac{d\varphi}{dt} \pi ab L_c. \quad (2.25)$$

Проекції даної сили на відповідні осі координат можна записати у

вигляді:

$$F_{\varphi} = K \frac{d\varphi}{dt} \pi ab L_c \cdot \sin \varphi;$$

$$F_{\varphi} = -K \frac{d\varphi}{dt} \pi ab L_c \cdot \cos \varphi. \quad (2.26)$$

Аналогічним чином можна визначити момент дії цих сил відносно осі обертання:

$$M_{\varphi} = -K \frac{d\varphi}{dt} 2a \int_{-b+L_c}^{b+L_c} y_1^2 \sqrt{1 - \frac{(Y_1 - L_c)^2}{b^2}} dy_1 =$$

$$= -K \frac{d\varphi}{dt} \cdot 2ab \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (L_c + b \sin \theta)^2 \cos \theta^2 d\theta. \quad (2.27)$$

Виконавши інтегрування рівняння (2.27), отримуємо наступний вираз:

$$M_{\varphi} = -K \frac{d\varphi}{dt} \cdot \pi ab \left(L_c^2 + \frac{b^2}{4} \right). \quad (2.28)$$

У проєкціях на осі координат (ХОУ) (рис. 2.5) диференціальні рівняння руху частинок можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_c}{dt^2} = -F_e - K \frac{dx_c}{dt} \cdot A_2; \\ m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = -mg + K \left(V_n - \frac{dy_c}{dt} \right) A_m; \\ I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = K \left(V_n - \frac{dy_c}{dt} \right) A_1 L_c \cos \varphi - \frac{d\varphi}{dt} \cdot K \cdot H + K \frac{dx_c}{dt} A_2 L_c \sin \varphi. \end{cases} \quad (2.29)$$

де $A_1 = A_m$, A_2 – проєкція площі міделевого перерізу на осі ox :

$$\int_0^b y^2 \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} = b^3 \frac{\pi}{16}.$$

Систему диференціальних рівнянь (2.29) було розв'язано за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта при наступних початкових умовах:

$$t = 0; \quad X_c = 0; \quad Y_c = 0; \quad \varphi = 0; \quad \frac{d\varphi}{dt} = 0; \quad \frac{dX_c}{dt} = 0; \quad \frac{dY_c}{dt} = 0;$$

Система диференціальних рівнянь (2.29) описує математичну модель руху частинки насінневої суміші еліпсоїдної форми у пневмоелектричному каналі під впливом комплексного дії сил: гравітаційної, електростатичного поля та аеродинамічного потоку. Розв'язок цієї системи дозволяє визначити

координати центру мас частинки як функції часу, а також кут її обертання навколо центру мас у будь-який момент часу.

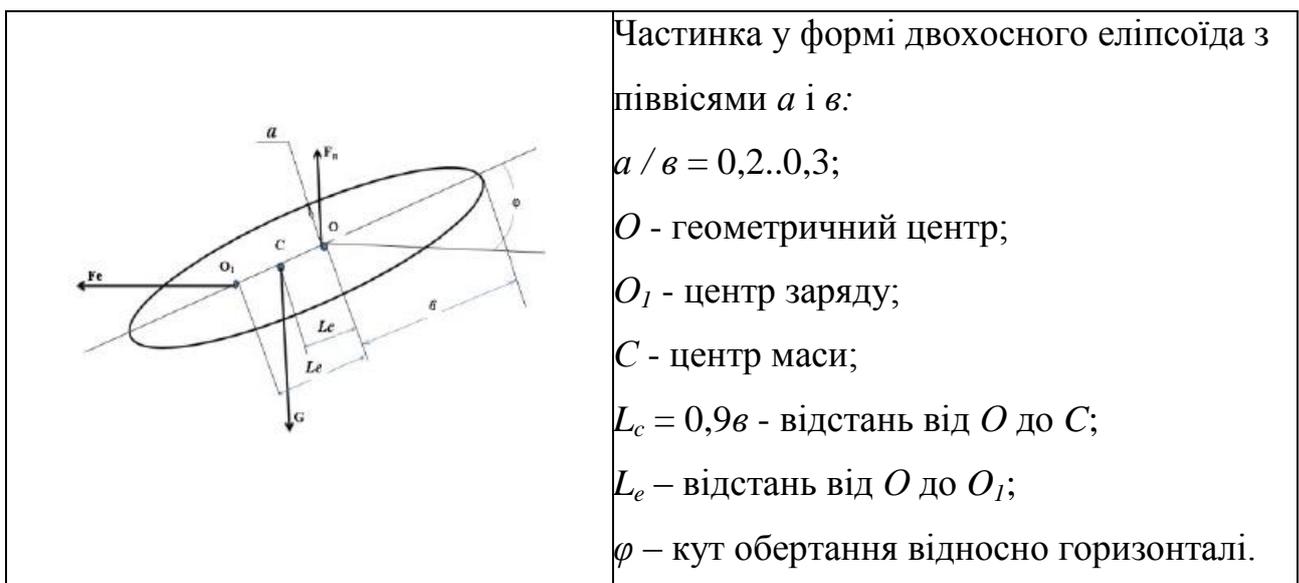
2.4 Моделювання насінин та силової дії на них

Результативність процесу сепарування досліджуваних насінневих сумішей визначається величиною відмінності траєкторій руху окремих компонентів – повноцінних насінин, насінин без зародків та домішок бур'янів. Чим більшою є різниця у характері їх переміщення у висхідному повітряному потоці та електростатичному полі, тим ефективніше відбувається розділення. Досягнення такої умови можливе шляхом теоретичного аналізу руху частинок, що відтворюють реальні геометричні, масові та аеродинамічні властивості кожного з типів насіння.

Для цього були розроблені моделі частинок, які максимально відображають фізичні характеристики реальних насінин. У моделюванні враховано масу, параметри еліпсоїдної форми (півосі a і b), положення центра мас L_c та центра заряду L_e , а також вплив повітряного потоку V_p і електричної сили F_e . З огляду на ці чинники розглядалися такі типи моделей:

- Модель M1 – насінина якісної культури:

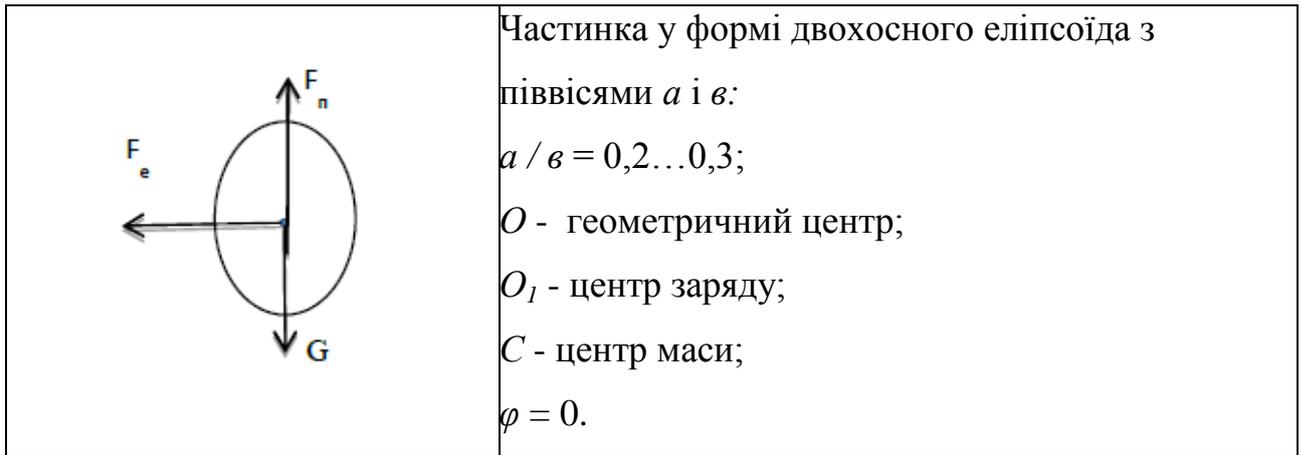
$M1 = f(m_1, a_1, b_1, L_e, L_c, V_p, F_e)$, за умови $L_e > L_c > 0$.



Така модель характеризує частинки з помітним зміщенням центра заряду відносно центра мас, що істотно впливає на їх обертальний рух.

- Модель М2 – насінина без зародка:

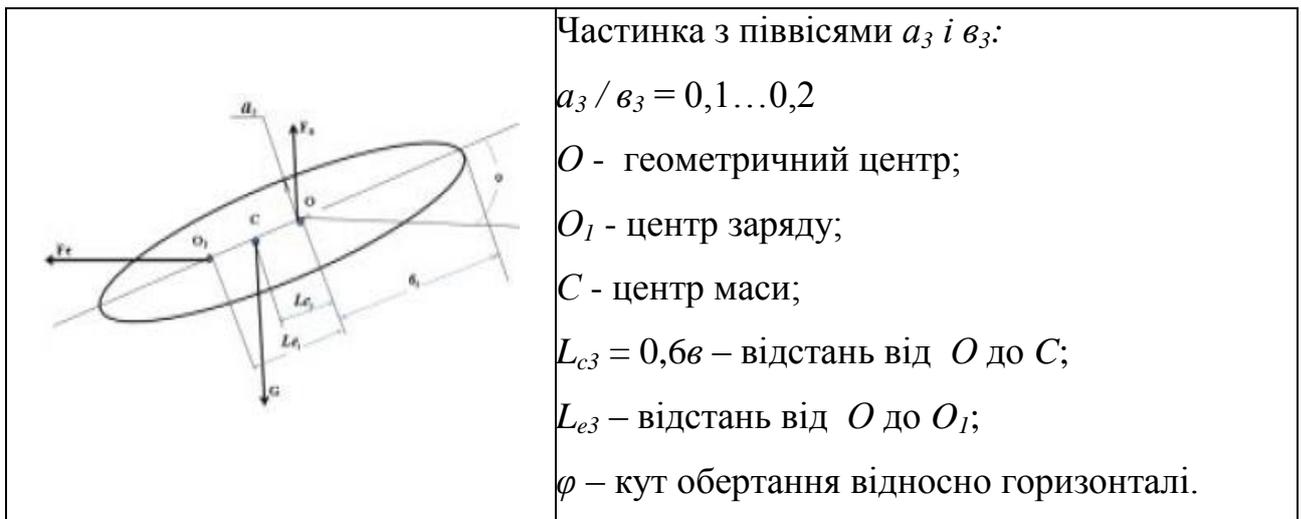
$$M2 = f(m_2, a_2, b_2, L_e, L_c, V_p, F_e), \text{ при } L_e = L_c = 0.$$



Оскільки центр мас та центр заряду збігаються, а маса є меншою, така частинка характеризується іншою аеродинамічною рівновагою та відмінною траєкторією руху.

- Модель М3 – насіння бур'янів:

$$M3 = f(m_3, a_3, b_3, L_{e1}, L_{c1}, V_p, F_e), \text{ при } L_{e1} > L_{c1} > 0.$$



Форма та маса таких частинок істотно відрізняються від культурних насінин, що забезпечує їхнє характерне переміщення у потоці та сприяє ефективному виділенню.

- Модель М4 – насіння іншої культури:

$$M4 = f(m_4, a_4, b_4, L_{e4}, L_{c4}, V_p, F_e),$$



Це дозволяє дослідити поведінку домішок, які можуть бути подібними до основної культури за формою, але відрізнятися за аеродинамічними властивостями.

Використання таких моделей забезпечує можливість комплексного моделювання силового впливу на частинки різних типів та прогнозування їхніх траєкторій у пневмоелектричному полі, що є ключовим чинником оптимізації процесу сепарування.

Оскільки математичне моделювання руху частинок насіннєвих сумішей еліпсоїдної форми у пневмоелектричному каналі приводить до побудови системи диференціальних рівнянь, саме їх розв'язання дає змогу визначити траєкторії переміщення кожної змодельованої частинки. Аналіз таких траєкторій дозволяє теоретично оцінити ступінь можливості ефективного розділення компонентів суміші.

Чисельне інтегрування системи рівнянь руху (2.25) здійснювалося методом Рунге-Кутта у програмному середовищі MATLAB. У результаті отримано розрахункові траєкторії руху еліпсоїдних частинок у каналі пневмоелектросепаратора, що дало можливість виконати всебічний аналіз процесу сепарування. Дослідження отриманих кривих переміщення дає змогу:

- оцінити вплив як регульованих, так і нерегульованих параметрів роботи сепаратора на характер руху частинок еліпсоїдної форми, а також врахувати вагові, фрикційні, геометричні та аеродинамічні властивості компонентів насіннєвої суміші;
- визначити комплекс ознак подільності частинок за їхніми

аеродинамічними та електростатичними характеристиками;

- встановити умови, за яких стає можливим надійне відокремлення важковідділюваних домішок і біологічно неповноцінних насінин, зокрема таких, що не містять зародка.

Представлені на рис. 2.4 розрахункові траєкторії руху змодельованих частинок дають змогу проаналізувати характер впливу напруженості електричного поля на їх переміщення вздовж та поперек робочого каналу пневмоелектросепаратора. Отримані графічні залежності відображають зміну просторового положення частинок різних фракцій під дією сили електричного поля, що дозволяє визначити ступінь їх розділення за координатами каналу та встановити оптимальні умови сепарації.

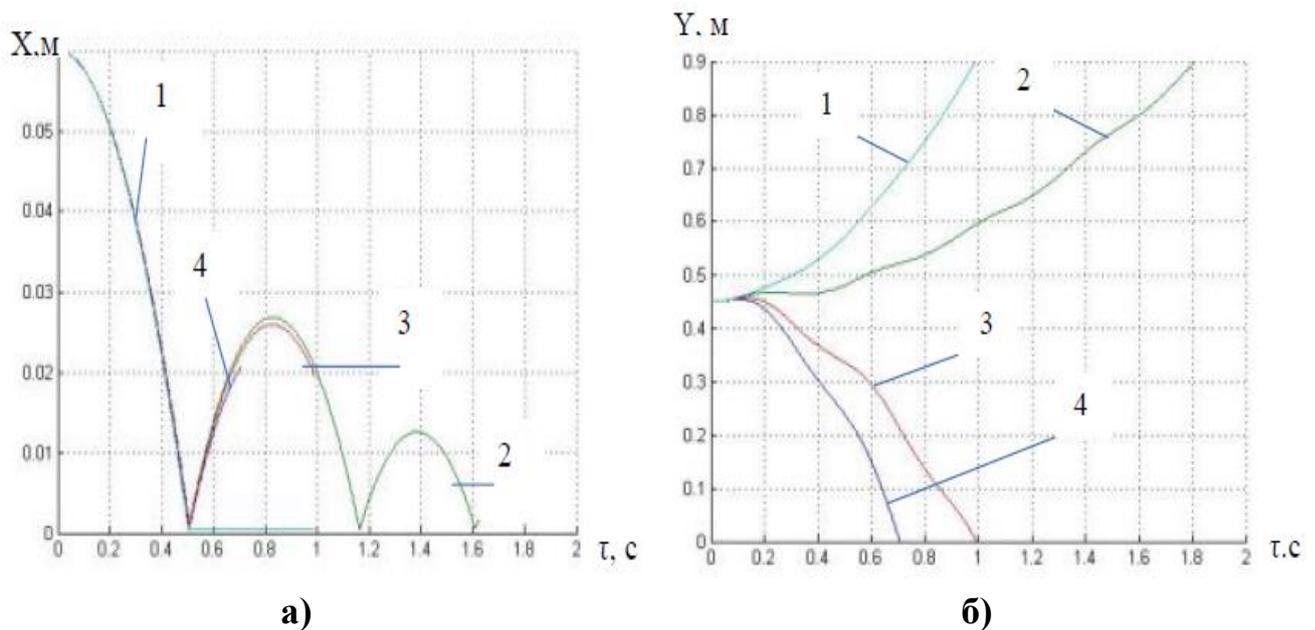


Рисунок 2.4 - Графіки руху частинок: а) за шириною каналу; б) за довжиною каналу; 1 – (M_1), 2 – (M_2), 3 – (M_3), 4 – (M_4)

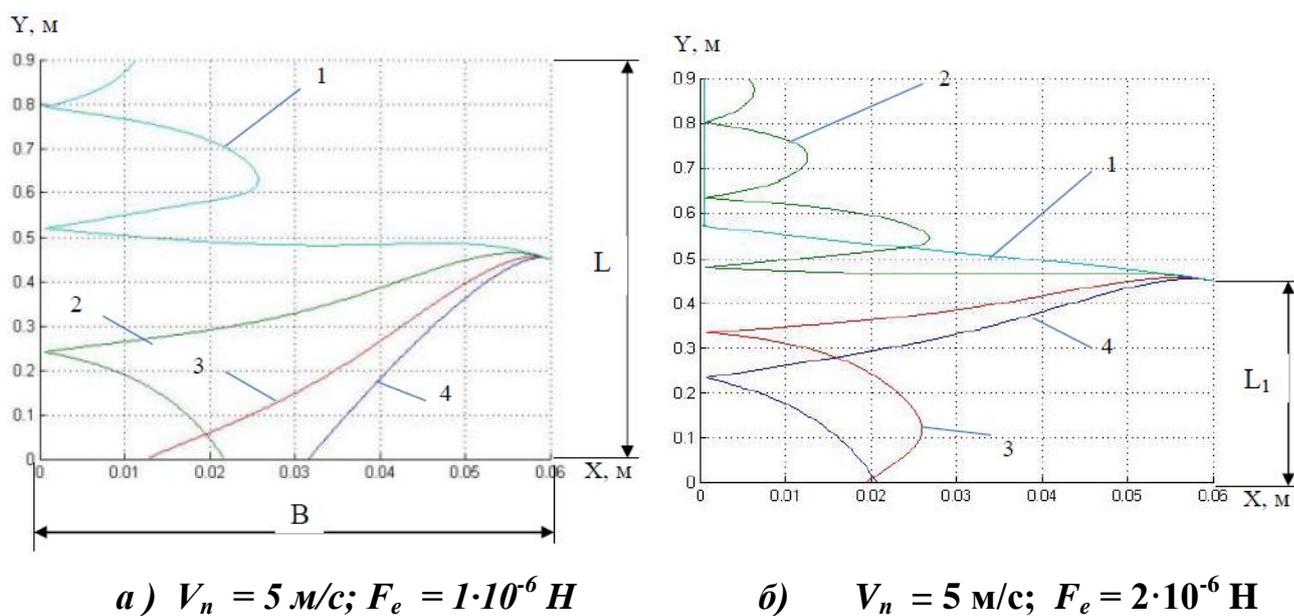
Аналіз отриманих траєкторій переміщення частинок за шириною каналу показав, що на початковому етапі руху ($\tau = 0 \dots 0,6$ с) різниця між компонентами практично не проявляється. Подальший характер переміщення залежить від типу частинки: час перебування у робочому каналі для основної культури та бур'яних домішок виявився різним, тоді як найдовше – до 1,8 с – у повітряному потоці утримується частинка неякісного насіння без зародка M_2 .

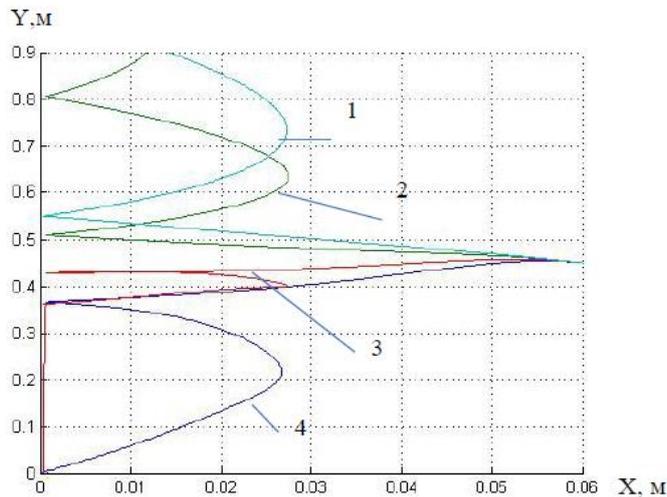
Д о с л і д ж е н н я траєкторій переміщення вздовж каналу засвідчило істотні відмінності як у напрямку руху, так і у тривалості

перебування частинок у зоні дії силових полів. Моделі М3 та М4 характеризуються переміщенням донизу каналу протягом $\tau = 0,7 \dots 1$ с, тоді як частинки, що відповідають моделям М1 та М2, спрямовуються вгору і залишаються в каналі значно довше – у межах $\tau = 1 \dots 1,8$ с. Такий розподіл траєкторій підтверджує можливість ефективного розділення частинок за довжиною каналу пневмоелектросепаратора.

Напруженість електричного поля, сформованого між електропровідними пластинами вертикального каналу, чинить істотний вплив на характер руху сепарувальних частинок. Електричне поле, яке фактично виступає додатковим робочим органом у складі пневмоелектросепаратора, дає змогу врахувати морфологічні та біологічні особливості поверхні насінин, що значно розширює функціональні можливості традиційних пневмосепараційних систем. Оскільки насіння культурних рослин і насіння бур'янів належать до різних біологічних видів, їх електричні характеристики також суттєво відрізняються. У зоні дії електричного поля ці частинки набувають різного заряду і, відповідно, демонструють неоднакову реакцію на повітряний потік.

Це положення підтверджується аналізом розрахункових траєкторій частинок, отриманих для різних значень напруженості електричного поля (рис. 2.5).





в) $V_n = 5 \text{ м/с}; F_e = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$

Рисунок 2.5 - Вплив сили електростатичного поля F_e на розрахункові траєкторії руху моделей насінин за умови сталої швидкості повітряного потоку $V_n = 5 \text{ м/с}$

Аналіз отриманих результатів (рис. 2.5) показує, що досліджувані частинки демонструють істотно різні траєкторії руху за значень сили електростатичного поля $F_e = 2 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$. Це має ключове значення для забезпечення ефективного процесу сепарування, оскільки висока якість розподілу досягається за умови максимальної різниці траєкторій руху якісного насіння М1, насіння без зародків М2, бур'янів М3 та насіння інших культур М4.

Результати моделювання засвідчили, що найсприятливіші умови для відокремлення біологічно неповноцінних насінин без зародків від кондиційного насіння культури досягаються при швидкості повітряного потоку $V_n = 5 \text{ м/с}$ та силі електростатичного поля $F_e = 2 \dots 3 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$. За таких параметрів частинки М1 і М2 переносяться повітряним потоком у верхню частину каналу 10, де їх подальший рух розходиться:

- якісне насіння М1 потрапляє у приймальник кондиційного матеріалу 13;
- насіння без зародків М2 втягується у відцентровий вентилятор 2, після чого спрямовується у фільтр легких домішок 14 (див. рис. 3.1).

Частинки бур'янів М3 та сторонніх культур М4 мають іншу кінематику – вони опускаються вниз каналу 10 й надходять у ємність для відходів 12.

На підставі проведених досліджень визначено оптимальні геометричні параметри робочої зони пневмоелектричного каналу, що забезпечують

ефективне розділення компонентів дрібнонасіненної суміші (рис. 2.15):

- ширина каналу $B = 0,06$ м;
- довжина каналу $L = 0,9$ м;
- відстань від основи каналу до точки подачі вихідної суміші $L_1 = 0,45$ м

Застосування додаткової електростатичної дії дає змогу враховувати індивідуальні поверхневі та біологічні характеристики частинок насінневої суміші, що суттєво розширює функціональні можливості пневмоелектросепараторів та підвищує якість розділення складних сумішей.

Висновок до другого розділу

У розділі встановлено закономірності руху частинок насінневої суміші еліпсоїдної форми в пневмоелектричному каналі під дією повітряного та електростатичного полів. Показано, що площа міделевого перерізу та кут орієнтації частинки визначають величину аеродинамічної сили, а напруженість електричного поля суттєво впливає на траєкторії руху різних типів насіння. Чисельне моделювання дозволило оцінити ефективність розділення якісного насіння, насіння без зародків, бур'янів та сторонніх культур. Встановлено оптимальні умови роботи каналу ($V_{п} = 5$ м/с, $F_e = 2...3 \cdot 10^{-6}$ Н) та геометричні параметри, що забезпечують максимальне розходження траєкторій і ефективне розділення компонентів суміші. Отримані результати слугують теоретичною основою для проектування конструктивно-технологічних параметрів пневмоелектросепаратора.

РОЗДІЛ 3

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ

3.1 Формулювання завдання та програма експериментів

Експериментальна частина роботи була спрямована на здобуття інформації, необхідної для побудови математичної моделі процесу пневмоелектросепарування дрібнонасінневих сумішей злакових трав, а також на перевірку теоретичних положень щодо характеру руху частинок у вертикальному пневматичному каналі. Крім того, дослідження мали на меті визначення раціональних геометричних параметрів робочого органу сепаратора, установлення оптимальних режимів його функціонування та оцінку ефективності роботи обладнання на основі аналізу очистки насіннєвого матеріалу від важковідділюваних домішок і біологічно нежиттєздатних насінин (без зародків).

Відповідно до поставленої наукової задачі лабораторна та експериментальна програма включала такі етапи:

- проведення багатофакторного планового експерименту з метою визначення впливу регульованих параметрів на ефективність відокремлення із сумішей важковідділюваних бур'янів та біологічно неповноцінних насінин;
- обґрунтування основних конструктивних параметрів і режимів роботи пневмоелектросепаратора на основі аналізу отриманих експериментальних даних;
- установлення впливу додаткового етапу сепарування на покращення посівних властивостей насіння злакових багаторічних трав.

3.2 Обґрунтування конструкції та роботи установки

З метою підвищення продуктивності пневмосепараторів із вертикальним каналом сепарування було запропоновано модернізувати їх шляхом оснащення

повітряного каналу системою електродів, між якими формується електростатичне поле високої напруги. Така технічна модифікація забезпечує можливість диференціювати насіння культурних рослин і бур'янів, оскільки їхні фізико-механічні та електричні характеристики істотно відрізняються. Додатково створюване електростатичне поле виконує функцію не лише розділення, але й часткового знезараження та стимулювання насіння, що зрештою сприяє підвищенню його посівної якості [7].

Для проведення лабораторних та експериментальних досліджень, спрямованих на очищення сумішей багаторічних злакових трав від важковідділюваного насіння бур'янів і біологічно нежиттєздатних насінин культурних рослин (без зародків), застосовано модернізований пневмоелектросепаратор марки «Petkus K-293». Суть удосконалення полягала у встановленні в робочу зону – пневматичний вертикальний канал – двох електропровідних пластин із фольгованого гетинаксу, на які подавалась регульована постійна висока напруга в діапазоні 0 - 30 кВ. У результаті напруженість електростатичного поля змінювалася в межах 0...4 кВ/см² [8]. Загальний вигляд модернізованої установки та її технологічна схема наведені на рис. 3.1.

У процесі сепарування частинки насінневої суміші набували різних електричних зарядів і відповідно по-різному переміщувалися в потоці повітря. Це забезпечувало ефективніше розділення дрібнонасінневих сумішей із значною часткою важкорозділюваних компонентів. Схему конструктивного вдосконалення сепаратора подано на рис. 3.2.

Принцип роботи пневмоелектросепаратора можна описати так. Насіннева суміш надходить із завантажувального бункера 8 і через регульований вібродозатор 9 подається у вертикальний пневмосепарувальний канал 10. У середині каналу розміщено два електроди з фольгованого гетинаксу 17, до яких підводиться висока постійна напруга від джерела високої напруги (ДВН) 5.

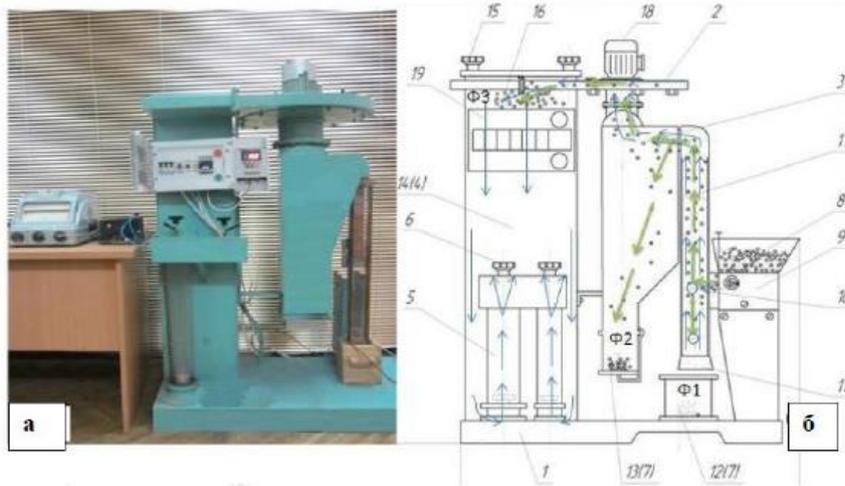


Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд (а) та технологічна схема функціонування (б) модернізованого пневмоелектричного сепаратора.

Позначення фракцій: Φ1 – насіння бур'янів; Φ2 – насіння основної культури; Φ3 – легкі домішки.

Напрямки руху: повітря \longrightarrow насіння \longrightarrow

Елементи конструкції: 1 – станина; 2 – вентилятор; 3 – сепаратор баштовий; 4 – модуль фільтрувальний; 5 – трубки контролю витрати повітря; 6 – регулятор швидкості потоку повітря; 7 – ємності для продуктів розділення; 8 – бункер; 9 – дозатор вібраційного типу; 10 – сепарувальний вертикальний канал; 11 – отвір вхідний; 12 – контейнер для відходів; 13 – ємність для очищеного насіння; 14 – секція фільтрувальна; 15 – кріпильні болти кришки фільтра; 16 – кришка секції фільтрувальної; 17 – електроди; 18 – двигун електричний; 19 – блок управління.

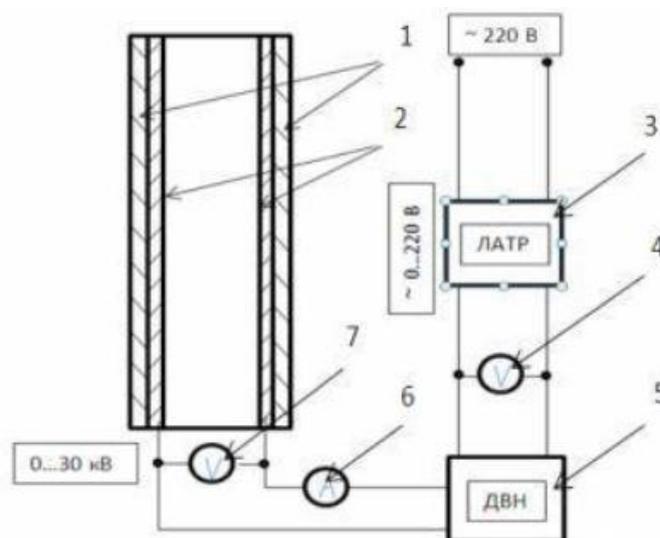


Рисунок 3.2 - Схема встановлення та підключення електродів:

1 - канал сепараційний; 2 - електроди; 3 - лабораторний автотрансформатор; 4 - вольтметр; 5 - джерело високої напруги (ДВН); 6 - амперметр; 7 – кіловольтметр.

Насіннева суміш під дією спрямованого знизу догори повітряного потоку, що створюється вентилятором 2, а також під впливом регульованого електростатичного поля, сформованого електродами 17, розподіляється на три основні фракції. Насіння бур'янів та інші домішки, маса яких перевищує масу насіння основної культури, осідають у нижню місткість 12 (див. рис. 3.1). Насіння цінної культури разом із щуплими насінинами без зародків і легкими механічними домішками під дією аеродинамічних сил і електростатичного поля переміщується вгору каналом 10 та надходить у баштовий сепаратор 3. У цьому елементі за рахунок збільшення площі поперечного перерізу повітряна швидкість зменшується, що сприяє осіданню повноцінного насіння, яке накопичується в місткості 13.

Найменш масивні домішки разом з дрібним некондиційним насінням втягуються у відцентровий вентилятор 2 і спрямовуються до фільтра легких часток 14. Цей фільтр потребує регулярного очищення, частота якого визначається рівнем засміченості вихідної суміші.

Керування електродвигуном вентилятора 18, вібродозатором 9 та подачею напруги на електроди 17 здійснюється з блоку керування 19. Витрата повітря контролюється за допомогою витратомірів 5 (див. рис. 3.1), а регулювання швидкісних параметрів повітряного потоку забезпечується перетворювачем частоти АСФ 110. Вимірювання швидкості руху повітря здійснювали лопатевим анемометром УТ 362, метрологічні характеристики якого наведено в таблиці 3.1. Показники швидкості й температури повітряного середовища відображалися на дисплеї приладу.

На першому етапі експериментів було визначено критичні швидкості витання насіння багаторічних злакових трав та домішок, що важко піддаються відділенню. Другий етап передбачав безпосереднє проведення процесу

сепарування, а саме виділення біологічно неповноцінного насіння без зародків та насіння бур'янів зі складних дрібнонасіненевих сумішей.

3.3 Планування багатофакторного експерименту

Основним завданням багатофакторного експерименту було встановлення характеру впливу керованих параметрів процесу сепарування - подачі насіння (Q , кг/год), швидкості повітряного потоку у вертикальному каналі ($V_{\text{п}}$, м/с) та напруженості електричного поля між електродами (E , кВ/см) – на показники якості сформованого посівного матеріалу. Критерієм оцінки служив показник (K , %), що визначає частку повноцінних, тобто таких, що містять зародок, насінин.

Експериментальні дослідження здійснювали з використанням насіння райграсу пасовищного сорту «Осип» третьої репродукції з вологістю 9%. Під час проведення дослідів значення всіх керованих параметрів послідовно змінювали відповідно до схеми, закладеної у плані експерименту.

Подачу насінневої суміші здійснювали безпосередньо у вертикальний канал сепаратора, що виключало можливість попереднього заряджання частинок і забезпечувало однаковість початкових умов їхнього руху. Після завершення процесу розділення з кожної отриманої фракції відбирали проби для визначення кількості насінин без зародків. Для отримання статистично достовірних результатів кожену комбінацію значень подачі, швидкості повітря та напруженості електростатичного поля повторювали тричі.

Для опрацювання результатів і визначення закономірностей впливу досліджуваних факторів використано методику математичного планування експерименту. Застосування симетричного некомпозиційного плану другого порядку [27] дало можливість сформулювати уявлення про форму поверхні відгуку та одержати аналітичний опис залежності, який у загальному вигляді можна подати так:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3), \quad (3.1)$$

де Y – показник якості матеріалу;

x_1 , x_2 та x_3 - змінні параметри - кодовані, що відповідають подачі насіння, швидкості повітряного потоку та напруженості електричного поля. У дослідженні ці фактори змінювали на трьох рівнях: 0 та ± 1 . Застосований план експерименту являє собою поєднання дворівневих (-1 , $+1$) повних факторних схем із неповноблочними збалансованими планами [15].

У більшості випадків результати багатофакторного експерименту описують за допомогою математичної моделі у формі поліноміального рівняння, яке називають рівнянням регресії. Для трьох факторів повне квадратне рівняння набуває такого загального вигляду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.2)$$

де b_0 , b_1 , b_2 , b_3 – коефіцієнти, що відповідають відповідним значенням x .

Для подальшого опрацювання експериментальних даних натуральні значення факторів були перетворені у безрозмірну форму шляхом кодування. Взаємозв'язок між кодованими змінними x_i та їх відповідними натуральними значеннями X_i задається наступним співвідношенням:

$$x_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta X_1}; \quad x_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta X_2}; \quad x_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta X_3}; \quad (3.3)$$

де X_1 , X_2 , X_3 - натуральні значення відповідно подачі насіння, швидкості повітряного потоку та напруженості електричного поля;

X_{10} , X_{20} , X_{30} - натуральні величини цих параметрів, що відповідають нульовому рівню;

ΔX_1 , ΔX_2 , ΔX_3 - інтервали варіювання факторів X_1 , X_2 , X_3 .

Нульовий рівень параметра визначають як центральну точку інтервалу його варіювання, тобто середнє значення діапазону зміни чинника. Відповідно до результатів теоретичних розрахунків і попередніх експериментів [25, 27], центрам варіювання досліджуваних факторів відповідають такі натуральні значення: подача насіння ($X_{10} = 3$ кг/год), швидкість повітряного потоку ($X_{20} = 5$ м/с), напруженість електричного поля ($X_{30} = 0,77$ кВ/см). Кодування параметрів приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Кодування параметрів

Параметри	Натуральне позначення	Позначення кодоване	Варіювання інтервал	Рівні варіювання					
				натуральні			кодовані		
				Верхній (+1)	Нульовий (0)	Нижній (-1)	Верхній (+1)	Нульовий (0)	Нижній (-1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Подача насіння Q , кг/год	X_1	x_1	1	4	3	2	+1	0	-1
Швидкість руху повітряного потоку V_n , м/с	X_2	x_2	0,5	5,5	5	4,5	+1	0	-1
Напруженість електричного поля E , кВ/см	X_3	x_3	0,15	0,92	0,77	0,62	+1	0	-1

Для визначення коефіцієнтів регресійного полінома [12] було застосовано трирівневий план другого порядку типу Бокса-Бенкіна (див. табл. 3.1). Відповідно до цього плану було виконано багатофакторний експеримент, який складався з п'ятнадцяти дослідних запусків. Матриця планування експерименту подана в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Матриця-планування дослідів

№ дослідів	Значення кодованих чинників		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1

9	0	-1	-1
10	0	1	-1

Отримані під час досліджень експериментальні дані підлягали перевірці на відтворюваність, що здійснювали шляхом обчислення дисперсії відтворюваності. Оцінювання однорідності дисперсій проводили за критерієм Кохрена [10]. Відповідно до цього критерію, припущення про відтворюваність дослідів вважали прийнятним за умови, що розрахунковий показник (G_p) не перевищував табличного значення, тобто:

$$G_p \leq G_T(0,05; n; f_i), \quad (3.4)$$

де 0,05 - рівень значущості 5%;

n - кількість незалежних дисперсій (загальна кількість дослідів);

f_i - число ступенів вільності для кожної дисперсії.

Розрахунок фактичного значення критерію Кохрена здійснювали за формулою:

$$G_p = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (3.5)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності i -го незалежного дослідів;

$S_{i_{\max}}^2$ – максимальне значення дисперсії відтворюваності з усіх дослідів.

Дисперсія відтворюваності для кожного окремого дослідів обчислювалась за залежністю:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{uik} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.6)$$

де k - номер повторення;

y_{uik} - значення вихідного показника в k -му повторі i -го дослідів;

\bar{y}_u - середнє значення вихідного параметра для відповідного дослідів.

Усі розрахунки, пов'язані з оцінюванням відтворюваності, були виконані в програмному середовищі Microsoft Office Excel, а отримані результати наведено у розділі 4.

Обчислення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювали за такими залежностями:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \bar{y}_u; \\ b_1 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u; \\ b_{ij} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Значення x_{iu} та x_{ju} відповідали, відповідно, і-му та j-му кодованим факторам у u-му досліді згідно з рядками план-матриці. Обчислення коефіцієнтів регресійної моделі здійснювали в середовищі Microsoft Office Excel відповідно до формул (3.8), а отримані результати наведені в розділі 4.

Значення вихідного параметра y_u визначали шляхом оброблення експериментальних даних за формулою:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{3}(y_{u1} + y_{u2} + y_{u3}), \quad (3.8)$$

де y_{ui} - експериментально отримані значення вихідної величини при і-му повторенні.

Адекватність побудованої моделі оцінювали за критерієм Фішера F [10]. Модель визнавали адекватною, якщо виконувалася умова:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \langle F(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (3.9)$$

де S_{ad}^2 - дисперсія адекватності;

$F = (0,05; f_{ad}; f_y)$ - табличне значення критерію Фішера при 5 % рівні значущості;

f_{ad} - число ступенів вільності дисперсії адекватності;

f_y - число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Число ступенів вільності дисперсії адекватності визначали як:

$$f_{ad} = n - k - 1, \quad (3.10)$$

де k - кількість факторів,

n — число дослідів.

Ступені вільності дисперсії відтворюваності обчислювали за формулою:

$$f_y = n (m_0 - 1), \quad (3.11)$$

де m_0 - кількість повторень кожного досліду.

Дисперсію адекватності обчислювали за залежністю:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k - 1} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2, \quad (3.12)$$

де y - розрахункове значення відгуку, отримане за рівнянням регресії.

У процесі багатофакторного експерименту контрольованим показником було визначено частку біологічно неповноцінних, тобто насінин без зародків, у досліджуваних сумішах.

Аналогічним чином проводили вивчення впливу керованих параметрів процесу сепарування – подачі насіння (Q , кг/год), швидкості повітряного потоку у вертикальному каналі (Vn , м/с) та напруженості електричного поля (E , кВ/см) між електродами – на якісні показники посівного матеріалу. Останні характеризувалися вмістом (B , %) повноцінного насіння основної культури у відібраних фракціях.

На основі проведених теоретичних та попередніх експериментальних досліджень [25, 27] нульові рівні досліджуваних факторів були встановлені такими: подача насіння ($X_{10} = 3$ кг/год), швидкість повітряного потоку ($X_{20} = 6$ м/с), напруженість електричного поля ($X_{30} = 1$ кВ/см). Результати їх кодування наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Ккодування досліджуваних чинників

Параметри	Натуральне позначення	Позначення кодоване	Варіювання інтервал	Рівні варіювання					
				натуральні			кодовані		
				Верхній (+1)	Нульовий (0)	Нижній (-1)	Верхній (+1)	Нульовий (0)	Нижній (-1)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Подача насіння Q , кг/год	X_1	x_1	1	4	3	2	+1	0	-1
Швидкість руху повітряного потоку V_n , м/с	X_2	x_2	0,5	5,5	5	4,5	+1	0	-1
Напруженість електричного поля E , кВ/см	X_3	x_3	0,15	0,92	0,77	0,62	+1	0	-1

Ефективність роботи сепараційного процесу оцінювали шляхом визначення кількості насіння важковіділюваних бур'янів та встановлення їх відсоткової частки у вихідному матеріалі до та після проходження пневмоелектросепарації. Отримані експериментальні дані обробляли із використанням програмних пакетів Microsoft Office Excel та Statistica 8.0, результати чого наведено у розділі 4.

Висновок до третього розділу

У розділі обґрунтовано конструкцію пневмоелектросепаратора, що поєднує дію висхідного повітряного потоку та електростатичного поля, забезпечуючи підвищену ефективність вилучення домішок і дефектного насіння. Морфологічний аналіз частинок методом електронної мікроскопії дав можливість встановити якісний склад сумішей та оцінити результативність сепарації. Застосування методів математичного планування експериментів дозволило визначити вплив основних регульованих параметрів і сформулювати

оптимальні умови роботи сепаратора для отримання високоякісного посівного матеріалу.

РОЗДІЛ 4
ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО
ПНЕВМОЕЛЕКТРИЧНОГО СЕПАРУВАННЯ

4.1. Дослідження процесу відокремлення насінин без зародків

Проведення багатофакторного планового експерименту дало змогу отримати окремі фракції посівного матеріалу, з яких надалі відбирали по 100 насінин для аналізу. Для визначення кількості біологічно неповноцінних насінин, а саме таких, що не містять зародка, застосовували метод рентгенографічного контролю.

Отримані під час експерименту дані узагальнено та наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати багатофакторного експерименту

№	Кількість насінин із зародком, %			
	повторність			Середнє значення
	1	2	3	
1	90	89	88	89
2	86	88	90	88
3	96	95	94	95
4	80	82	84	82
5	86	87	88	87
6	88	90	92	90
7	96	96	96	96
8	89	88	90	89
9	90	91	89	91
10	93	92	92	92

Опрацювання результатів багатофакторного експерименту із застосуванням програмного комплексу Statistica 8.0 дало змогу отримати регресійну модель, що описує залежність вмісту кондиційних насінин у

посівному матеріалі райграсу пасовищного. Побудоване рівняння регресії подано у вигляді залежності від факторів, виражених у кодованих значеннях:

$$K = 89,23 - 2,25 x_1 + 0,5 x_2 + 1 x_3 - 3 x_1 x_2 - 2,5 x_1 x_3 + 0,5 x_2 x_3 - 1,385 x_1^2 - 1,154 x_2^2 + 1,77 x_3^2;$$

(4.1)

- у натуральних значеннях:

$$K = 49,29 + 46,12Q + 14,02V - 114,41E - 1,38Q^2 - 0,615V^2 + 78,62E^2 - 6QV - 16,6QE + 6,66VE. \quad (4.2)$$

Перевірку узгодженості отриманих експериментальних даних здійснювали із використанням критерію Кохрена. Згідно з його вимогами, припущення про відтворюваність результатів вважається обґрунтованим тоді, коли розраховане значення показника (G_p) є меншим за відповідне табличне значення цього критерію.

$$G_p \leq G_T(0,05; n; f_i), \quad (4.3)$$

де $0,05$ – п'яти % рівень значущості;

n – кількість незалежних дисперсій (кількість дослідів);

f_i – значення ступенів вільності кожної з них.

Обчислення критерію Кохрена було проведено в програмному середовищі Microsoft Office Excel. Отримане значення становить ($G_p = 0,32$) (див. дод. Б), що є меншим за табличне значення ($G_t = 0,335$) при кількості дослідів ($n = 15$) та числі ступенів вільності ($f = 3 - 1 = 2$) [6]. Це підтверджує, що результати експерименту є відтворюваними.

Для отриманого рівняння (4.3) було сформовано поверхні відгуку (рис. 4.1–4.3), на підставі яких визначено оптимальні режими процесу сепарування.

Аналіз графічної залежності (рис. 4.1) показує, що максимального значення цільова функція досягає за подачі насіння ($Q = -1$), що у натуральних величинах відповідає ($Q = 2$ кг/год). За таких параметрів найбільш суттєвий вплив швидкості повітряного потоку спостерігається при ($V = 1$) тобто ($V = 5,5$ м/с). За цього режиму вміст кондиційних насінин становить ($K = 94 - 96\%$).

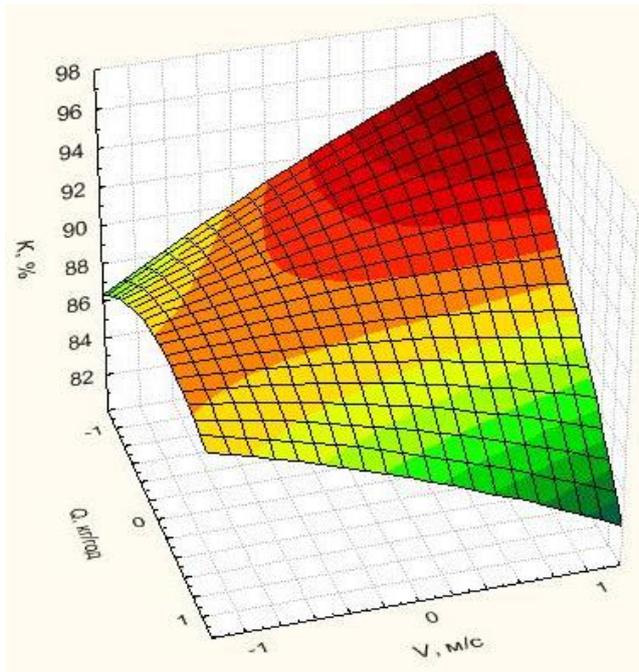


Рисунок 4.1 - Поверхня відгуку

$$K = f(V_n, Q)$$

На рисунку 4.2 подано поверхню відгуку, що відображає взаємозв'язок між напруженістю електростатичного поля (E) та подачею насіння (Q). Максимум функції спостерігається при (Q = -1) та (E = 1), що в натуральних значеннях відповідає (Q = 2 кг/год) та (E = 0,91,кВ/см). За таких параметрів роботи сепаратора частка якісних насінин становить (K = 96 - 98%).

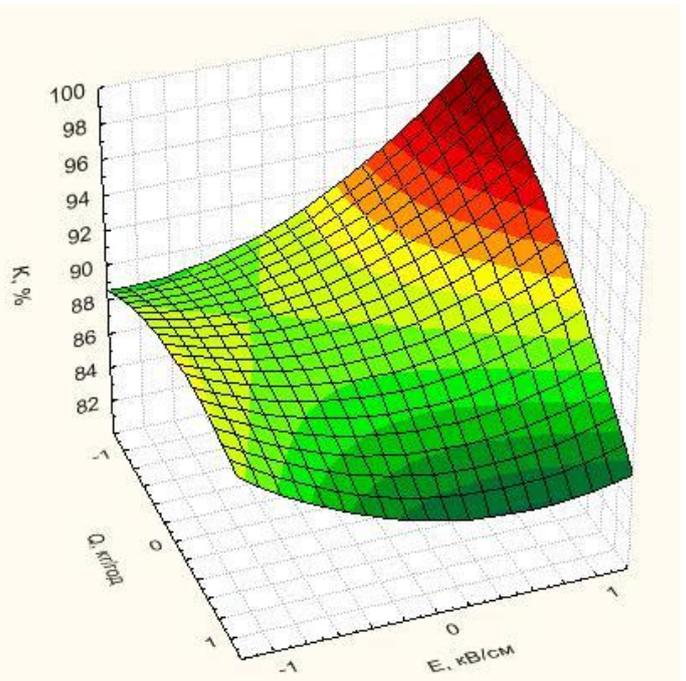


Рисунок 4.2. Поверхня відгуку

$$K = f(E, Q)$$

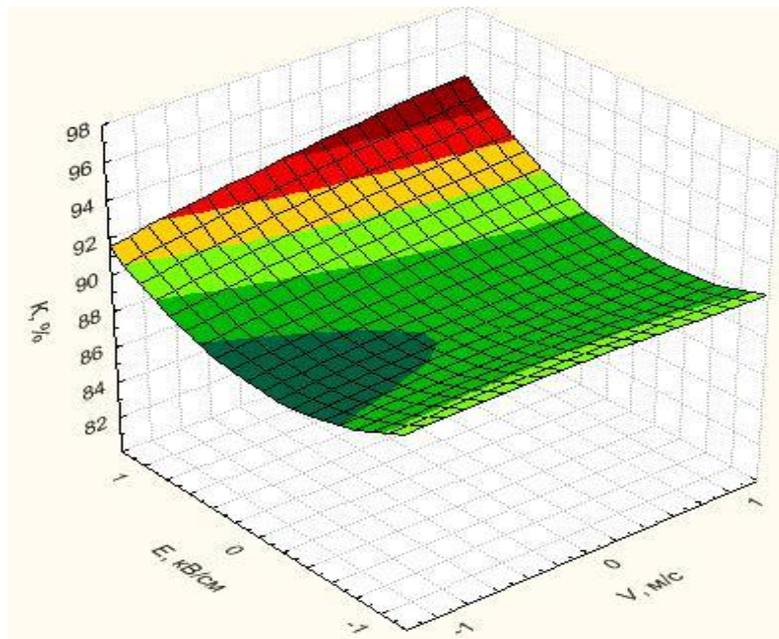


Рисунок 4.3 - Поверхня відгуку $K = f(E, V_n)$,

Аналіз залежності (K = f(E, Vп)) показав, що максимальні значення функція набуває за верхніх рівнів регульованих факторів: (E = 1) та (V = 1), що у натуральних величинах відповідає напруженості електростатичного поля (E =

0,91 кВ/см) та швидкості повітряного потоку ($V_{п} = 5,5$ м/с). За таких режимів експлуатації сепаратора частка кондиційних насінин становила ($K = 92 - 94\%$). Отриманий рівень очищення посівного матеріалу відповідає вимогам ДСТУ 7160:2010 «Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови», згідно з яким для злакових трав вміст насіння основної культури у репродукційному матеріалі повинен становити 90...95 %, а схожість – 70...80 %.

Адекватність отриманої регресійної моделі оцінювалася за критерієм Фішера. Розраховане значення ($F_p = 1,21$) (див. дод. Б) порівнювали з табличним значенням критерію, яке для умов експерименту становить:

$$f_{ad} = 15 - 3 - 1 = 11 ,$$

$$f_y = 15 \cdot (3 - 1) = 30 .$$

За довідковими даними [19] критичне значення критерію становить ($F_t = 2,12$).

Оскільки ($F_p < F_t$), модель вважається адекватною експериментальним даним.

Отримані результати дали змогу визначити оптимальні режими роботи пневмоелектричного сепаратора, які забезпечують максимальну якість сформованого посівного матеріалу. Для досягнення найвищої ефективності очищення насіння райграсу пасовищного доцільно встановлювати швидкість повітряного потоку ($V_{п} = 5,5$ м/с), напруженість електростатичного поля у каналі сепарації ($E = 0,91$ кВ/см) та подачу насінневої суміші ($Q = 2$ кг/год).

4.2. Дослідження сепарування насінин важко відділюваних бур'янів

За методикою наведеною в п. 3.5, проведено багатофакторний експеримент з визначення оптимальних режимів для відділення важко розділюваних домішок бур'янів. В процесі пневмо електросепарування отримано фракції відсепарованого насіння. З них відбирали проби по 1000 насінин, підраховували кількість насінин важковідділюваних бур'янів та визначали їх відсотковий вміст. Результати досліджень подано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Результати багатofакторного експерименту

№ дослі ду	Вміст основної культури в суміші, %			Середнє значення
	повторність			
	1	2	3	
1	98	97	98	97,67
2	97	96	97	96,67
3	96	95	98	96,33
4	95	97	99	97,00
5	97	98	98	97,67
6	98	99	97	98,00
7	96	95	96	95,67
8	94	96	98	96,00
9	99	98	96	97,67
10	98	97	98	97,67

На основі результатів багатofакторного експерименту та подальшої статистичної обробки даних у програмному середовищі Statistica 8.0 було отримано регресійну модель, що описує залежність частки насіння основної культури в посівному матеріалі райграсу пасовищного від досліджуваних технологічних параметрів.

- у кодованих значеннях:

$$K = 97,45 + 0,0412x_1 - 0,0425x_2 - 0,5838x_3 + 0,4175x_1x_2 + 0x_1x_3 + 0,1675x_2x_3 - 0,596x_1^2 + 0,0717x_2^2 - 0,0171x_3^2; \quad (4.4)$$

- у натуральних значеннях:

$$K = 91,54 + 4,21Q + 3,72V - 18,85E + 0,417Q^2 - 0V^2 + 7,444E^2 - 1,192QV + 0,478QE - 0,228VE. \quad (4.5)$$

Перевірку стабільності результатів багаторазових дослідів здійснювали із застосуванням критерію Кохрена. Експеримент вважали відтворюваним у випадку, коли розрахунковий показник G_p не перевищував табличного значення. У проведеній серії досліджень отримано $G_p = 0,173$ (див. дод. Б), що

є меншим за граничне значення $G_t = 0,3346$. Це дає підстави стверджувати про однорідність дисперсій та достовірність експериментальних даних.

Використовуючи регресійну модель (4.5), побудовано графічні поверхні відгуку (рис. 4.4–4.6), які дали можливість визначити оптимальні режими сепарації. Аналіз залежності $K = f(E, Q)$, що демонструє вплив напруженості електростатичного поля та подачі насінневої суміші на частку насіння основної культури у відібраному матеріалі (рис. 4.4), показав, що найбільші значення показника K досягаються за інтервалу подачі $0,4 > Q > -0,4$ та значення $E = -1$. У фізичних одиницях це відповідає діапазону $Q = 2,6-3,4$ кг/год та електричній напруженості близько $0,85$ кВ/см. За таких умов частка кондиційного насіння становила $97-98,2$ %.

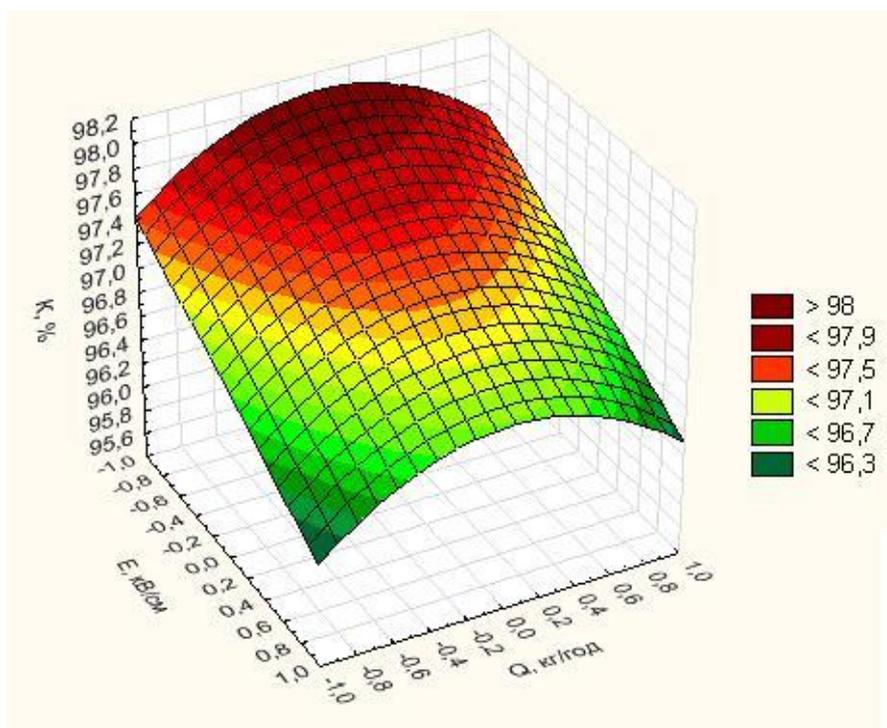


Рисунок 4.4. Поверхня відгуку $K = f(E, Q)$

Аналіз поверхні відгуку $K = f(Q, V)$ (рис. 4.5), що відображає залежність частки насіння основної культури від швидкості повітряного потоку та подачі суміші, показав наявність чітко вираженої області максимальних значень критерія K . Найбільш високі показники чистоти досягаються за умов $0,2 > Q > -0,2$ та швидкості повітря V у межах $0,8...1$ у відносних величинах. Перехід до натуральних параметрів відповідає подачі $2,8-3,2$ кг/год і швидкості потоку

6,2–6,5 м/с. За таких режимів роботи сепаратора вміст насінин основної культури становить до 97,6 %, що свідчить про ефективність обраних технологічних параметрів.

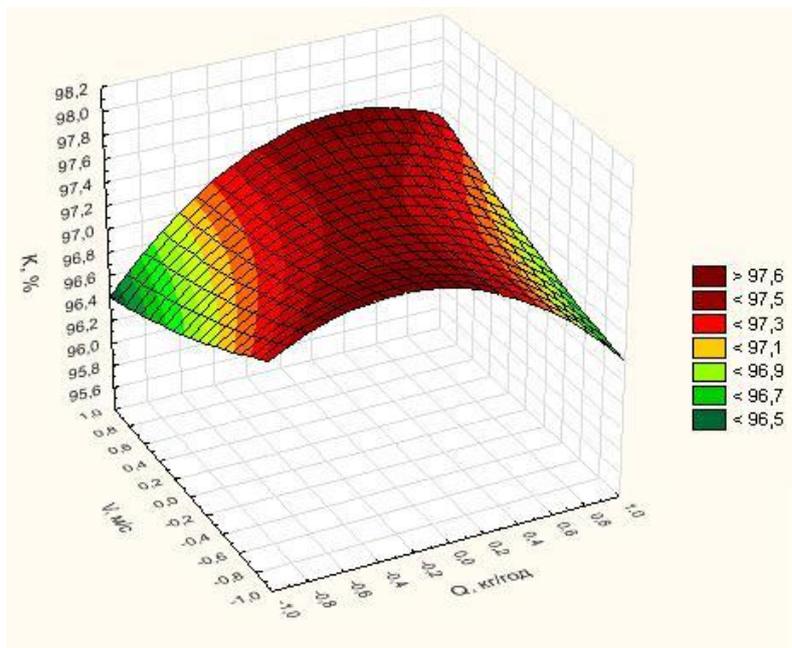


Рисунок 4.5. Поверхня відгуку $K = f(Q, V)$

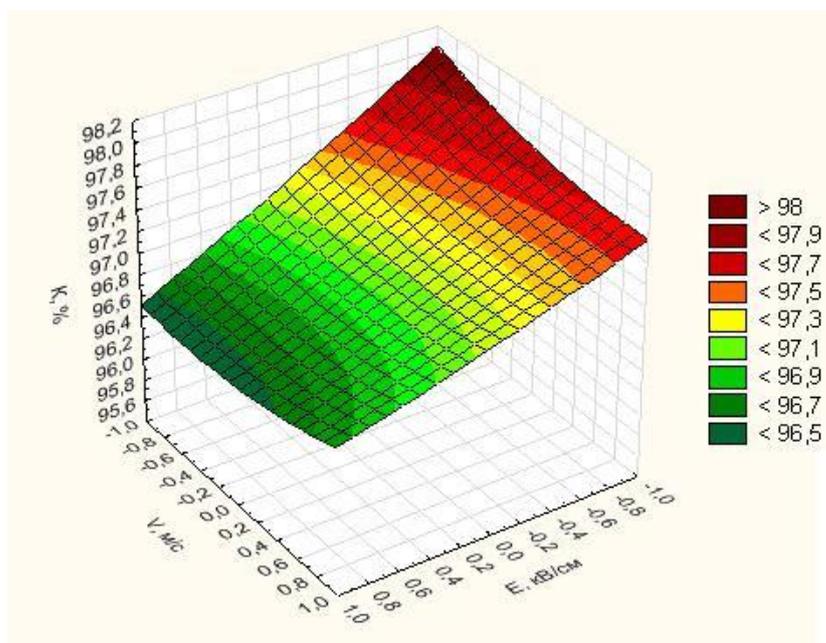


Рисунок 4.6. Поверхня відгуку $K = f(E, V)$

На основі зображення рис. 4.6 можна зробити наступний аналіз, що графік показує залежність частки насіння основної культури (K) від двох параметрів: напруженості електростатичного поля (E) (кВ/см) та швидкості повітряного потоку (V) (м/с).

Значення (К) коливаються від приблизно 96,5 % до понад 98 %. Найвища частка насіння досягається в зоні червоного кольору (>98 %).

Зі збільшенням абсолютного значення (Е) спостерігається підвищення відсотка насіння, тобто електричне поле сприяє більш ефективному відокремленню некондиційного насіння.

Зменшення (V) також підвищує значення (К), тобто для оптимального сепарування необхідно поєднувати певні параметри повітряного потоку з електростатичним полем.

Найвищі значення (К) спостерігаються у верхньому лівому куті графіка (червона зона), де ($E \approx -1$) і ($V \approx -1$), що відповідає оптимальним режимам роботи сепаратора, які забезпечують максимально чистий посівний матеріал (приблизно 98 % насіння основної культури).

Поверхня має плавний нахил, що свідчить про стабільність процесу і наявність оптимальної комбінації параметрів. Зміни одного з параметрів без узгодження з іншим зменшують ефективність сепарування.

Аналіз вище отриманих результатів дозволив визначити оптимальні значення регульованих параметрів роботи пневмо електричного сепаратора, за яких отримується найбільш якісний посівний матеріал. Зокрема для забезпечення максимальної ефективності відділення від райграсу пасовищного важко відділюваних домішок необхідно забезпечити швидкість повітряного потоку $V_n = 5,5 \dots 6,2$ м/с, напруженість електростатичного поля в сепарувальному каналі $E = 0,85 \dots 0,92$ кВ/см, подачу насінневої суміші $Q = 2 \dots 3,2$ кг/год.

4.3. Обґрунтування ефективності пневмо електричного сепарування

Для оцінки ефективності пневмоелектросепарування визначали зміну якості насіння до та після обробки на модернізованому зразку установки «Петкус - К 293». Дослідження проводили на різних видах багаторічних злакових трав, при цьому режими роботи устаткування відповідали параметрам, оптимізованим у ході багатофакторного експерименту.

Вміст насіння з повноцінним зародком (якісного) та щуплого, без зародка (неякісного), у кожній пробі визначали методом рентгеноскопії (рис. 4.7). Отримані дані щодо ефективності пневмоелектросепарування представлені в табл. 4.3.

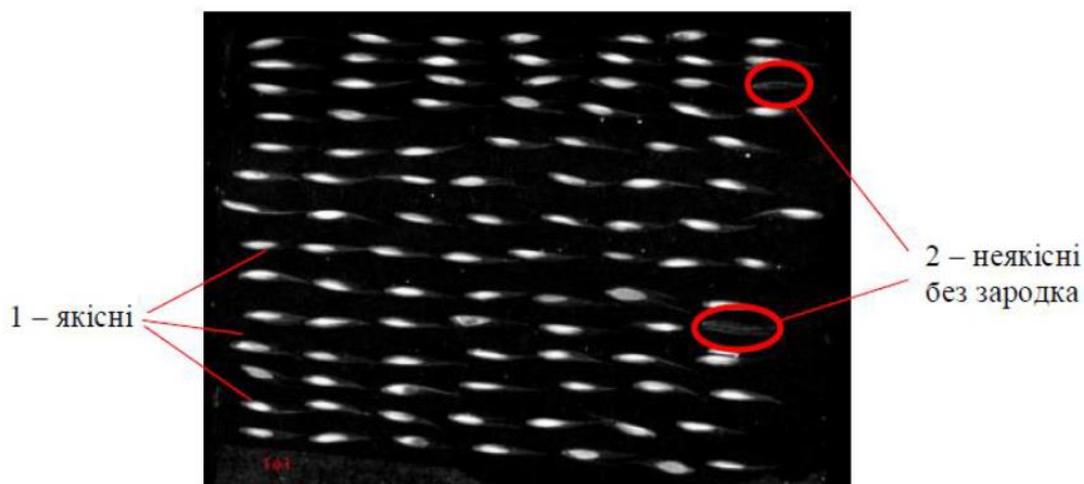


Рисунок 4.7. Рентгеноскопія насіння костриці червоної після пневмоелектросепарування

Це дозволило визначити вміст у кожній із досліджуваних проб якісного (із зародками) та неякісного (без зародка) насіння (табл. 4.3).

Таблиця 4.3. Результати пневмоелектросепарування насіння багаторічних злакових трав

№	Культура	Кількість насінин із зародком, шт./%		До вихідного матеріалу, %
		У вихідному матеріалі	Після пневмоелектросепарування	
1.	Райграс пасовищний	813 / 81±2,3%	992 / 99±3,8%	18
2.	Костриця лучна	631 / 63±2,4%	962 / 96±2,1%	33
3.	Стоколос безостий	782 / 78±3,5%	843 / 84±3,4%	6
4.	Грястиця збірна	489 / 49±3%	978 / 98±1,3%	49
5.	Костриця очеретяна	922 / 92 ±2%	964 / 96±3%	4
6.	Костриця червона	833 / 83±1,5%	953 / 95±1,8%	12
7.	Канарник очеретяний	681 / 68±1%	982 / 98	30

Аналіз результатів, наведених у табл. 4.3, свідчить про обмежену ефективність традиційної післязбиральної обробки насіння багаторічних злакових трав. Значна частина матеріалу залишається біологічно неповноцінною, тобто щуплою та без зародка. Найвищий вміст таких насінин спостерігається у грястиці збірної – 51 % від загальної маси, тоді як у райграсу пасовищного він становить лише 19 %. Частину щуплого насіння можна відокремити за допомогою пневмосепарування, проте після обробки його вміст залишається досить високим – від 15 до 35 %.

Підвищення ефективності досягається шляхом введення у вертикальний канал пневмосепаратора електричного поля високої напруги, яке діє як додатковий робочий орган. Завдяки різній реакції повноцінного та щуплого насіння на електричне поле вдається майже повністю відокремити одне від одного. У результаті вміст неякісного насіння, за винятком стоколосу безостого, знижується до рівня не більше 5 %, що значно покращує якість посівного матеріалу.

Отримані дані підтверджують доцільність використання пневмоелектросепараторів із електричним полем високої напруги при підготовці дрібнонасіньових сумішей багаторічних злакових трав, що сприяє підвищенню схожості насіння та покращенню продуктивності трав'яних угідь.

Висновок до четвертого розділу

Дослідження компонентів насінневої суміші райграсу пасовищного показало, що застосування електростатичного поля в каналі пневмоелектросепаратора значно збільшує розрив між критичними швидкостями витання різних типів насіння. Зокрема, для повноцінного насіння цей показник становить $V_{\text{ркр}} = 3 \dots 3,3$ м/с, для біологічно неповноцінного насіння без зародка – $V_{\text{ркр}} = 1,4 \dots 1,7$ м/с, а для основного забруднювача – пирію повзучого – $V_{\text{ркр}} = 4,1 \dots 4,4$ м/с.

Використання електростатичного поля на модернізованому сепараторі «К-293» підвищує ефективність післязбиральної обробки насіннєвого матеріалу багаторічних злакових трав, дозволяючи більш повно відокремити насіння за якістю.

На підставі багатофакторного математичного планування та експериментальної перевірки визначено оптимальні параметри роботи сепаратора:

- для відокремлення насіння бур'янів – $V_p = 5,5 \dots 6,2$ м/с, $E = 0,85 \dots 0,92$ кВ/см, $Q = 2 \dots 3,2$ кг/год;

- для відділення біологічно неповноцінного насіння без зародка – $V_p = 5,5$ м/с, $E = 0,92$ кВ/см, $Q = 2$ кг/год.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПНЕВМОЕЛЕКТРОСЕПАРУВАННЯ НАСІННЯ

Економічна результативність виробництва насінневого матеріалу сільськогосподарських культур значною мірою залежить від рівня його засміченості бур'янами та від посівних якостей. Таким чином, під час підготовки насіння до висіву доцільно застосовувати обладнання, яке забезпечує не лише видалення сторонніх домішок, а й підвищення посівних та урожайних характеристик насінневого матеріалу.

Оцінювання економічної ефективності функціонування сепаратора здійснюється шляхом порівняння показників якості насіння, обробленого за традиційною технологією. Вихідні дані для таких розрахунків базуються на результатах контролю якості підготовленого насіння, відповідно до вимог ДСТУ 7160:2010 «Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови», схожість насіння багаторічних трав 1–3 репродукції має бути не нижчою 80 %.

Додаткова обробка насінневого матеріалу на сепараторі дає можливість відібрати до 70 % насіння зі схожістю понад 95 %, що відповідає стандартам для елітного насінневого матеріалу багаторічних злакових трав. Крім того, можливо отримати до 40 % насіння зі схожістю понад 90 %, що відповідає вимогам супереліти.

Закупівельна вартість насіння багаторічних злакових трав становить:

- еліта – 28 000...35 000 грн/т;
- супереліта – 40 000...50 000 грн/т;
- 1–3 репродукція – 12 000...17 000 грн/т.

На даний час аграрні виробники, використовуючи наявні засоби первинної обробки, отримують з вирощеного райграсу пасовищного насіння переважно 1–3 репродукції. Застосування додаткової обробки на пневмоелектричному сепараторі дає змогу довести якість насінневого матеріалу

до рівня еліти або супереліти, що супроводжується підвищенням його вартості відповідно на 60 % і 70 %.

Для визначення економічної ефективності використання сепаратора приймається, що для засіву 100 га багаторічних трав необхідно 400...600 кг високоякісного насіння. Щоб отримати відповідну кількість насінневого матеріалу, через сепаратор із продуктивністю $Q = 3 \text{ кг/год}$ потрібно пропустити певний обсяг вихідної сировини K_m .

$$K_m = \frac{H_e \cdot S}{\lambda}, \text{ кг}; \quad (5.1)$$

де H_e – норма висіву, кг/га;

S – площа засіву, га;

λ – вихід насіння, %.

При сепаруванні насіння елітного:

$$K_{me} = \frac{6 \cdot 100}{0,7} = 857,14 \text{ кг}.$$

При сепаруванні насіння суперелітного:

$$K_{me} = \frac{6 \cdot 100}{0,4} = 1500 \text{ кг}.$$

Вартість придбання сепаратора орієнтовно становить 15 000 грн. Робота обладнання організовується в однозмінному режимі із тривалістю зміни 8 годин. Технічне обслуговування та контроль за роботою установки здійснює кваліфікований оператор, який має 5-й тарифний розряд.

Економічна оцінка процесу сепарування насіння багаторічних трав

Річний фонд часу роботи сепаратора визначається за формулою:

$$n_p = \frac{K_m}{Q}, \text{ год}. \quad (5.2)$$

Для насіння категорії еліта:

$$n_{pe} = \frac{857,14}{3} = 285,7 \text{ год}.$$

Для насіння категорії супереліта:

$$n_{pc} = \frac{1500}{3} = 500 \text{ год}.$$

Кількість необхідних змін для проведення сепарування обчислюється за залежністю:

$$n_{зм} = \frac{n_p}{8}. \quad (5.3)$$

Для насіння категорії еліта: $n_{зме} = \frac{285,7}{8} = 35,7$ зм.

У подальших розрахунках приймаємо 36 змін.

Для насіння категорії супереліта: $n_{змс} = \frac{500}{8} = 62,5$ зм.

Приймається 63 зміни.

Розрахунок витрат на сепарування 1 кг насіння райграсу

1. Витрати на оплату праці оператора визначають за формулою:

$$З_n = \frac{n_{зм} \cdot C_T}{K_m}, \text{ грн/кг.} \quad (5.4)$$

де C_T – погодинна тарифна ставка оператора, ($C_T = 5,5$ грн/год).

Для елітного насіння:

$$З_{не} = \frac{36 \cdot 5,5}{857,17} = 0,23 \text{ грн/кг.}$$

Для суперелітного насіння:

$$З_{нс} = \frac{63 \cdot 5,5}{1500} = 0,23 \text{ грн/кг.}$$

2. Амортизаційні відрахування обчислюються за формулою:

$$A_e = \frac{0,12 \cdot B_c}{K_m}, \text{ грн/кг.} \quad (5.5)$$

Для елітного насіння: $A_e = \frac{0,12 \cdot 15000}{857,14}, \text{ грн/кг.}$

Для суперелітного насіння: $A_e = \frac{0,12 \cdot 15000}{1500}, \text{ грн/кг.}$

3. Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт:

$$T_p = \frac{0,09 \cdot B_c}{K_m} \text{ грн/кг.} \quad (5.6)$$

Для елітного насіння: $T_{pe} = \frac{0,09 \cdot 15000}{857,14} = 1,57 \text{ грн/кг.}$

Для суперелітного насіння: $T_{pc} = \frac{0,09 \cdot 15000}{1500} = 0,9 \text{ грн/кг.}$

4. Витрати на електроенергію визначаються за формулою::

$$C_e = \frac{k_{ел} \cdot P}{Q}, \text{ грн/кг.} \quad (5.7)$$

де $k_{ел}$ – вартість 1 кВт/год електроенергії, ($k_{ел} = 4,32$ грн.).

P – споживана потужність сепаратора, ($P = 0,4$ кВт/год).

$$C_e = \frac{4,32 \cdot 0,4}{2} = 0,288 \text{ грн/кг.}$$

Сумарні витрати на сепарування 1 кг насіння:

$$\sum Z = Z_n + A_e + T_p + C_{ел}, \text{ грн/кг.} \quad (5.8)$$

Для елітного насіння:

$$\sum Z_e = 0,23 + 2,1 + 1,57 + 0,288 = 4,2 \text{ грн/кг.}$$

Для суперелітного насіння:

$$\sum Z_c = 0,231 + 1,2 + 0,9 + 0,288 = 2,62 \text{ грн/кг.}$$

Витрати на отримання 1 кг кондиційного насіння:

$$Z_k = \frac{\sum Z}{\lambda}, \text{ грн/кг.} \quad (5.9)$$

Для елітного насіння: $Z_{ке} = \frac{4,2}{0,7} = 6 \text{ грн/кг.}$

Для суперелітного насіння: $Z_{кc} = \frac{2,62}{0,4} = 6,55 \text{ грн/кг.}$

Розрахунок річного економічного ефекту:

$$E_o = K_m \cdot (C_{ні} - C_{н 1-3}) - K_m \cdot Z_n, \text{ грн.} \quad (5.10)$$

Для елітного насіння:

$$E_{oe} = 857,14 \cdot (35 - 17) - 857,14 \cdot 6 = 10285,7 \text{ грн.}$$

Для суперелітного насіння:

$$E_{oc} = 1500 \cdot (50 - 17) - 1500 \cdot 6,55 = 39675 \text{ грн.}$$

Знаходимо ефект, від обробки 1 кг насіння:

$$E_{ке} = \frac{E_o}{K_n}, \text{ грн/кг.} \quad (5.11)$$

Для елітного насіння:

$$E_{ке} = \frac{10285,7}{857,14} = 12 \text{ грн/кг.}$$

Для суперелітного насіння:

$$E_{\text{кзс}} = \frac{39675}{1500} = 26,45 \text{ грн/кг.}$$

Строк окупності сепаратора складає:

$$T_o = \frac{B_c}{E_o}, \text{ роки.} \quad (5.12)$$

Для елітного насіння:

$$T_{oe} = \frac{15000}{10285,7} = 1,45 \text{ роки.}$$

Для суперелітного насіння:

$$T_{oc} = \frac{15000}{39672} = 0,38 \text{ роки.}$$

Висновок до п'ятого розділу

1. Застосування вдосконаленого пневмоелектросепаратора у технологічному процесі підготовки насіння багаторічних злакових кормових трав забезпечує приріст економічного ефекту на рівні 12 грн/кг у разі отримання елітного насіння та 26,45 грн/кг при виробництві суперелітного насінневого матеріалу.

2. Розрахунки свідчать, що річний економічний результат від експлуатації пневмоелектросепаратора становить 10 285,7 грн під час виробництва елітного насіння та 39 675 грн у разі виготовлення суперелітного насіння.

3. Період окупності даного обладнання складає 1,45 року для технології отримання елітного насіння та 0,38 року для виробництва суперелітного насіння, що характеризує встановлену машину як економічно доцільну та ефективну.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У кваліфікаційній роботі проведено теоретичний аналіз і запропоновано новий підхід до вирішення актуальної задачі – визначення конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи пневмоелектросепаратора для очищення дрібнонасіньових сумішей. На основі проведених досліджень можна сформулювати наступні висновки:

1. Встановлено, що якість посівного матеріалу багаторічних злакових трав не відповідає вимогам ДСТУ 7160:2010 через високу частку домішок бур'янів та насіння без зародка. Після проведення повного циклу післязбирального очищення вміст таких домішок становив 17...52 % (5000...11000 шт/кг). Це підтверджує необхідність додаткових заходів очищення та вдосконалення конструкцій сепараторів. Перспективним напрямом є використання пневмоелектросепараторів з оптимізованими параметрами.

2. Проведено теоретичне дослідження руху частинок еліпсоїдної форми у пневмоелектричному каналі та розроблено математичну модель орієнтації насіння. Модель дозволяє визначати координати траєкторій у будь-який момент часу та показала, що ефективність виділення домішок залежить від швидкості повітряного потоку $V_{\text{п}}$ і сили електростатичного поля F_e . Найбільш результативне відокремлення бур'янів спостерігається при $V_{\text{п}} = 5$ м/с та $F_e = 2...3 \cdot 10^{-6}$ Н.

3. Визначено оптимальні геометричні параметри робочої зони пневмоелектричного каналу для ефективного розділення дрібнонасіньових сумішей: ширина каналу $B = 0,06$ м, довжина $L = 0,9$ м, відстань від основи каналу до місця подачі суміші $L_1 = 0,45$ м.

4. Обґрунтовано оптимальні режими роботи пневмоелектросепаратора. Для відокремлення насіння бур'янів рекомендовано: $V_{\text{п}} = 5,5...6,2$ м/с, $E = 0,85...0,92$ кВ/см, $Q = 2...3,2$ кг/год. Для відділення біологічно неповноцінного насіння без зародка ефективними є: $V_{\text{п}} = 5,5$ м/с, $E = 0,92$ кВ/см, $Q = 2$ кг/год.

Використання цих режимів дозволяє знизити вміст неякісного насіння до рівня $\leq 5\%$, що відповідає стандартним вимогам.

5. Розраховано економічну ефективність застосування модернізованого пневмоелектросепаратора у технологічному процесі підготовки насіння багаторічних кормових злакових культур, яка становить 26,45 грн/кг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдуєв М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. / М. М. Абдуєв. Харків: 2007. 22 с.

2. Бакум М. В. Дослідження впливу основних параметрів пневматичного сепаратора на якість очищення насіння редиски / М. В. Бакум, М. М. Кречот // Сільськогосподарські машини : Зб. наук. ст. 2009. Вип. 18. Луцьк : ЛНТУ, 2009. С. 14-19.

3. Берека О.М. Обробка насіння сільськогосподарських культур в сильних електричних полях / О.М. Берека // Збірник наукових праць Уманського аграрного університету. 2008. 4.1. Вил. 69. С. 34-40.

4. Бредихін В.В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневно відцентрового розділення насінневих сумішей за густиною насіння. // автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. / Бредихін В. В. Харків, 2003. 21 с.

5. Васильківський О. М. Підвищення ефективності повітряного очищення зерна / О. М. Васильківський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук-техн. зб. 2005 Вип. 35. Кіровоград : КНТУ. 2005. С. 228-286.

6. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посіб. для студ. ВНЗ / С. С. Яцун, М. Я. Довжик ; за ред Д. Г. Войтюка. Суми : Університетська книга, 2008. 543 с.

7. Дадак В. О. Підвищення ефективності пневмосепарування насіння кормових трав / В. О. Дадак // Технічні системи і технології рослинництва : Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. Вип. 144. С. 225-232.

8. Дадак В. О. Удосконалення пневмо сепаратора дрібно насінневих культур / В. О. Дадак // Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвід. темат. наук. зб. 2013. Вип. 97, том 2., Глеваха: С. 495.

9. Дослідження траєкторії домішок в повітряному потоці / М.М. Петренко, В.А. Онопа, О.А. Кислун, В.В. Онопа. Кіровоград : Кіровоградський національний технічний університет. 2005. С. 124-136.
10. ДСТУ 7160:2010, Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови, Київ : 2010.
11. Дідур В. А. Оптимізація параметрів пневмосепаратора для сепарації рушанки рецини / В. А. Дідур, А. Б. Чебанов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь : 2010. Вип. 10, т. 8. С. 70-77.
12. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин / П. М. Заїка // Очистка і сортування насіння. 2006. Т. 3. Харків : Око. 408 с: 111 іл.
13. Іваненко, П. С., Коваленко, В. М. Машини для сортування та сепарації насіння. Харків : Агроосвіта, 2018. 256 с.
14. Єрмак В.П. Обґрунтування способу сепарування соняшника у повітряних потоках // автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. / В.П. Єрмак Луганськ, 2003. 21 с.
15. Когун А.В., Підлісний В.В. Обґрунтування конструктивних параметрів зерноочисних машин // Перші наукові кроки – 2025: збірник наукових праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський)/ Кам'янець-Подільський: 2025. 40 с.
16. Ковалишин С. Й. Віброелектрофрикційний сепаратор насіння / С. Й. Ковалишин, О. П. Швець // Вчені Львівського національного аграрного університету виробництву : каталог наукових розробок. 2008. Вип. 8. Львів: 2008. С. 134-136.
17. Кушніренко А. Г. Теоретичні дослідження фізико-електричних властивостей насіння сільськогосподарських культур / А. Г. Кушніренко, В. С. Лукач // Науковий вісник НАУ. 2003. Вип. 60. С. 213-218.
18. Малкіна, Віра, Кюрчев, Сергій, Гуцол, Тарас, Верхованцева, Валентина, Кюрчева, Людмила, Мірошніченко, Микола, Білюк, Микола, Підлісний, Віталій, Гюргюлю, Хатіче та Ковальчик, Збігнєв. "Оптимізація параметрів віброконвеєрної системи для інфрачервоного сушіння сої"

Agricultural Engineering, vol.26, no.1, 2022, pp.157-166.

19. Машини, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції / Інструктивно-методичні матеріали до лабораторних занять по розділу Машини та обладнання для переробки продукції рослинництва / для здобувачів першого бакалаврського рівня спеціальності 208 «Агроінженерія» / В. В. Підлісний, О. М. Семенов, Кам'янець-Подільський: 2024. 131 с.

20. Машини та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / [О.В. Дацишин, А. І. Ткачук, Д. С. Чубов та ін.]; за заг. ред. О. В. Дацишина. Київ : Вища освіта. 2005. 159 с.

21. Методичні рекомендації для виконання та оформлення дипломної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності Н7 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, Комарніцький С.П. За ред. В.І. Дуганця. Кам'янець-Подільський : ЗВО «ПДУ», 2025. 52 с.

22. Ніщенко І. О. Дослідження траєкторії руху частинок насінневої суміші кулястої форми по рухомій в електричному полі похилій фрикційній площині І. О. Ніщенко, О. П. Швець // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету: сучасні проблеми землеробської механіки. 2009. № 209. Дніпропетровськ: С. 256-259.

23. Пат. № 50435 У Україна, МПК В30С 7/00. Насіннеочисна гірка /Г. Б. Іноземцев, В. О. Паранюк, С. Й. Ковалишин, О. П. Швець, В.І. Мельничук; заявник та патентовласник Львівський національний аграрний університет / Заявл. 07.12.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11. 4 с.

24. Пат. 85887 Україна, МКП В07В 4/00. Повітряно-відцентровий пристрій для сепарування насіння баштанних культур / В. П. Єрмак, М. В. Брагінець, А. А. Ільченко; заявник та власник Луганський національний аграрний університет. № у 201304592; заявл. 12.04.13; опубл. 10.12.13, Бюл. № 23/2013.

25. Петренко, С. І., Гнатюк, М. П. Експериментальні дослідження пневмоелектросепараторів для насіння. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2021. 184 с.

26. Петренко М., Богатирьов Д., Experimental researches of pneumatic-impulsive machine for seed separation according to density, Кіровоградський НТУ, 2005.

27. Петренко М. М. Дослідження траєкторії домішок в повітряному потоці / М. М. Петренко, В. А. Онопа, О. А. Кислун // Кіровоградський національний технічний університет. 2009. №2. 5 с.

28. Проектування технологічних процесів переробних і харчових виробництв. Лабораторний практикум : навч. посіб. / Ю. Г. Сухенко, А. І. Ткачук, О. А. Дениско ; за ред. проф. Ю. Г. Сухенка. Київ : НУБіП України. 2011. 262 с.

29. Царенко О. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / О. М. Царенко, Д. Г. Войтюк, В. М. Швайко. Київ : Мета, 2003. 448 с.

30. Яковець В.П. Аналітична геометрія: Навчальний посібник / В. П. Яковець, В. Н. Боровик, Л. В. Ваврикович. Суми: ВТД Університетська книга, 2004. 296 с.

31. Царенко О. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : навч. посіб. для студ. ВНЗ / С. С. Яцун, М. Я. Довжик, М. Олійник ; за ред. С. С. Яцуна. Київ : Аграрна освіта, 2000. 243 с.

32. Smith, J., Brown, L. Seed Processing and Cleaning: Principles and Equipment. London: Academic Press, 2017. 412 p.

33. Zhao, X., Wang, H., Li, Y. Modeling the Trajectory of Seed Particles in Pneumatic Separators. Biosystems Engineering, 2020, Vol. 194, pp. 45–58.

34. <https://ua.aeromeh.com.ua/>

35. <https://simo.com.ua/ua/obladnannya/vesovoe-oborudovanie/>

36. <https://ucdap.com/uk/dozuvannya/>

37. <https://vedapro.com.ua/vagovi-dozatori/>

38. <https://ismgrain.com.ua/>

39. <http://www.agrotechnika-ukr.com.ua/>

40. <https://agrovektor.com/>