

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Бредихін Вадим Вікторович**



УДК 631.363.3

**НАУКОВІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВІБРОПНЕВМАТИЧНОГО  
РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ  
НАСІННЯ**

05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

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

Кропивницький – 2023

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

**Алфьоров Олексій Ігорович,**  
Сумський національний аграрний університет,  
професор кафедри проектування технічних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Дідух Володимир Федорович,**  
Луцький національний технічний університет,  
професор кафедри аграрної інженерії  
імені професора Г.А. Хайліса;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Степаненко Сергій Петрович,**  
Інститут механіки та автоматики агропромислового  
виробництва Національної академії наук України,  
завідувач відділу механіко-технологічних проблем  
збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових  
і олійних культур;

доктор технічних наук, професор

**Шейченко Віктор Олександрович,**  
Полтавський державний аграрний університет,  
професор кафедри агроінженерії та автомобільного  
транспорту.

Захист відбудеться «28» березня 2024 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01 у Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Захист транслюватиметься на офіційному YouTube-каналі університету <https://www.youtube.com/@user-jt2hj2hl4n/streams>

З дисертацією, авторефератом та відгуками офіційних опонентів можна ознайомитись за посиланням <https://www.kntu.kr.ua/science/spetsializovana-vchena-rada-d-2307301> та у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01



В.М. Каліч

## **Загальна характеристика роботи**

**Актуальність теми.** Збільшення об'єму виробництва зерна в Україні обмежено вирішенням проблеми покращення якості насіннєвого матеріалу (НМ). У відповідності до технологічного процесу підготовки насіння, попередньо чищений і відкалібрований за розмірними характеристиками матеріал необхідно розділити, виділивши насіння з більшою густиною, оскільки саме таке насіння має підвищену біологічну активність та енергію проростання.

Широке поширення набула технологія «сухого» способу розділення НМ, яка передбачає, що розділення відбувається за рахунок одночасного впливу на шар НМ коливань робочої поверхні (деки), сили повітряного потоку, що проходить крізь НМ і, в залежності від конструктивних особливостей сепаратора, відцентрової сили. Така технологія дозволяє ефективно відділити хворе, травмоване та ушкоджене шкідниками насіння, що значно підвищує кондиційні якості НМ, урожайність культури та економічну ефективність процесу, однак, представляє собою складне фізичне явище.

Комплексною оцінкою досліджень розділення НМ за густиною насіння встановлено відсутність системних науково-технічних рішень, що ефективно поліпшують якісні показники процесу. Виявлено недосконалість наукового обґрунтування процесів розділення НМ за густиною насіння. Механіко-математичні моделі, що описують процес, мають багато спрощень. Рух частинки по робочій поверхні розглядається без урахування взаємодії між суміжними частинками шару НМ, що призводить до похибок у розрахунку конструктивних елементів сепаруючих машин, не коректного визначення оптимальних параметрів процесу розділення НМ, і обмежує подальший розвиток та вдосконалення робочих органів сепаруючих машин і обладнання.

Розробка математичного апарату для ефективного прогнозування траєкторій руху шарів НМ відповідної густини, в залежності від раціональних кінематичних режимів сепаруючої машини і фізико-механічних властивостей матеріалу, що сприяє інтенсифікації процесу розділення з дотриманням вимог ошадливої сепарації, мінімізації травмування насіння є прогресивним шляхом для підвищення якісних показників та продуктивності процесу розділення НМ за густиною насіння.

Таким чином, робота з наукового обґрунтування параметрів процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння є актуальною науково-технічною проблемою, розв'язок якої вирішує актуальну задачу підвищення якості насіння та забезпечує сталу продовольчу безпеку України.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, що складають основу дисертації, проведено відповідно до: НДР, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету України «Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом» (ДР 0122U000810, 2021 – 2023 рр., *здобувач є керівником і виконавцем проекту*); «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологічнобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження, обробки врожаю і одержання високоякісних насінневих матеріалів» (ДР 0116U004624, 2016 – 2017 рр., *здобувач був співвиконавцем проекту*); Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року; комплексної державної цільової програми «Зерно України – 2008 – 2015 рр.»; Державної цільової програми «Розвиток Українського села до 2015 р.»; регіональних програм: «Стратегія сталого розвитку Харківської області на 2021 – 2027 рр.», «Найважливіші проблеми АПК на період до 2023 року»; комплексних тем наукових досліджень: НДР Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка і Державного біотехнологічного університету «Підвищення ефективності, продуктивності та надійності машин для розділення зернових матеріалів» на період 2018 – 2022 рр.» та спрямована на реалізацію Проекту ЄС «Підтримка впровадження сільськогосподарської та продовольчої політики в Україні».

Роботу присвячено вирішенню практично важливої для галузі виробництва та переробки зерна *науково-технічної проблеми* – підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки НМ. Вирішення цієї проблеми ґрунтується на *науковій гіпотезі*, яка полягає в тому, що існують такі техніко-технологічні рішення, реалізація яких уможливить інтенсифікацію процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

**Мета дослідження:** є підвищення ефективності процесів післязбиральної обробки зерна завдяки науковому обґрунтуванню вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння для підготовки високоякісного насіння.

*Для досягнення мети, що поставлена, необхідно вирішити такі задачі дослідження:*

- розробити та вдосконалити технологічні процеси, які інтенсифікують та підвищують ефективність вібропневматичного і вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння;

- розробити механіко-математичні моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах з урахуванням моделей процесів гідродинаміки багатофазних середовищ;
- на основі теоретичних досліджень псевдорозрідженого шару визначити фізико-механічні властивості НМ, на яких базуються режими й параметри вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машин;
- на основі розробленої механіко-математичної моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневматичних сепаруючих машин визначити закономірності та обґрунтувати раціональні кінематичні режими машин, що виконують процес;
- на основі розробленої механіко-математичної моделі процесу розділення НМ за густиною насіння на робочих поверхнях вібропневмовідцентрових сепаруючих машин обґрунтувати раціональні кінематичні режими машин, що виконують процес;
- з урахуванням визначених характеристик НМ розробити імітаційні моделі процесу розділення НМ за густиною насіння, інтенсифікатори хвилеподібного типу, які придатні для використання у вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах;
- експериментально дослідити технологічні процеси вібропневматичного і вібропневмовідцентрового розділення НМ з метою перевірки адекватності розроблених механіко-математичних моделей;
- оцінити технологічну і техніко-економічну ефективність впровадження результатів досліджень інтенсифікації процесу вібропневматичного розділення НМ та модернізації технологічних ліній з підготовки насіння.

**Об'єкт дослідження:** процеси вібропневматичного розділення НМ, їх зв'язок з конструктивними параметрами і кінематичними режимами зернових сепараторів для розділення матеріалу за густиною насіння.

**Предмет дослідження:** наукове обґрунтування інтенсифікації процесів вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

**Методи досліджень.** Методологічною базою роботи є використання дослідницького системного підходу. Теоретичні дослідження базуються на використанні положень теоретичної механіки і гідродинаміки багатофазних середовищ, методів теорії ймовірностей випадкових процесів, математичної статистики, основних положень теорії коливань. Використано методики математичного та імітаційного моделювання процесів розділення НМ за густиною насіння, регресійного та кореляційного аналізів. Чисельне моделювання процесів розділення НМ за густиною насіння проведено з

використанням автоматизованих обчислювальних систем: «FreeMat», «SALOME», «SMath Studio», «GNU/Octave», «GNU/Maxima» та інш.

Експериментальні дослідження та обробку результатів проведено з застосуванням методики натурних випробувань і фізично-імітаційного моделювання, які виконані в лабораторних умовах за допомогою універсального випробувального обладнання на елементній базі пневмосепарувальних столів та вібропневмоцентрифуг, що випускаються серійно, з використанням методів планування експериментів та статистичного аналізу і обробки одержаних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в розв'язанні науково-прикладної проблеми, обґрунтуванні та подальшому розвитку наукових основ вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння.

*Вперше:*

- системно обґрунтовано математичні моделі руху псевдорозрідженого шару НМ як частинок різної густини і повітряного потоку, якими враховано відміни технологічних процесів розділення, зумовлених внутрішньшаровою взаємодією дискретної (частинок) та неперервної (повітря) компонентів шару НМ з робочими поверхнями (плоскою/циліндричною) сепаруючих машин;

- запропоновано нову концепцію моделювання процесів внутрішньшарової взаємодії шарів частинок НМ різної густини, повітряного потоку і робочої поверхні для розрахунку та керування технологічними показниками продуктивності та якості процесу підготовки насіння;

- з урахуванням моделей процесів гідродинаміки багатофазних середовищ розроблено метод та обґрунтовано раціональні режими роботи вібропневматичних та вібропневмовідцентрових сепаруючих машин, якими враховано особливості фізичних процесів переміщення та розділення на фракції шару НМ по плоскій/циліндричній робочій поверхні;

- аналітично обґрунтовано та верифіковано експериментальними дослідженнями комплексний вплив фізико-механічних властивостей НМ, конструкційних параметрів та режимів роботи сепаруючих машин на якісні показники процесу розділення НМ за густиною насіння, який зумовлюється його взаємодією з робочими поверхнями (плоскою/циліндричною) сепаруючих машин.

*Одержали подальший розвиток:*

- науково-методичні засади імітаційного моделювання процесу розділення НМ за густиною насіння з використанням ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості, якими враховано взаємодію дискретної та неперервної компонент псевдорозрідженого шару НМ.

*Удосконалено:*

- технологічний процес переміщення та розділення НМ плоскими/циліндричними повітропроникними і віброуючими робочими поверхнями на основі розроблених нових теоретичних положень моделювання руху псевдорозріджених шарів НМ як багатофазних структур.

Розроблено нову методологію моделювання процесів внутрішньосарової взаємодії шарів частинок НМ різної густини, повітряного потоку і робочої поверхні для розрахунку та керування технологічними показниками продуктивності та якості процесу підготовки насіння.

Наукова новизна одержаних результатів лягла в основу технічних рішень, які захищено патентами України на корисну модель (№127393; 133625; 145733; 150092).

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що на основі комплексних аналітичних і експериментальних досліджень визначено та обґрунтовано раціональні конструктивні параметри і кінематичні режими сепаруючих машин та характеристики робочих поверхонь для розділення НМ за густиною насіння. Розроблено рекомендації з удосконалення конструкцій сепаруючих машин для розділення НМ за густиною насіння плоскими/циліндричними робочими поверхнями. Розроблені аналітичні залежності для обґрунтування нових конструкційно-технологічних схем сепараторів у вигляді науково-технічної документації, яку використано науковими та науково-проектними організаціями для модернізації, удосконалення та створення нових технічних засобів для підготовки насіння. Результати досліджень використано підприємствами, що спеціалізуються на переробці зерна, науково-дослідними, проектними установами для розробки нових і модернізації існуючих машин, обладнання, технологічних ліній з підготовки насіння: на ПрАТ ХМЗ дослідження прийнято для модернізації і удосконалення ПСС-3,5 та розробки ПСС-10 шляхом впровадження інтенсифікаторів хвилеподібного типу («Хорольський механічний завод» м. Хорол); ПрАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків); ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ); ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп); ТОВ «Батьківщина» (Сумська обл., с. Карабутове); ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів); впроваджено у процес підготовки НМ для закладання в Національне сховище на довготривале зберігання «Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва» Національної академії аграрних наук України.

Результати досліджень знайшли відображення у наукових звітах: Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка (м. Харків) і Державного біотехнологічного

університету (м. Харків); звітах з виконання НДР, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету України: «Підвищення продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом» (ДР 0122U000810, 2021 – 2023 рр.) **здобувач є керівником і виконавцем проекту**; та «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насінневих матеріалів» (ДР 0116U004624, 2016 – 2017 рр.) **здобувач був співвиконавцем проекту**.

Основні результати досліджень наведено у монографіях: «Моделювання процесів зернових сепараторів», «Теорія сепарування зерна», «Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння», «Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів», «Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом», які використовуються у навчальному процесі здобувачів вищої освіти Державного біотехнологічного університету для підготовки фахівців на I, II та III РВО за спеціальностями: «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування», «Агроінженерія».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи здобувачем одержані самостійно. У наукових працях, що виконано у співавторстві, особистий внесок наступний: [1, 5, 17, 18, 22] – теоретичне моделювання процесу розділення насінневих матеріалів за густиною насіння; [3] – моделювання параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння; [4] – нестационарні коливання осциляторів при дії тривалих і короткочасних імпульсів; [6, 7, 8, 9] – постановка задачі дослідження, планування випробувань та обробка результатів; [11, 12, 13, 20, 21] – постановка задачі дослідження внутрішньосферних процесів, розробка математичної моделі процесу; [15, 16] – обґрунтування оптимальних параметрів процесу сепарування циліндричними робочими поверхнями; [24] – розробка конструктивної схеми приладу для розділення насінневих матеріалів за густиною насіння; [23, 24, 25, 34] – планування і проведення експериментальних досліджень та обробка результатів; [26, 27, 28] – постановка задачі, розробка методів проведення визначальних випробувань у комбінованих режимах роботи сепаруючої машини з обробкою результатів; [31, 32, 33, 36] – чисельне моделювання та експериментальні дослідження процесів; [38, 39, 40] – розрахунок конструктивних параметрів, експериментальна апробація.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на



конференціях: IX, XIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2013 р., 2017 р.); Multidisciplinary international scientific-practical conference «Digital transformations of modernity» (Coimbra, Portugal, 2022 у.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні» (НАНУ інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, 2020 р.); III International Scientific and Practical Conference «Innovations and prospects in modern science» (Stocholm, 2023 у.); 12-th International Conference «System safety: Human-technical facility-environment» (Ченстоховський політехнічний університет, Польща, 2023 р.). На щорічних конференціях та Міжнародних науково-практичних конференціях: «Технічний прогрес в АПВ» (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; Державний біотехнологічний університет, м. Харків, 2005 – 2023 рр.); «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; Державний біотехнологічний університет, м. Харків, 2005 – 2023 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми надійності та міцності машин і споруд» (Державний біотехнологічний університет, м. Харків, 2023 р.).

**Публікації.** Отримані результати наукових досліджень за обраним напрямом дисертаційної роботи опубліковано після захисту кандидатської дисертації у 40 наукових працях, в тому числі: 7 монографіях (з них – 1 одноосібна; 3 – одноосібні розділи у колективній монографії); 11 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (з них 5 – без співавторів); 6 – у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних **Scopus**; 3 статті у наукових періодичних виданнях інших країн; 9 тез у збірниках доповідей наукових конференцій; отримано 4 патенти.

**Загальна структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота включає вступ, 6 розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Повний обсяг дисертації складає 451 сторінку, у тому числі додатки на 110 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 282 сторінки, містить 102 рисунки, 19 таблиць. Список використаних джерел нараховує 300 найменувань на 32 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність і стан наукової проблеми, її значущість, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення досліджень, сформульовано мету, наукову гіпотезу, завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** «Сучасний стан проблеми, аналіз та перспективи інтенсифікації процесів розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння» наведено результати аналізу сучасного стану технологій, науково-технічних рішень та способів інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння на фракції цільового призначення шляхом виділення біологічно активного матеріалу з підвищеною густиною. Представлено аналіз фізико-механічних властивостей НМ зернових культур, які мають найбільше поширення на території України.

У відповідності до Закону України «Про насіння і садивний матеріал» (ВВРУ. 2003. №3. Ст. 92) та згідно ДСТУ 2240-93 «Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості», НМ має розділення за категоріями: добазове, базове та сертифіковане насіння. Також введено градацію: оригінальне насіння (ОН), елітне насіння (ЕН), репродукційне насіння (РН) та гібридне насіння (ГН). Для добазового насінництва при виробництві високоякісного, біологічно активного та генетично цінного НМ технологічний процес розраховано та побудовано шляхом забезпечення мінімізації травмування насіння.

Технологія розділення НМ у псевдорозрідженому шарі має найвищу ефективність при реалізації процесу підготовки високоякісного насіння. Використання такої технології дозволяє ефективно розділяти НМ на кондиційні фракції цільового призначення і виділення з них важковідокремлюваних домішок (зерно не основної культури, травмоване, хворе, незріле зерно). Сепаруючі машини, що реалізують процес розділення НМ у псевдорозрідженому шарі, мають високу надійність та відрізняються простотою конструкції. Процес має значно нижчу собівартість, ніж розділення матеріалу у рідинних середовищах, оскільки відсутні витрати на додаткове сушіння матеріалу до відповідної вологості після розділення.

Значний внесок у розвиток теоретичних і експериментальних досліджень та впровадження інженерно-технічних рішень з підвищення ефективності післязбиральної обробки НМ було зроблено вітчизняними та іноземними дослідниками і наведено у наукових працях: М. М. Абдуєва, Е. Б. Алієва, М. В. Бакума, Д. В. Богатирьова, В. М. Булгакова, П. М. Василенка, О. М. Васильковського, Е. С. Гончарова, В. П. Горячкіна, О. І. Завгороднього, П. М. Заїки, Б. І. Котова, Д. І. Мазоренка, С. І. Малюти,

Ю. О. Манчинського, В. П. Ольшанського, М. М. Петренка, А. Н. Прилуцького, С. П. Степаненка, Л. М. Тіщенка, Н. Н. Ульріха, О. Ф. Ульянова, С. О. Харченка, В. М. Цециновського, О. В. Цуркана, F. Abderrahim, G. M. Babatunde, Y. Cao, B. Clark, E. Salemi та інших.

Виходячи з проведеного аналізу літературних джерел, встановлено, що дослідження, які було спрямовано на вдосконалення інженерно-технічних рішень з поліпшення ефективності машин і технологій розділення НМ, проводились без урахування внутрішньопарової взаємодії частинок НМ, впливу повітряного потоку та конструктивних параметрів і кінематичних режимів сепаруючих машини.

Визначено актуальність та доцільність проведення досліджень з інтенсифікації процесу розділення НМ у псевдорозрідженому шарі за густиною насіння та проведення механіко-математичного моделювання процесу розділення НМ з урахуванням факторів, які не були враховані у попередніх дослідженнях. Доведено актуальність оптимізації конструктивних параметрів та кінематичних режимів машин та обладнання, що реалізують процес у відповідності до фізико-механічних властивостей НМ, що обробляється.

**У другому розділі** «Механіко-математична модель процесу розділення насінневих матеріалів за густиною насіння плоскими повітропроникними вібраційними поверхнями» представлено розроблену механіко-математичну модель розділення НМ у псевдорозрідженому шарі матеріалу за густиною насіння на робочих поверхнях пневмосепарувальних столів (ПСС), яка враховує взаємодію частинок матеріалу різної густини з повітряним потоком і робочою поверхнею.

Використавши метод гідродинаміки багатофазних середовищ, проведено теоретичне моделювання процесу розділення НМ, при якому НМ моделюється багатофазною структурою, що складається з дискретної компоненти (твердих частинок насіння, які різняться за густиною) і неперервної компоненти (повітря). З точки зору механіки і гідродинаміки ці компоненти розглядаються як суцільні середовища, що взаємодіють між собою.

Дискретна фаза розглядається, як кінцеве число  $N$  дискретних компонент, кожен з яких утворено твердими частинками з густиною  $\bar{\rho}_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . В такому випадку густина частинок  $n$  - компонента дискретної фази дорівнює:

$$\rho_n = \delta_n \bar{\rho}_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

де:  $\delta_n$  – об'ємна доля частинок  $n$  – компонента у псевдорозрідженому НМ.

Ефективну густину дискретної фази в цілому визначено як:

$$\rho_P = \sum_{n=1}^N \rho_n. \quad (2)$$

Густину неперервної фази визначено як:

$$\rho = \bar{\rho} \left( 1 - \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{\bar{\rho}_n} \right) = \bar{\rho} (1 - \sum_{n=1}^N \delta_n), \quad (3)$$

де:  $\bar{\rho}$  – густина неперервної компоненти.

Враховуючи (1) і (3), густина псевдорозрідженого НМ в цілому дорівнює:

$$\rho_c = \rho + \rho_P. \quad (4)$$

Швидкість руху псевдорозрідженого НМ визначено за виразом:

$$\rho_c \vec{V}_c = \sum_{n=1}^N \rho_n \vec{V}_n + \rho \vec{V}, \quad (5)$$

де:  $\vec{V}_n$  – швидкість  $n$  - компоненти дискретної фази, а  $\vec{V}$  – швидкість неперервної фази.

Оскільки  $n$  - компонента дискретної фази розглядається як суцільне середовище, то справедливе рівняння безперервності:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla(\rho_n \vec{V}_n) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Аналогічно для неперервної фази:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0. \quad (7)$$

Рівняння безперервності для псевдорозрідженого НМ в цілому має вид:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla(\rho_c \vec{V}_c) = 0. \quad (8)$$

Обрано Декартову систему координат  $x_1, x_2, x_3$  таким чином, що плоска повітропроникна поверхня лежить у площині  $x_1, x_2$ , вісь  $x_3$  направлено перпендикулярно цій поверхні, яка знаходиться під певними кутами нахилу. Осі  $x_1$  і  $x_2$  нахилено під кутами до горизонтальної площини, відповідно,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ . Повітропроникна поверхня виконує гармонічні коливання вздовж осі  $x_3$ . Під дією повітряного потоку і коливань робочої повітропроникної поверхні, шар НМ знаходиться у псевдорозрідженому стані. Рівняння руху багатофазної системи, яка моделює рух НМ, представлено у вигляді:

$$\rho_n \left( \frac{\partial V_{ni}}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}_n) V_{ni} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P_n \delta_{ij} + \mu_n \left( \frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_n F_{ni} + \rho_n \sum_{m=1}^N F_{nm} (V_{mi} - V_{ni}), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad i = 1, 2, 3. \quad (9)$$

де:  $V_{ni}$  –  $i$ -та компонента швидкості  $\vec{V}_n$   $n$  – компонента дискретної фази;  $\mu_n$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості  $n$  – компонента у НМ;  $F_{ni}$  –  $i$ -та компонента масової сили, що діє на одиницю маси  $n$  – компонента матеріалу;  $P_n$  – парціальний статичний тиск  $n$  – компонента НМ;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Останній член правого частини (9) введено для урахування взаємодії  $n$  – компонента з іншим  $m$  – компонентом НМ. При цьому величина  $F_{nm}$  характеризує цю взаємодію і задовольняє умові:  $\rho_n F_{nm} = \rho_m F_{mn}$ .

Ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості  $\mu_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  – компонента дискретної фази визначаються згідно рівняння:

$$\mu_n \left( \frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i} \right) = \mu_n \frac{\rho_n}{\rho_c} + \frac{\mu_n}{\rho_c} \left[ (V_{ni} - V_j) \frac{\partial \rho_n}{\partial x_j} + (V_{nj} - V_i) \frac{\partial \rho_n}{\partial x_i} \right] + \rho_n (V_{ni} - V_j)(V_{nj} - V_i). \quad (10)$$

Визначено  $i$  -тий компонент сили  $F_{ni}$ , який діє на одиницю маси  $n$  – компонента дискретної фази матеріалу, проведено за залежністю:

$$F_{ni} = \frac{1}{2} \frac{\bar{\rho}}{\rho_n} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (V_i - V_{ni}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_n)(V_i - V_{ni}) \right] + F_n (V_i - V_{ni}) + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{v}}{2\sqrt{\pi}a_n\bar{\rho}_n} \int_0^t \left[ \frac{d}{dt} (V_i - V_{ni})(t - \tau)^{-1/2} \right] d\tau + f_{ni}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

Де:  $v$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази;  $a_n$  – еквівалентний радіус (за об'ємом) частинок  $n$  – компоненти дискретної фази;  $f_{ni}$  –  $i$ -тий компонент зовнішньої сили, що діє на частинки  $n$  – компонента;  $F_n$  – коефіцієнт, який характеризує взаємодію неперервної фази з частинками  $n$  – компонента дискретної фази.

За допомогою механіко-математичної моделі розраховано складові швидкостей  $V_{n1}$  і  $V_1$  дискретних і неперервних компонент  $N + 1$  – фазної системи, що моделює пошаровий рух псевдорозрідженого матеріалу:

$$V_{n1} = A_n^S sh(\gamma_n(x_3 - \bar{h}_n)) + A_n^C ch(\gamma_n(x_3 - \bar{h}_n)) - \frac{g \sin \alpha (\rho_n + \rho)}{2(\mu_n + v)} x_3^2 + \frac{g \sin \alpha (\mu_n \rho - \mu \rho_n)}{\rho_n F_n (\mu_n + v)}, \quad (12)$$

$$V_1 = -\frac{\mu_n}{\mu} \left[ A_n^S sh(\gamma_n(x_3 - \bar{h}_n)) + A_n^C ch(\gamma_n(x_3 - \bar{h}_n)) \right] - \frac{g \sin \alpha (\rho_n + \rho)}{2(\mu_n + v)} x_3^2, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

Де:

$$A_n^S = \frac{f g h_1 \rho_1}{\gamma_n \mu_n} ch(\gamma_1 \bar{h}_1) + \frac{1}{\gamma_n \mu_n} \sum_{p=1}^{n-1} f_p^2, \quad (14)$$

$$A_n^C = \frac{f g h_1 \rho_1}{\mu_1 \gamma_1} sh(\gamma_1 \bar{h}_1) + \sum_{p=1}^{n-1} f_p^1, \quad n = 2, 3, \dots, N,$$

$$A_1^C = 0, \quad A_1^S = 1, \quad (15)$$

$$f_p^1 = -\frac{g \sin \alpha \bar{h}_p^2}{2} \left( \frac{\rho_p + \rho}{\mu_p + \mu} - \frac{\rho_{p+1} + \rho}{\mu_{p+1} + \mu} \right) + g \sin \alpha \left( \frac{\mu_p \rho - \mu \rho_p}{\rho_p F_p (\mu_p + v)} - \frac{\mu_{p+1} \rho - \mu \rho_{p+1}}{\rho_{p+1} F_{p+1} (\mu_{p+1} + v)} \right), \quad (16)$$

$$f_p^2 = -g \sin \alpha \bar{h}_p \left( \frac{\mu_p (\rho_p + \rho)}{\mu_p + v} - \frac{\mu_{p+1} (\rho_{p+1} + \rho)}{\mu_{p+1} + v} \right), \quad \gamma_n = \left( \frac{\rho_n F_n (\mu_n + \mu)}{\mu_n v} \right)^{1/2}, \quad (17)$$

де:  $h_n$  – середня товщина шару  $n$ -ого шару,  $\overline{h_n} = \sum_{p=1}^n h_p$ ;  $\alpha$  – кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Розроблені моделі (12) – (17) дозволяють визначити розподіл швидкостей за товщиною псевдорозрідженого матеріалу в режимі руху, що встановився. Як видно з (14), швидкості частинок  $n$ -ої дискретної фази складаються з двох доданків. Один доданок квадратично залежить від координати  $x_3$ . Другий доданок має більш складну залежність від координати  $x_3$ , а саме, є суперпозицією експоненційно зростаючих та спадних функцій  $e^{\pm \gamma_n x_3}$ . Вплив цих двох доданків визначає основний характер зміни швидкостей дискретних фаз за товщиною псевдорозрідженого шару частинок НМ. Так, при куті нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини близькому до нуля, доданками з квадратичною залежністю від координати  $x_3$  можна знехтувати. При коефіцієнті тертя  $f$ , що обумовлений характеристиками робочої поверхні та наближається до нуля, домінуючим буде доданок з квадратичною залежністю від координати  $x_3$ . При  $f \rightarrow 0$  та  $\alpha \rightarrow 0$  швидкості частинок дискретних фаз стають настільки малими, що ними можна знехтувати. Доданок з квадратичною залежністю від координати  $x_3$  залежить тільки від фізичних параметрів частинок відповідної дискретної та неперервної фаз. Другий доданок, на відміну від вказаних фізичних параметрів, залежить від фізичних параметрів, розташованих нижче дискретних фаз.

Розроблений математичний апарат дозволяє отримати траєкторії руху шарів НМ різної густини в залежності від зміни кінематичних режимів ПСС.

Очевидно, у відповідності до рушійних сил, що лежать в основі способу розділення НМ на робочій поверхні ПСС, найменшого відхилення зазнає «легка» фракція, а найбільшого – «важка». Найявне також і проміжне значення густини насіння – позначено його як «середня» фракція. Біологічне активне насіння, яке відокремлюється даним способом, являє собою «важку» фракцію.

У дослідженні зроблено припущення, що попадання частинок з визначеною густиною у відповідну координату підкорюється закону нормального розподілу. При цьому координати фракцій з різною густиною являють собою математичне очікування у нормальному розподілі:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (18)$$

де:  $f_i(x)$  – функція розподілення імовірностей координати  $x$ ;  $\sigma^2$  – дисперсія координати;  $x_i$  – координата  $i$ -ої фракції матеріалу, яка має

відповідну густину, на виході з пневмосортувального столу (математичне очікування).

Очевидно слід вважати, що існує імовірність попадання до бункера для «важкої» фракції частинок, густина яких відповідає «легкій» та «середній» фракціям. Те ж стосується частинок матеріалу, густина якої відповідає «важкій» фракції – існує імовірність їх попадання в бункери для «легкої» та «середньої» фракцій.

Знайти кількість частинок «легкої», «середньої» та «важкої» фракцій НМ, які потрапляють у бункери, призначені, відповідно, для «легкої» ( $i = 1$ ), «середньої» ( $i = 2$ ) та «важкої» ( $i = 3$ ) фракції, можна наступним чином:

$$S_1 = N_1 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{-\infty}^{0.33x_{max}} f_3(x)dx, \quad (19)$$

$$S_2 = N_1 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{0.33x_{max}}^{0.66x_{max}} f_3(x)dx, \quad (20)$$

$$S_3 = N_1 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_1(x)dx + N_2 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_2(x)dx + N_3 \cdot \int_{0.66x_{max}}^{+\infty} f_3(x)dx, \quad (21)$$

де:  $S_1$ ,  $S_2$  та  $S_3$  – кількість частинок у бункерах, призначених, відповідно, для «легкої» ( $i = 1$ ), «середньої» ( $i = 2$ ) та «важкої» ( $i = 3$ ) фракцій;  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  та  $f_3(x)$  – функції розподілення імовірностей для частинок «легкої» ( $i = 1$ ), «середньої» ( $i = 2$ ) та «важкої» ( $i = 3$ ) фракцій;  $N_1$ ,  $N_2$  та  $N_3$  – кількість частинок «легкої» ( $i = 1$ ), «середньої» ( $i = 2$ ) та «важкої» ( $i = 3$ ) фракцій НМ, що надходить на обробку.

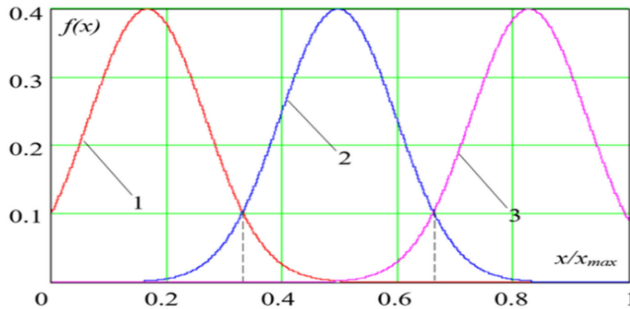


Рисунок 1 – Функції розподілення імовірності координат «легкої», «середньої» та «важкої» фракцій НМ за визначеної амплітуди ( $A=4$  мм) та частоти ( $\nu=800$  кол./хв) коливань ПСС: 1 – «легка» фракція; 2 – «середня» фракція; 3 – «важка» фракція

Приклад наведений для випадку постійної амплітуди ( $A = 4$  мм) та частоти ( $\nu = 800$  кол./хв) коливань ПСС. Координату  $x$  на рис. 1 пронормовано на максимальне значення ширини сторони деки

пневмосортувального стола  $x_{\max}$ , з якої розділений НМ надходить до збиральних бункерів. Координата «0» відповідає частині деки, з якої сходять «легка» фракція, а координата  $x_{\max}$  – частині деки, з якої сходять «важка» фракція. При цьому вважалось, що частина матеріалу, яка попадає у проміжок від 0 до  $0,33 \cdot x_{\max}$ , потрапляє до бункера для «легкої» фракції. Матеріал, який попадає у проміжок від  $0,33 \cdot x_{\max}$  до  $0,66 \cdot x_{\max}$ , надходить до бункера для «середньої» фракції, а та, яка попадає у проміжок від  $0,66 \cdot x_{\max}$  до  $x_{\max}$ , надходить до бункера для «важкої» фракції.

Враховуючи те, що відсутнє розподілення частинок за густиною у вихідному НМ у межах між «легкою», «середньою» та «важкою» фракціями, зроблено припущення, що  $N_1=N_2=N_3=N$ . Отримано:

$$\begin{aligned} Purity &= \frac{N \cdot \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_3(x)dx}{N \cdot \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_1(x)dx + N \cdot \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)dx + N \cdot \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_3(x)dx} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_3(x)dx}{\int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_1(x)dx + \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_2(x)dx + \int_{0,66x_{\max}}^{+\infty} f_3(x)dx} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (22)$$

Обчислення чистоти «важкої» фракції проводили за почергової зміни обраних параметрів процесу розділення. Отримані при цьому значення чистоти «важкої» фракції апроксимувались поліноміальними функціями виду:

$$F(Purity) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot Purity^j, \quad (23)$$

де:  $a_j$  – апроксимаційні коефіцієнти;  $n$  – ступінь полінома.

Для наочності результати моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС наведено у вигляді поверхонь. При цьому зроблено спрощення за рахунок застосування квадратичної моделі, де аргументами є амплітуда ( $A$ ) та частота коливань пневмосортувального стола ( $v$ ) (рис. 2. – 3). Рівняння квадратичної регресії при цьому мали вигляд:

$$Purity(A, v) = 84.889 + 7.5 \cdot A - 0.333 \cdot v - 14.833 \cdot A^2 - 6.333 \cdot v^2 + 1.25 \cdot A \cdot v, \quad (24)$$

$$Purity(A, v) = 86.444 + 6.667 \cdot A + 0.5 \cdot v - 10.667 \cdot A^2 - 6.167 \cdot v^2 - 1.25 \cdot A \cdot v, \quad (25)$$

$$Purity(A, v) = 80.111 + 2.833 \cdot A - 0 \cdot v - 6.167 \cdot A^2 - 3.667 \cdot v^2 + 0.75 \cdot A \cdot v, \quad (26)$$

$$Purity(A, v) = 85.889 + 7.5 \cdot A - 3.333 \cdot v - 16.833 \cdot A^2 - 3.333 \cdot v^2 + 0.5 \cdot A \cdot v. \quad (27)$$

Підставивши узагальнені значення відповідних параметрів, було одержано залежності: зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від частоти ( $v$ ) та амплітуди ( $A$ ) коливань ПСС (рис. 2) та в залежності від величини поздовжнього ( $\alpha$ ) та поперечного ( $\beta$ ) кутів нахилу деки ПСС (рис. 3) у відповідності до матеріалу, що обробляється.



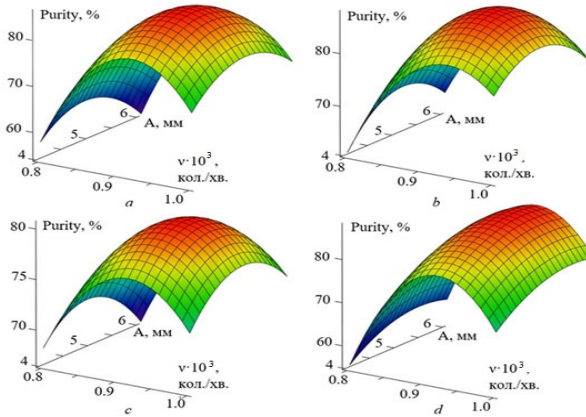


Рисунок 2 – Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від частоти ( $\nu$ ) та амплітуди ( $A$ ) коливань деки ПСС відповідно до матеріалу, що обробляється: а – пшениця; б – кукурудза; с – соняшник; д – соя

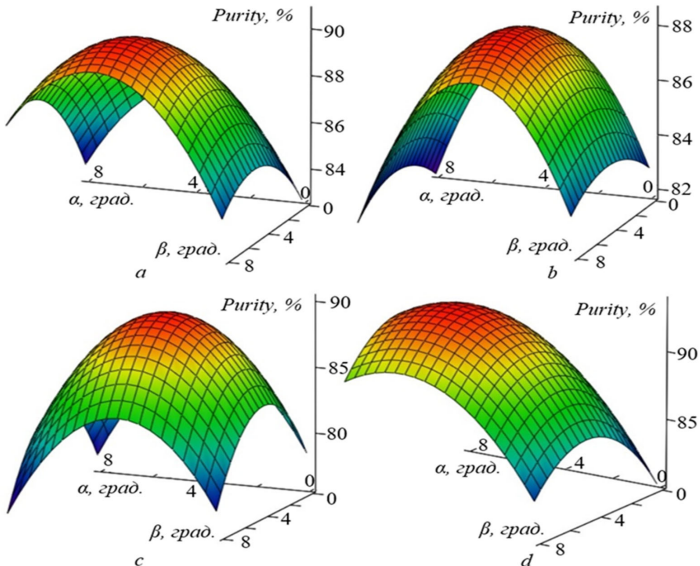


Рисунок 3 – Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від величини поздовжнього ( $\alpha$ ) та поперечного ( $\beta$ ) кутів нахилу деки ПСС для НМ: а – пшениці; б – кукурудзи; с – соняшнику; д – сої

Частота та амплітуда коливань деки ПСС при цьому обирались, виходячи з матеріалу: пшениця – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; кукурудза – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; соняшник – частота 940 кол./хв, амплітуда 5 мм; соя – частота 940 кол./хв, амплітуда 6 мм. Швидкість повітряного потоку дорівнювала 1 м/с.

Процес пошарового руху псевдорозрідженого шару частинок НМ має достатньо складний фізичний характер, що необхідно враховувати у процесі моделювання вібропневматичного розділення частинок за густиною насіння та провести експериментальну і виробничу перевірку отриманих теоретичних результатів.

**У третьому розділі** «Механіко-математична модель процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння» побудовано механіко-математичні моделі пошарового руху НМ по повітропроникній робочій поверхні, що обертається навколо вертикальної осі та виконує, по відношенню до цієї осі, гармонічні коливання. Розроблені механіко-математичні моделі базуються на системному підході використання гідродинаміки багатофазних середовищ, що дозволило провести моделювання НМ у формі багатофазної структури, яка піддається впливу повітряного потоку, коливанням робочої поверхні та дії поля відцентрової сили і складається з кінцевої кількості шарів дискретної і неперервної компонент. Ці дискретні та неперервна компоненти розглядаються як суцільні середовища, що взаємодіють між собою, та враховувались при теоретичному моделюванні відповідними умовами взаємодії на границі розділу середовищ.

Розглядалась циліндрична робоча поверхня радіусом  $R$ , що виконує рівномірний обертальний рух навколо вертикальної осі  $z$  з кутовою швидкістю  $\omega_1$ , коливальний гармонічний рух вздовж цієї ж осі з круговою частотою  $\omega_2$  та амплітудою  $A$ . Для опису руху НМ введено дві циліндричні системи координат з віссю  $z$ , що співпадають з віссю симетрії циліндричної поверхні. В результаті одночасної дії повітряного потоку, поля відцентрових сил та гравітаційного поля утворюється  $N$  - кільцевих шарів часток, які відрізняються за густиною, аерогравітаційними та гідродинамічними властивостями. Рух кожного шару часток розглядається як рух суцільного середовища. Введено приведену густину частинок  $n$ -го шару  $\rho_n$  і середню густину частинок  $\bar{\rho}_n$ , що утворюють  $n$ -й шар. Середню товщину  $n$ -го кільцевого шару частинок позначено через  $h_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ . Значення індексу  $n = 1$  відповідає кільцевому шару, що знаходиться на циліндричній поверхні, а  $n = N$  – кільцевому шару, одна з границь якого межує з повітрям.

Дослідження динаміки такої  $N$ -фазної структури проведено відносно циліндричної системи координат, яка жорстко пов'язана з рухомою циліндричною поверхнею.

За умови, що  $\vec{\omega}_1$  – вектор кутової швидкості циліндричної поверхні, яка направлена вздовж осі  $z$  циліндричної системи координат  $r, \phi, z$  з ортами  $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ , абсолютне прискорення  $\vec{a}_n$  і швидкість  $\vec{V}_n$  елемента  $n$ -го кільцевого шару ( $n$ -ої дискретної компоненти) можна визначити через відносне прискорення  $\vec{b}_n$  і швидкість  $\vec{u}_n$  за допомогою:

$$\vec{a}_n = \vec{b}_0 + 2\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) + \vec{b}_n, \quad (28)$$

$$\vec{V}_n = \vec{u}_0 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r} + \vec{u}_n, \quad (29)$$

де:  $\vec{b}_0 = -A\omega_2^2 \sin \omega_2 t \vec{e}_z$ ,  $\vec{u}_0 = A\omega_2 \cos \omega_2 t \vec{e}_z$  – відповідно, прискорення і швидкість повздовжніх (вздовж осі  $z$ ) коливань циліндричної поверхні;  $\vec{r} = r\vec{e}_r$  – вектор, що відповідає радіусу елемента, який розглядається,  $n$ -го циліндричного шару часток.

З урахуванням вищезначеного, рівняння, яке описує відносний рух  $n$ -го кільцевого шару частинок має вигляд:

$$\rho_n \left( \frac{\partial \vec{u}_n}{\partial t} + (\vec{u}_n, \nabla) \vec{u}_n \right) = -\nabla P_n + \mu_n \Delta (\vec{u}_n + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}) + \rho_n \vec{F}_n + \vec{G}_n, \quad (30)$$

$$\operatorname{div} \vec{u}_n = 0, \quad (31)$$

$$n = 1, 2, \dots, N.$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_n = & \frac{\bar{\rho}}{2\rho_n} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V} - \vec{u}_n) + (\vec{V} - \vec{u}_n, \nabla) (\vec{V} - \vec{u}_n) + 2\vec{\omega}_1 \times (\vec{V} - \vec{u}_n) + \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) \right] + \\ & F_n (\vec{V} - \vec{u}_n) + \frac{9\rho\sqrt{v}}{2\sqrt{\pi}a_n\rho_n} \int_0^t \left[ \frac{\partial (\vec{V} - \vec{u}_n)}{\partial t} + (\vec{V} - \vec{u}_n, \nabla) (\vec{V} - \vec{u}_n) + 2\vec{\omega}_1 \times (\vec{V} - \vec{u}_n) + \vec{\omega}_1 \times \right. \\ & \left. (\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) \right] (t-r)^{-1/2} dr, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\vec{G}_n = -\rho_n g \vec{e}_z - \vec{b}_0 \rho_n - 2\rho_n (\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n) - \vec{\omega}_1 \times (\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) \rho_n, \quad (33)$$

де:  $\vec{V}$  – відносна швидкість безперервної фази;

$v$  – ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості безперервної фази;

$a_n$  – еквівалентний середній радіус за об'ємом частинок  $n$ -го шару;

$F_n$  – коефіцієнт, що характеризує взаємодію безперервної фази з частинками  $n$ -го шару:

$$F_n = \frac{\bar{\rho}}{2\rho_n(1-\delta_n)^2 a_n} \left( 1,75V_{0n} + \frac{75v\delta_n}{a_n} \right), \quad (34)$$

де:  $V_{0n}$  – середня швидкість безперервної фази на границі  $n$ -го шару ( $r = R - \sum_{p=1}^n h_p$ ).

Окрім (30), (31), які описують відносний рух  $n$ -ої дискретної фази ( $n$ -ий кільцевий шар частинок), побудовано рівняння відносного руху

безперервної фази. При обмеженні лінійним наближенням, ці рівняння для  $n$ -го кільцевого шару мають вигляд:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(1 - \delta) \nabla P + \mu \Delta (\vec{V} + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}) - \rho_n \vec{F}_n + \vec{G}_n, \quad (35)$$

$$\operatorname{div} \vec{u}_n = 0, \quad (36)$$

де:  $\mu$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості безперервної фази;

$P$  – надлишковий тиск;

$$\delta = \sum_{n=1}^N \delta_n;$$

$$G = -\rho g \vec{e}_z - \vec{b}_0 \rho - 2\rho (\vec{\omega}_1 \times \vec{V}) - \vec{\omega}_1 \times (\omega_1 \times \vec{r}) \rho. \quad (37)$$

Особливістю цих рівнянь є введення масової сили додаткових складових у (30). Дійсно, перехід до відносного руху призводить до доповнення реальної масової сили (сили тяжіння) силою інерції:  $\vec{b}_0 \rho_n$  – сила інерції поступового руху циліндричної поверхні;  $2(\vec{\omega}_1 \times \vec{u}_n) \rho_n$  – сила Коріоліса;  $\vec{\omega}_1 \times (\omega_1 \times \vec{r}) \rho_n$  – відцентрова сила.

У рівняннях (30) і (35) складова  $\Delta(\vec{\omega}_1 \times \vec{r}) = 0$ , оскільки функція  $\vec{\omega}_1 \times \vec{r}$  є гармонічною. Окрім рівнянь (30), (31) і (35), (36), поля швидкостей  $\vec{u}_n$ ,  $\vec{V}$  і тиск  $P_n$  та  $P$  повинні задовольняти початковим і граничним умовам – умови сполучення на межі розділення дискретних фаз і умовам на поверхні повітропроникної циліндричної робочої поверхні. Не обмежуючи загальності, зроблено припущення, що для моменту часу  $t \rightarrow 0$ , поле швидкостей  $\vec{u}_n$  і  $\vec{V}$  та надлишковий тиск  $P_n$  і  $P$  наближається до нуля.

$$P|_{t \rightarrow 0} = P_n|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad \vec{u}_n|_{t \rightarrow 0} = \vec{V}|_{t \rightarrow 0} = 0. \quad (38)$$

Зміна  $\vec{u}_n$ ,  $\vec{V}$ ,  $P_n$ ,  $P$  для моментів часу  $t \rightarrow 0$  моделюються рівняннями (30) та (35).

Розроблену механіко-математичну модель (у загальному вигляді), яка описує стаціонарний асиметричний режим руху частинок НМ можна представити у вигляді:

$$u_z^n = A_{1n} \left( r^2 - 2\bar{h}_n^2 \ell n \frac{r}{\bar{h}_n} \right) - A_{2n} + A_{3n} + \mu_n (A_{4n} I_0(\lambda_n r) + A_{5n} K_0(\lambda_n r)), \quad (39)$$

$$V_z = A_{1n} \left( r^2 - 2\bar{h}_n^2 \ell n \frac{r}{\bar{h}_n} \right) + \frac{\mu_n}{\mu} A_{2n} + A_{3n} - \mu (A_{4n} I_0(\lambda_n r) + A_{5n} K_0(\lambda_n r)), \quad (40)$$

де:

$$A_{1n} = \frac{\Delta P_1 + (1 - \delta) \Delta P_2 + g(\rho + \rho_n)}{4(\mu + \mu_n)},$$

$$A_{2n} = \frac{\Delta P_1 - \frac{\mu_n}{\mu}(1-\delta)\Delta P_2 + g\rho_n\left(1 - \frac{v_n}{v}\right)}{F_n\rho_n\left(1 + \frac{\mu_n}{\mu}\right)^2},$$

$$A_{3n} = \frac{(\bar{h}_1^2 - R^2)(2A_{11} - 0.5f\omega_1^2 R v_1^{-1})}{R\Delta_1} \left( \frac{\mu\Delta_2}{\mu_1\sqrt{\frac{F_1}{v_1}}\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu}\right)} + \frac{\mu_1 - \mu}{F_1\rho_1\bar{h}_1\left(1 + \frac{\mu_n}{\mu}\right)\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu}\right)} \right) +$$

$$+ A_{21}\frac{\mu_n\mu_1 - \mu^2}{\mu(\mu + \mu_n)} + A_{2n}\left(1 - \frac{\mu_n}{\mu}\right) + \sum_{p=1}^{n-1} \bar{h}_p^2 \left[ A_{1p} - A_{1p+1} \left(1 - 2\ell n \frac{\bar{h}_p}{\bar{h}_{p+1}}\right) \right],$$

$$A_{4n} = -\lambda_n \bar{h}_n K_1(\lambda_n \bar{h}_n) B_n,$$

$$A_{5n} = -\lambda_n \bar{h}_n I_1(\lambda_n \bar{h}_n) B_n,$$

$$B_n = \frac{\mu(\bar{h}_1^2 - R^2)(2A_{11} - 0.5f\omega_1^2 R v_1^{-1})}{F_1\rho_1 R \bar{h}_1(\mu + \mu_n)\Delta_1} +$$

$$+ (\mu_n + \mu)^{-1} \left[ A_{2n} \left(1 + \frac{\mu_n}{\mu_1}\right) - A_{21} \left(1 + \frac{\mu_1}{\mu}\right) \right],$$

$$\Delta_1 = K_1(\lambda_1 \bar{h}_1) I_1(\lambda_1 R) - K_1(\lambda_1 R) I_1(\lambda_1 \bar{h}_1),$$

$$\Delta_2 = K_1(\lambda_1 \bar{h}_1) I_0(\lambda_1 R) - K_0(\lambda_1 R) I_1(\lambda_1 \bar{h}_1).$$

Азимутальні компоненти  $n$ -ої дискретної та безперервної фаз дорівнюють:

$$u_\phi^n = Q_n r + \mu(Q_{n1} I_1(\lambda_n r) + Q_{n2} K_1(\lambda_n r)), \quad (41)$$

$$V_\phi = Q_n r - \mu_n(Q_{n1} I_1(\lambda_n r) + Q_{n2} K_1(\lambda_n r)), \quad (42)$$

де:

$$Q_{n1} = \frac{0.5\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_n}{v_n}}\left(1 + \frac{\mu_n}{\mu}\right)(R^2 - \bar{h}_1^2)f_1\omega_1^2}{F_1(\mu + \mu_n)\Delta_3} K_2(\lambda_n \bar{h}_n),$$

$$Q_{n2} = \frac{0.5\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_n}{v_n}}\left(1 + \frac{\mu_n}{\mu}\right)(R^2 - \bar{h}_1^2)f_1\omega_1^2}{F_1(\mu + \mu_n)\Delta_3} I_2(\lambda_n \bar{h}_n),$$

$$Q_n = \frac{0.5f_1\rho_1(R^2 - \bar{h}_1^2)\omega_1^2}{\Delta_3\mu_1\bar{h}_n\sqrt{\frac{F_1}{v_1}}\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu}\right)} \left( \frac{\mu(\mu + \mu_1)}{\mu_1(\mu + \mu_n)\bar{h}_1\sqrt{\frac{F_1}{v_1}}\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu}\right)} - \frac{\bar{h}_1\Delta_4}{R} \right),$$

$$\Delta_3 = I_2(\lambda_1 \bar{h}_1) K_2(\lambda_1 R) - I_2(\lambda_1 R) K_2(\lambda_1 \bar{h}_1),$$

$$\Delta_4 = I_1(\lambda_1 R) K_2(\lambda_1 \bar{h}_1) + K_1(\lambda_1 R) I_1(\lambda_1 \bar{h}_1),$$

радіальні компоненти  $n$ -ої дискретної та безперервної фаз:

$$u_r^n = \frac{\rho_N \bar{h}_N^4 \omega_1^2}{4\mu_N r} \left( \frac{\bar{p}}{2\rho_N} - 1 \right), \quad (43)$$

$$V_r = \frac{V_0 R}{r}. \quad (44)$$

Як видно з (39) – (44), для визначення компоненти швидкості шару частинок НМ необхідно обрати наступні геометричні і механічні параметри циліндричної поверхні обертання та фізико-механічні параметри частинок НМ:  $\mu_n$  и  $\mu$  – ефективні коефіцієнти динамічної в'язкості  $n$  - го шару частинок та безперервної фази;  $\rho_n$  і  $\rho$  – густина  $n$  - го шару частинок та безперервної фази;  $\nu_n$  та  $\nu$  – ефективні коефіцієнти кінематичної в'язкості  $n$  - го шару частинок та безперервної фази;  $F_n$  – коефіцієнт, що характеризує взаємодію безперервної фази з частинками НМ  $n$  - го шару.

У відповідності до зробленого припущення, попадання частинок з визначеною густиною у відповідну координату підкорюється закону нормального розподілу. При цьому координати фракцій з різною густиною являють собою математичне очікування у нормальному розподілі згідно (18).

Виходячи з цього, зроблено спрощення задачі: розрахунок функцій розподілення проводився для усереднених значень густини «легкої» та «важкої» фракцій НМ; дисперсія координати при цьому вважалась рівною одиниці. Слід відмітити, що розділення матеріалу у даній конструкції вібропневмовідцентрового сепаратора проводиться на дві фракції, що робить допустимим це спрощення.

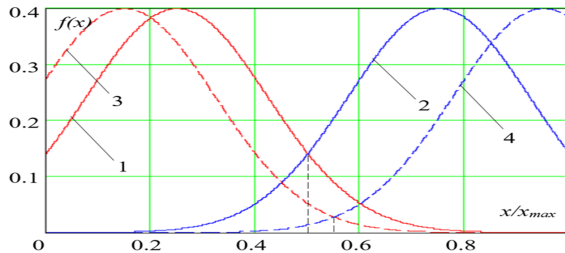


Рисунок 4 – Функції розподілення імовірності координат «легкої» та «важкої» фракцій НМ за різної швидкості потоку повітря під час розділення у вібропневмовідцентровому сепараторі: 1 – «легка» фракція,  $v=1$  м/с,  $v=4000$  кол./хв; 2 – «важка» фракція,  $v=1$  м/с,  $v=4000$  кол./хв; 3 – «легка» фракція,  $v=1,5$  м/с,  $v=4000$  кол./хв; 4 – «важка» фракція,  $v=1,5$  м/с,  $v=4000$  кол./хв

Функцію розподілення на рис. 4 наведено для випадку постійної частоти коливачь ротора та для двох значень швидкості потоку повітря ( $v = 1$  м/с – суцільна лінія;  $v = 1,5$  м/с – пунктирна лінія). Координата  $x$  на графіку пронормовано на максимальне значення відстані  $x_{\max}$  між робочими органами вібропневмовідцентрового сепаратора, які являють собою коаксіальні порожні циліндри. Координата стінки внутрішньої робочої поверхні (порожнього циліндра з меншим радіусом) – 0, а координата

зовнішньої робочої поверхні (циліндра з більшим радіусом) –  $x_{\max}$ . При цьому вважалось, розділення між збиральними бункерами знаходиться на відстані  $0,5 \cdot x_{\max}$  від кожної із робочих поверхонь.

Виходячи з того, що розділення між збиральними бункерами має координату  $0,5 \cdot x_{\max}$ , очевидно слід вважати що частка «важкої» фракції, частинки якої будуть мати координату менше  $0,5 \cdot x_{\max}$  потрапить у бункер, призначений для «легкої» фракції НМ. Такий же висновок можна зробити і для частини «легкої» фракції, частинки якої будуть мати координату більше  $0,5 \cdot x_{\max}$ . Результатом цього буде зниження якості отриманого насіння.

Знайти кількість частинок «легкої» та «важкої» фракцій насіннєвого матеріалу, які потрапляють у бункери, призначені, відповідно, для «легкої» ( $i = 1$ ) та «важкої» ( $i = 2$ ) фракції, можна наступним чином:

$$S_1 = N_1 \cdot \int_{-\infty}^{0,5 \cdot x_{\max}} \int_2^{\infty} f_2(x) dx f_1(x) dx, \quad (45)$$

$$S_2 = N_1 \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} \int_2^{\infty} f_2(x) dx f_1(x) dx, \quad (46)$$

де:  $S_1$  та  $S_2$  – кількість частинок у бункерах, призначених, відповідно, для «легкої» ( $i = 1$ ) та «важкої» ( $i = 2$ ) фракцій;  $f_1(x)$  та  $f_2(x)$  – функції розподілення імовірностей для частинок «легкої» ( $i = 1$ ) та «важкої» ( $i = 2$ ) фракцій;  $N_1$  та  $N_2$  кількість частинок «легкої» ( $i = 1$ ) та «важкої» ( $i = 2$ ) фракцій у матеріалі, що надходить на обробку.

Оскільки кінцевою продукцією розділення у вібропневмівідцентровому сепараторі, що розглядається в роботі, є насіння, то критерієм ефективності процесу розділення слід вважати чистоту «важкої» фракції. Під чистотою «важкої» фракції розуміється відношення кількості частинок «важкої» фракції у відповідному бункері ( $i = 2$ ) до загальної кількості частинок в ньому:

$$Purity = \frac{N_2 \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx}{N_1 \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} \int_2^{\infty} f_2(x) dx + N_2 \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx} \cdot 100\%. \quad (47)$$

Враховуючи те, що відсутнє розподілення частинок за густиною у вихідному НМ у межах між «легкою» та «важкою» фракціями, зроблено припущення, що  $N_1 = N_2$ . З урахуванням цього для (47) можна отримати:

$$\begin{aligned} Purity &= \\ &= \frac{N \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx}{N \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_1(x) dx + N_2 \cdot \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx} \cdot 100\% = \\ &= \frac{\int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx}{\int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_1(x) dx + \int_{0,5 \cdot x_{\max}}^{+\infty} f_2(x) dx} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (48)$$

З рис. 4 видно, що чистота «важкої» фракції буде визначатись параметрами процесу розділення: площа функцій розподілення у межах  $[0,5 \cdot x_{\max}, +\infty]$  буде різною за різних значень швидкості потоку повітря та частоти коливань ротора.

Значення чистоти «важкої» фракції визначали для значень швидкості потоку повітря та частоти коливань ротора із діапазонів: швидкість потоку повітря – 1...2 м/с; частота коливань робочої поверхні (ротора) – 4000...6000 кол./хв. Дискретність зміни швидкості повітряного потоку під час моделювання обиралась кратною 0,1 м/с. Частота коливань ротора змінювалась з дискретністю – 250 кол./хв.

Результати теоретичного моделювання процесу розділення НМ вібропневмодіцентричним сепаратором згідно (23) наведено на рис. 5 у вигляді поверхонь, де аргументами є швидкість повітряного потоку ( $v$ ) та частота коливань ротора ( $\nu$ ).

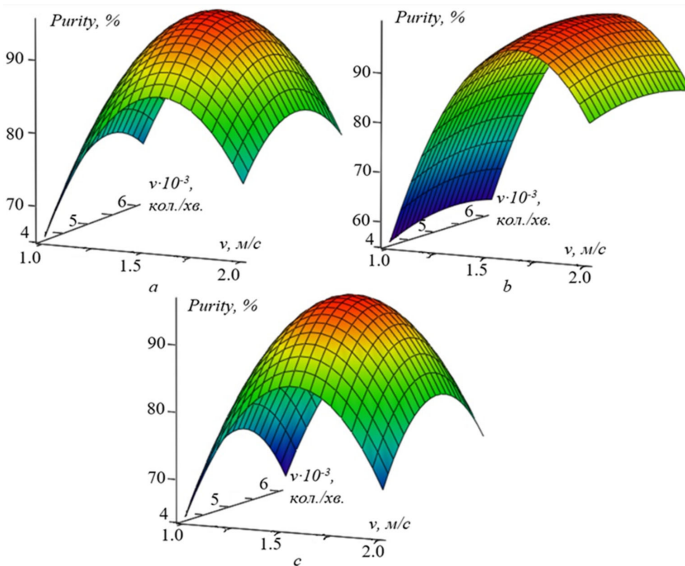


Рисунок 5 – Результати теоретичного моделювання зміни чистоти основної фракції НМ в залежності від частоти коливань ротора ( $\nu$ ) та швидкості повітряного потоку ( $v$ ) під час розділення вібропневмодіцентричним сепаратором НМ: а – пшениці; б – соняшнику; с – сої

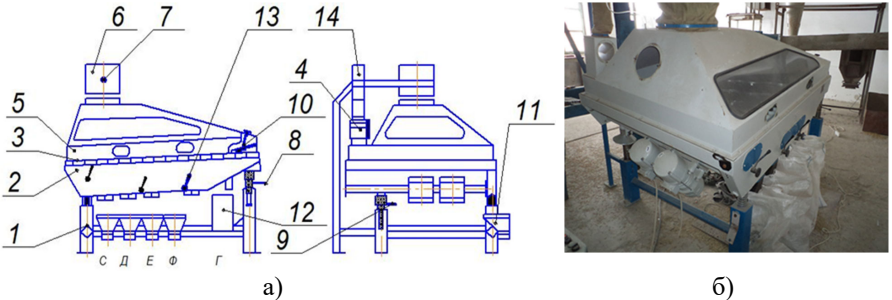
Процес пошарового руху псевдорозрідженого шару частинок НМ має достатньо складний фізичний характер, що необхідно враховувати у процесі



моделювання вібропневмовідцентрового розділення частинок за густиною насіння та провести експериментальну і виробничу перевірку отриманих теоретичних результатів.

**У четвертому розділі** «Методика та обладнання для проведення експериментальних досліджень процесу розділення НМ за густиною насіння» згідно до поставлених завдань наведено методики та програму лабораторних досліджень; описано конструкцію та принцип роботи ПСС і вібропневмовідцентрового сепаратору, на яких проводились експериментальні дослідження; представлено прилади та обладнання, які було використано для дослідження процесу розділення НМ за густиною насіння; викладено загальноприйнятні і авторські методики досліджень та обробки експериментальних даних та засоби статистичного оцінювання експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалась з використанням ПК, що оснащений пакетом прикладних програм зі статистичної обробки даних.

Дослідження процесу вібропневматичного розділення НМ за густиною насіння здійснювались на ПСС виробництва «ТОВ Хорольський механічний завод» (м. Хорол) (рис. 6).



1 – станина; 2 – стіл; 3 – кузов; 4 – камера аспіраційна; 5 – каменевідбірник;  
 6 – дека; 7 – живильник; 8 – клапан регулювальний; 9 – клапан повітряний;  
 10 – механізм регулювання витрати повітря; 11 – патрубки вивантажувальні; 12 – ємкість для каменів; 13 – патрубок завантажувальний; 14 – механізм регулювання повздовжнього кута нахилу;  
 С – фракція легка; Д – фракція середня; Е – фракція змішана; Ф – фракція важка; Г – каміння

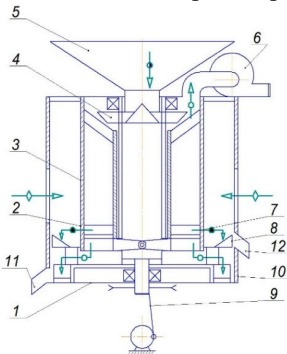
Рисунок 6 – Конструктивна схема (а) та загальний вид (б) ПСС

Робочим органом ПСС є дека, на якій відбувається процес розділення НМ на фракції з одночасним транспортуванням фракцій до вивантаження. Стіл складається з корпусу, повітропроникної транспортувальної робочої

поверхні (деки) та решітки для вирівнювання повітряного потоку. НМ через живильник 7 потрапляє на деку 6 і починає рухатись по її поверхні у бік патрубків вивантажувальних 11. Під одночасною дією повітряного потоку, що проходить крізь деку 6, і коливань деки, НМ переходить у псевдорозріджений стан. НМ розширюється у шари, які складаються з частинок відповідної густини. Розділення відбувається таким чином, що легка фракція вивантажується до патрубка С, фракція частинок середньої густини – до патрубка Д, фракція частинок зі змішаною густиною – до патрубка Е, важка фракція – до патрубка Ф, каміння (за наявності) вивантажується до патрубка Г. Час знаходження і швидкість руху НМ на поверхні деки 6 можна змінювати шляхом підбору повздовжнього і поперечного кутів нахилу робочої поверхні.

Дослідження процесу вібропневмівідцентрового розділення НМ за густиною насіння проводились на розробленому вібропневмівідцентровому сепараторі (рис. 7).

Робочим органом вібропневмівідцентрового сепаратора є робоча поверхня циліндричної форми, на якій відбувається процес розділення НМ на фракції з одночасним транспортуванням фракцій до вивантаження.



а)



б)

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – поверхня робоча; 4 – розкидач дисковий;  
 5 – бункер завантажувальний; 6 – патрубок вентилятору; 7 – дільник;  
 8, 11, 12, – лопатки; 9 – вібробуджувач; 10 – вікна; • – вивантаження  
 насіння з більшою густиною; ○ – вивантаження насіння з меншою густиною;  
 ◇ – повітряний потік

Рисунок 7 – Конструктивна схема (а) та загальний вид (б) лабораторного вібропневмівідцентрового сепаратора

НМ через завантажувальний пристрій 5 потрапляє на розкидач 4, з якого рівномірним шаром розподіляється по робочій поверхні 3. Частинки

НМ під дією відцентрової сили притискаються до робочої поверхні, а під впливом повітряного потоку та коливань робочої поверхні переходять до псевдорозрідженого стану. Частинки з більшою густиною занурюються до робочої поверхні, а з меншою густиною спливають на поверхню шару. НМ рухається до вивантажувальних лотків, де відбувається процес вивантаження фракцій відповідної густини («важка» та «легка» фракції).

У п'ятому розділі «Верифікація результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння» наведено результати верифікації механіко-математичної моделі та експериментальних досліджень процесу розділення НМ за густиною насіння.

Аналіз даних USDA що до структури посівних площ України під найбільш поширені зернові культури дозволив визначити, що найбільший об'єм виробництва має пшениця (30%), друге місце – соняшник (26%), третє – кукурудза (21%). Останнім часом в Україні та світі активно набирає популярності культурна соя. При проведенні експериментальних досліджень було використано найбільш поширені в Україні культури: озима пшениця сорту «Харківська - 99», маса 1000 зерен – 38 г, густина частинки –  $780 \text{ кг/м}^3$ , вологість – 13%; гібрид кукурудзи трійний модифікований «Донор МВ», маса 1000 зерен – 30 г, густина частинки –  $850 \text{ кг/м}^3$ , вологість – 14 %; соняшник кондитерський СПК, маса 1000 зерен – 43 г, густина –  $440 \text{ кг/м}^3$ , вологість – 7%; соя сорту «Фортуна», маса 1000 зерен – 142 г, густина –  $800 \text{ кг/м}^3$ , вологість – 11 %.

Критерієм ефективності процесу розділення прийнято один з визначальних показників якості НМ, що є кінцевою метою процесу – чистота основної фракції. Під чистотою (*Purity*) основної фракції НМ розуміють вміст основної культури у відсотках до наважки, яку взято для аналізу.

Для верифікації розроблених механіко-математичних моделей розділення НМ і ефективності щодо їх практичного застосування проведено дослідження, яке включає два етапи – теоретичний та практичний.

На першому етапі проведено теоретичне моделювання процесу розділення НМ в залежності від визначальних параметрів процесу. Результати теоретичного моделювання наведено у другому та третьому розділі.

На другому етапі проведені експериментальні дослідження розділення НМ у виробничих умовах. Означені дослідження проводились для пневмосортувального столу та вібропневмовідцентрового сепаратора.

Для підвищення ефективності процесу розділення НМ за густиною насіння шляхом його інтенсифікації було розроблено механічні інтенсифікатори хвилеподібного типу (рис. 8), які використовуються для пришвидшення/уповільнення руху шарів матеріалу та покращення процесу перерозподілу частинок до фракцій відповідної густини.



*Рисунок 8 - Загальний вид інтенсифікаторів хвилеподібного типу*

Пошук раціональних значень проводився на основі факторного експерименту, його статистичній обробці та аналізу. Одержані значення було порівняно з результатами теоретичного моделювання процесу, які наведено у другому та третьому розділах.

*Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі розділення НМ на робочій поверхні ПСС.*

Параметрами (факторами) ПСС, що мають визначальний вплив на ефективність процесу розділення НМ, визначено: частота та амплітуда коливань, поздовжній та поперечний кути нахилу деки та швидкість повітряного потоку на вході в шар НМ. Діапазони вихідних даних для моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС наведені в табл. 1.

*Таблиця 1 – Діапазони вихідних даних для моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС*

Параметр	Діапазон
Частота коливань деки, (кол./хв)/(с <sup>-1</sup> )	800...1000/13,3...16,7
Амплітуда коливань деки, мм	4...6
Поздовжній кут нахилу деки, град.	0...8
Поперечний кут нахилу деки, град.	0...8
Швидкість повітряного потоку, м/с	1...3

Раціональні значення частоти та амплітуди коливань деки ПСС визначались у більшому ступені густиною вихідного матеріалу. Раціональні значення поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки визначаються у більшому ступені ефективною силою тертя між шаром НМ та поверхнею ПСС, раціональне значення швидкості повітряного потоку – аеродинамічними характеристиками частинок вихідної матеріалу та, відповідно, їх середніми характерними розмірами. Раціональні частоти та амплітуди коливань деки ПСС, а також величини раціональних поздовжнього

та поперечного кутів нахилу деки визначались як результат двофакторного експерименту. Рациональні значення швидкості повітряного потоку встановлювались за екстремумами або асимптотами залежності від даної величини чистоти основної фракції як параметра.

Знаходження раціональних параметрів проводилось поетапно: на першому етапі було визначено діапазони раціональних значень частоти та амплітуди коливань деки ПСС за сталих значень поздовжнього та поперечного кутів її нахилу, а також сталої швидкості повітряного потоку; на другому етапі було визначено раціональні значення поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС за умови раціональних значень частоти та амплітуди її коливань і сталої швидкості повітряного потоку; на третьому етапі було визначено раціональне значення швидкості повітряного потоку за умови вибору раціональних значень всіх інших параметрів.

На рис.9 наведено результати порівняння теоретичного та експериментального двофакторного моделювання процесу розділення НМ, де факторами є частота та амплітуда коливань деки ПСС, а критерієм оцінювання – чистота основної фракції. Поперечний та поздовжній кути при цьому дорівнювали  $1^\circ$ , а швидкість повітряного потоку –  $1 \text{ м/с}$ .

На рис.9 – 12 наведено залежності чистоти основної фракції від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань ПСС. Ці січні є апроксимаційними функціями даних, отриманих теоретичним моделюванням з використанням розробленої механіко-математичної моделі у порівнянні з результатами експериментальних досліджень. Точками на цих графіках позначено значення чистоти основної фракції в залежності від частоти та амплітуди коливань ПСС, що отримані експериментальним шляхом.

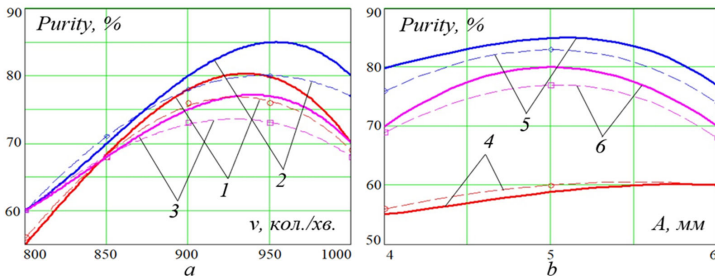


Рисунок 9 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від частоти (*a*) та амплітуди (*b*) коливань пневмосортувального столу, відповідно, за різних значень частоти (4 – 800 кол./хв; 5 – 900 кол./хв; 6 – 1000 кол./хв) та амплітуди (1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм)

З рис. 9 – 12 видно, що наведені залежності, які отримані теоретичним шляхом, на 5% відрізняються від даних, отриманих у виробничих умовах. Для розділення НМ пшениці (рис.9) найбільше відхилення спостерігається за частоти коливань 950 кол./хв та амплітуди 5 мм.

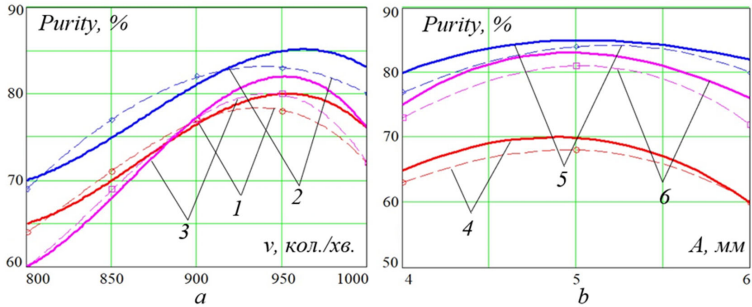


Рисунок 10 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від частоти (а) та амплітуди (б) коливань ПСС, відповідно, за різних значень частоти (4 – 800 кол./хв; 5 – 900 кол./хв; 6 – 1000 кол./хв) та амплітуди (1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм)

При розділенні НМ кукурудзи (рис.10) найбільше відхилення спостерігається за частоти коливань близько 950 кол./хв та амплітуди 5 мм і складає 2%.

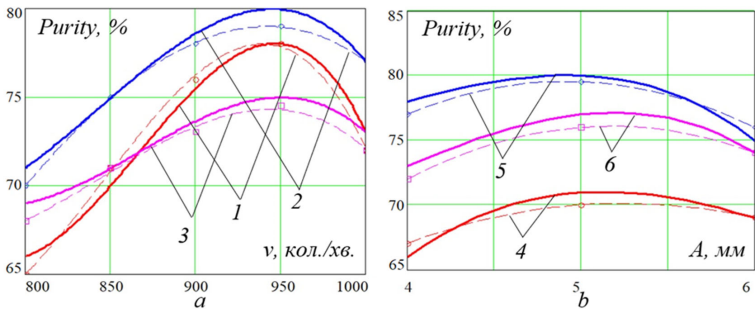


Рисунок 11 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від частоти (а) та амплітуди (б) коливань ПСС, відповідно, за різних значень частоти (4 – 800 кол./хв; 5 – 900 кол./хв; 6 – 1000 кол./хв) та амплітуди (1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм)

При розділенні НМ соняшнику (рис.11) відхилення теоретично отриманого результату від результату, отриманого експериментальним шляхом, складає 3%.

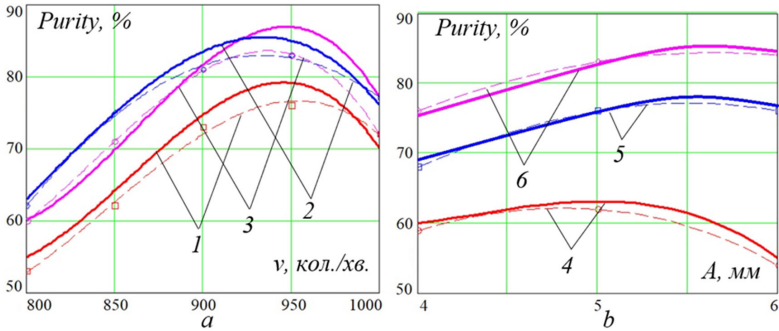


Рисунок 12 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від частоти (а) та амплітуди (б) коливань ПСС, відповідно, за різних значень частоти (4 – 800 кол./хв; 5 – 900 кол./хв; 6 – 1000 кол./хв) та амплітуди (1 – 4 мм; 2 – 5 мм; 3 – 6 мм)

При розділенні НМ соняшнику (рис.12), відхилення теоретично отриманого результату від результату, отриманого експериментальним шляхом, складає 4%.

Визначені діапазони раціональних параметрів ПСС (амплітуди та частоти коливань робочої поверхні) для матеріалів представлено у табл. 2.

Таблиця 2 – Діапазони раціональних значень амплітуди та частоти коливань ПСС

Сировина	Амплітуда коливань, мм	Частота коливань, кол./хв
Пшениця	4,5...5,5	930...960
Кукурудза	4,5...5,5	940...960
Соняшник	4,5...5,5	940...960
Соя	5,5...6	930...950

Для встановлення діапазонів поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС, за яких має місце максимальне значення чистоти основної фракції матеріалу, що використовувалась в дослідженні, наведено на рис. 13 – 16.

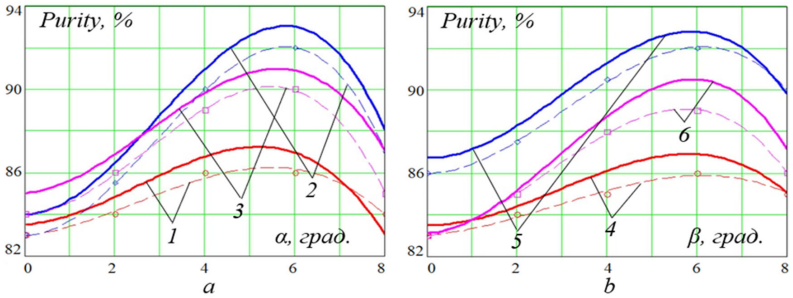


Рисунок 13 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, в залежності від поздовжнього (а) та поперечного (б) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів нахилу робочої поверхні

На рис.13 – 16 наведені дані за різних поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС, отримані експериментальним шляхом при використанні НМ обраних культур. Дані, що отримані експериментальним шляхом, визначались для п'яти значень поздовжнього (0; 2; 4; 6; 8 град.) та п'яти значень поперечного (0; 2; 4; 6; 8 град.) кутів. Ці значення наведені у вигляді точок відповідного кольору, поєднаних для наочності апроксимаційною функцією.

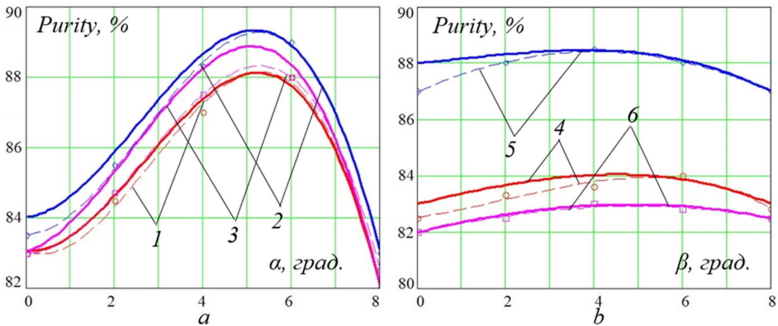


Рисунок 14 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ кукурудзи, в залежності від поздовжнього (а) та поперечного (б) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних значень поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів нахилу робочої поверхні



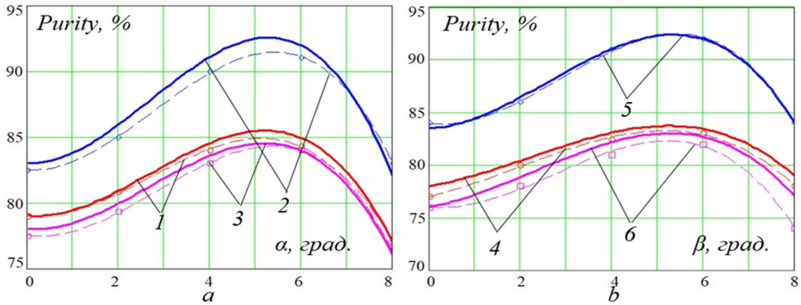


Рисунок 15 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику, в залежності від поздовжнього (а) та поперечного (б) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних значень поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів нахилу робочої поверхні

Аналіз наведених залежностей (рис.13 – 16) вказує, що дані, отримані теоретично, відрізняються від даних, отриманих експериментальним шляхом, знаходяться в межах, які не перевищують 4 %.

Теоретичні дані, отримані для випадку НМ пшениці, відрізняються від експериментальних результатів не більше ніж на 3,5%. Щодо результатів моделювання розділення НМ кукурудзи, соняшнику та сої, відмінності теоретичних результатів від експериментальних не перевищують 2 %.

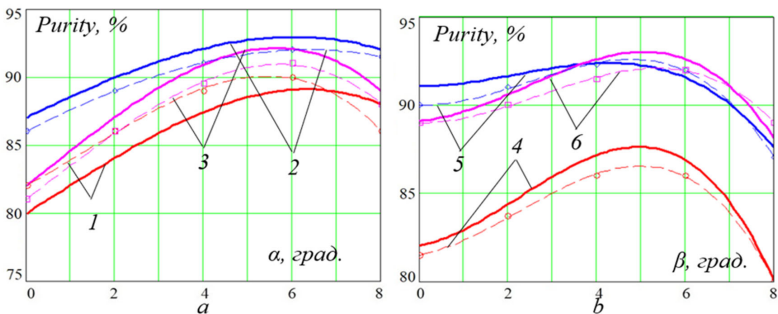


Рисунок 16 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої, в залежності від поздовжнього (а) та поперечного (б) кутів нахилу деки ПСС, відповідно, за різних значень поздовжнього (1 – 0 град.; 2 – 4 град.; 3 – 8 град.) та поперечного (4 – 0 град.; 5 – 4 град.; 6 – 8 град.) кутів нахилу робочої поверхні

Встановлений результат доводить адекватність розробленої механіко-математичної моделі.

За отриманими даними визначено діапазони раціональних значень поздовжнього та поперечного кутів нахилу деки ПСС. Під раціональними значеннями кутів нахилу мається на увазі такі їх величини, за яких досягається максимальне значення чистоти основної фракції НМ, що наведені у табл.3.

Таблиця 3 – Діапазони раціональних значень поздовжнього ( $\alpha$ ) та поперечного ( $\beta$ ) кутів нахилу деки ПСС

Сировина	$\alpha$ , град.	$\beta$ , град.
Пшениця	5...7	5...7
Кукурудза	4...6	3...6
Соняшник	4...6	5...6
Соя	5...7	4...6

Заключним етапом дослідження є верифікація механіко-математичної моделі розділення НМ на робочій поверхні ПСС в залежності від швидкості повітряного потоку, а також визначення діапазонів раціональних значень цього параметру процесу за умови використання різного матеріалу.

Зміна швидкості повітряного потоку як одного з основних параметрів процесу розділення НМ за густиною насіння проводилась в діапазоні від 1 до 3 м/с. Відповідно до значень діапазону, теоретичне і експериментальне моделювання процесу проводилось для різних типів НМ. Результати наведено на рис.17.

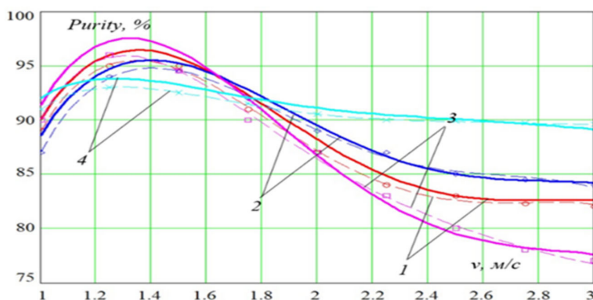


Рисунок 17 – Чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку для матеріалу:

1 – пшениці; 2 – кукурудзи; 3 – соняшнику; 4 – сої

Отримані теоретичні дані апроксимовано поліноміальною функцією. Експериментальні дані наведені на рис.17 у вигляді точок відповідного кольору. З рисунку видно, що дані, отримані теоретично, відрізняються від емпіричних даних не більше ніж на 3 %. Результат доводить адекватність розробленої механіко-математичної моделі щодо моделювання процесу розділення НМ на робочій поверхні ПСС в залежності від швидкості повітряного потоку. Перевищення швидкості повітряного потоку критичного значення у 1,8 м/с призводить шар НМ до стану «кипіння» та процес розділення припиняється.

Максимальна чистота основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці, досягається за швидкості повітряного потоку в діапазоні 1,3...1,5 м/с. Для кукурудзи раціональне значення швидкості повітряного потоку становить 1,3...1,6 м/с, сояшнику та сої – 1,2...1,4 м/с. Ці значення справедливі за умови використання під час процесу розділення відповідних раціональних значень частоти і амплітуди коливань та позовжнього і поперечного кутів нахилу деки ПСС.

При цьому слід відмітити відмінності у характері залежностей: різне спадання функцій за збільшення швидкості повітряного потоку. Такий характер обумовлений різними густиною та аеродинамічними властивостями вхідного НМ. Найменший вплив зміна швидкості повітряного потоку чинить на НМ сої, оскільки соя має найбільшу густину і форму, наближену до кулі з відповідною аеродинамікою. В той же час найбільшому впливу піддається насіння сояшнику, яке має найменшу густину з видів НМ, що досліджувались, та трикутну форму.

Таким чином, доведено адекватність механіко-математичної моделі, що описує процес розділення НМ на робочій поверхні ПСС. При цьому встановлено діапазони раціональних значень визначальних параметрів реалізації цього процесу: частоти та амплітуди коливань, позовжнього та поперечного кутів нахилу деки і швидкості повітряного потоку.

*Аналіз ефективності застосування механіко-математичної моделі розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора.*

Швидкість потоку повітря змінювалась в діапазоні від 1 до 2 м/с. Частота коливань ротора змінювалась в діапазоні від 4000 до 6000 кол./хв.

Для перевірки адекватності розробленої механіко-математичної моделі розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора та для встановлення діапазонів значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора, за яких досягається максимальна чистота основної фракції, які слід вважати раціональними (рис.18 – 20).

Залежності, наведені на рис. 18 – 20, являють собою апроксимаційні функції даних, отриманих теоретичним моделюванням, представлені на графіках суцільними лініями. Точками позначені експериментальні дані, що отримано у виробничих умовах.

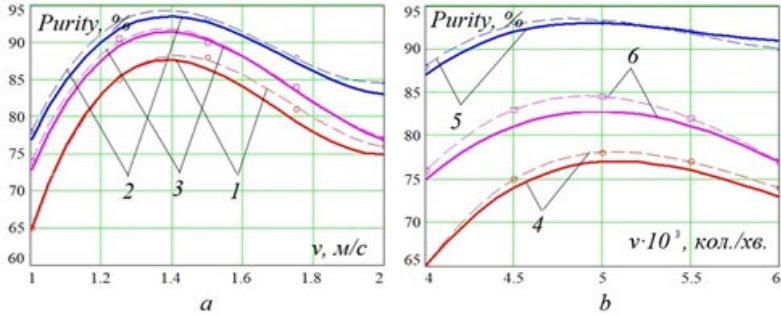


Рисунок 18 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ пшениці вібропневмовідцентровим сепаратором, в залежності від швидкості повітряного потоку (а) та частоти коливань ротора (b), відповідно, за різних значень швидкості повітряного потоку (4 – 1 м/с; 5 – 1,5 м/с; 6 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (1 – 4000 кол./хв; 2 – 5000 кол./хв; 3 – 6000 кол./хв)

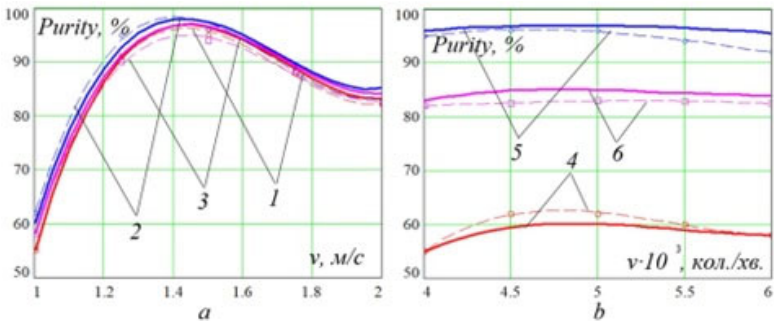


Рисунок 19 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ соняшнику на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора, в залежності від швидкості повітряного потоку (а) та частоти коливань ротора (b), відповідно, за різних значень швидкості повітряного потоку (4 – 1 м/с; 5 – 1,5 м/с; 6 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (1 – 4000 кол./хв; 2 – 5000 кол./хв; 3 – 6000 кол./хв)

З наведених на рис.18 – 20 даних видно, що результати, отримані теоретично, відрізняються від експериментальних результатів не більше, ніж на 4 %. Так для досліджень, при обробці НМ пшениці це відхилення не перевищує 3,5...4 %, для соняшнику та сої – не перевищує 2...3 %. Такий результат дозволяє стверджувати, що розроблена механіко-математична модель розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора є адекватною для описання результатів процесу за умови варіювання такими його параметрами як швидкість повітряного потоку та частота коливань ротора.

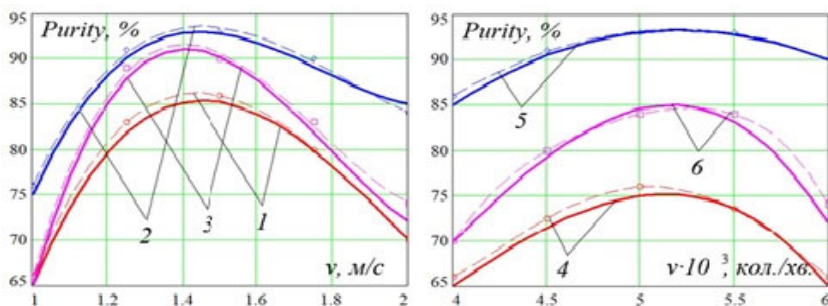


Рисунок 20 – Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора, в залежності від швидкості повітряного потоку (а) та частоти коливань ротора (б), відповідно, за різних значень швидкості повітряного потоку (4 – 1 м/с; 5 – 1,5 м/с; 6 – 2 м/с) та частоти коливань ротора (1 – 4000 кол./хв; 2 – 5000 кол./хв; 3 – 6000 кол./хв)

За наведеними результатами визначено діапазони значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора вібропневмовідцентрового сепаратора, за яких під час розділення НМ досягається максимальна чистота основної фракції сировини, що підлягає обробці (табл.4).

Таблиця 4 – Діапазони раціональних значень швидкості повітряного потоку ( $v$ ) та частоти коливань ротора ( $\nu$ ) вібропневмовідцентрового сепаратора

Сировина	$v$ , м/с	$\nu$ , кол./хв
Пшениця	1,2...1,5	4500...5100
Соняшник	1,3...1,5	4500...5000
Соя	1,3...1,6	5000...5500

Таким чином, розроблені механіко-математичної моделі розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрового сепаратора верифіковано для визначення раціонального результату процесу розділення НМ за густиною насіння за умови варіювання такими його параметрами як швидкість повітряного потоку та частота коливань ротора. Визначено діапазони раціональних значень швидкості повітряного потоку та частоти коливань ротора вібропневмовідцентрового сепаратора, за яких досягається максимальна чистота основної фракції матеріалу, що підлягає розділенню.

**У шостому розділі** «Ідентифікація рівня економічної ефективності удосконалення технології та сепаруючих машин для розділення насінневих матеріалів за густиною насіння» наведено розрахункову та дійсну економічну ефективність від впровадження науково-технічних рішень результатів дисертаційних досліджень (табл. 5).

Реалізація наукових і технічних досягнень, новітніх технологій в обмежених розмірах може проходити на основі простого відтворення і буде впливати на продуктивність праці та ефективність виробництва. Додаткові вкладення праці й капіталу передбачають зміну технологічних способів виробництва, використання нової техніки і технологій.

*Таблиця 5 – Визначення ефективності застосування інноваційних рішень в масштабах типового підприємства насінницького напрямку спеціалізації*

Показник	Значення показників по підприємству			
	Сільськогосподарські культури			
	Пшениця	Кукурудза	Соняшник	Соя
1	2	3	4	5
Площа ріллі, га	2200			
Площа посівів культур, га	1050	640	220	290
Урожайність, ц/га	55	75	21	32
Валовий збір, т	5775	4800	462	928
Собівартість, грн/т	2018,18	2466,67	8571,43	3468,75
Витрати на підготовку, грн/т	36	43,2	46,95	43,2
Обсяг насінневої продукції при використанні для власних потреб, т	5024	4176	402	807
Обсяг насінневої продукції при реалізації, т	5342	4440	427	858
Ефект з одиниці продукції при використанні для власних потреб, грн/т	13050	78300	60900	26100

1	2	3	4	5
Ефект з одиниці продукції при реалізації, грн/т	6660	70762,5	57858,75	18962,5
Сума економічного ефекту при використанні для власних потреб, тис. грн	5873,83	336508,19	22342,55	19389,58
Сума економічного ефекту при реалізації, тис. грн	24556,25	300176,56	18346,47	12480,66
Разом економічний ефект при використанні для власних потреб, тис. грн	384114,15			
Разом економічний ефект при реалізації, тис. грн	355559,94			

Виходячи з даних, що наведено в табл. 5 та кількості підприємств вказаного напрямку спеціалізації в Україні, розмір прогнозованого алокативного ефекту знаходиться в інтервалі від 588 млрд. грн до 635 млрд. грн за інших рівних умов. Однак, ускладнення експорту, зрушення в структурі витрат та цін на продукцію, пов'язані з надзвичайним подорожчанням логістичних процедур, загострення виробничих, фінансових та інвестиційних ризиків, обумовлених бойовими діями, викликали скорочення вітчизняного виробництва та потенціалу його суб'єктів.

Наразі, прогнозований економічний ефект зменшено вдвічі, оскільки не більше третини підприємств галузі потенційно готові до впровадження запропонованих інноваційних рішень, відповідно, прогноз рівня алокативної ефективності знизиться до 40...60 млрд. грн. в річному обчисленні в загальнодержавному масштабі.

Економічна ефективність від впровадження результатів дослідження на: ПрАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків) становить 15085 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ) становить 23155 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп) становить 22243 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ТОВ «Батьківщина» (Сумська обл., с. Карабутове) становить 24985 грн. за сезон на одну сепаруючу машину; ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів) становить 1 млн. 500 тис. грн. за рахунок проектних змін технологічних ліній процесу. Річний економічний ефект від впровадження рекомендацій щодо раціональних режимів експлуатації сепаруючих машин становить 1,585 млн. грн.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1т НМ 98грн/т.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової проблеми підвищення ефективності процесу вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ за густиною насіння, що дозволило зробити такі висновки та пропозиції:

1. Встановлено, що техніко-технологічне забезпечення виробництва зернових, в тому числі й технологічних процесів розділення НМ, не дають можливості повною мірою здійснювати управління і унеможливають підвищення економічних показників систем виробництва; стратегічним завданням є глибока модернізація галузі як складової частини агропромислового комплексу на базі високорентабельних сучасних технологій і техніки нового покоління, системного обґрунтування параметрів множини робочих органів машин для вібропневматичного та вібропневмовідцентрового розділення НМ, якими враховано відміни механізованих процесів, зумовлених зміною фізико-механічних властивостей матеріалу.

2. Розроблено дво- та тривимірні механіко-математичні моделі гідродинаміки багатофазних систем, які описують процес розділення псевдорозрідженого шару НМ на фракції на робочих поверхнях вібропневматичних (9) та вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах (39, 40), обґрунтовано принципи інтенсифікації процесу розділення НМ за густиною насіння.

3. На основі розробленої механіко-математичні моделі отримано аналітичні залежності, які моделюють процес розділення НМ на робочих поверхнях вібропневматичних сепаруючих машинах та узагальнюють взаємозв'язок кінематичних режимів та конструкційних параметрів з фізико-механічними властивостями матеріалу. Визначено, що відносна швидкість шарів частинок (12) дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда ( $A$ ) залежить від фізико-механічних параметрів НМ ( $\bar{\rho}_n$ ), швидкості повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару ( $v$ ) і ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості ( $\mu_n$ ).

4. Чисельним розв'язком механіко-математичних моделей встановлено траєкторії та визначено швидкості руху шарів насіннєвого матеріалу, які утворено частинками різної густини. Відзначено, що компонента швидкості  $V_{13}$  частинок дискретної фази менше середнього значення швидкості повітряного потоку, залежить від об'ємної концентрації частинок дискретної фази, швидкості повітряного потоку ( $v$ ), кінематичного режиму вібраційних коливань робочої поверхні, що обумовлюється ефективним коефіцієнтом



кінематичної в'язкості неперервної фази. За коефіцієнтом тертя  $f$ , що обумовлено робочою поверхнею, який наближається до нуля, домінуючим доданком у залежності з визначення швидкості  $V_{13}$  буде доданок з квадратичною залежністю від координати  $x_3$ .

5. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено комплексний вплив на показник чистоти (*Purity*) (22 – 27) основної фракції швидкості повітряного потоку ( $v$ ), частоти ( $\nu$ ) і амплітуди ( $A$ ) коливань деки пневмосортувального столу, повздовжнього ( $\alpha$ ) й поперечного ( $\beta$ ) кутів її нахилу, що дозволило встановити діапазони раціональних значень відмічених параметрів: пшениця:  $v = 1,3 - 1,5$  м/с,  $\nu = 940$  кол./хв,  $A = 5$  мм,  $\alpha = 5 - 7$  град.,  $\beta = 5 - 7$  град.; кукурудза:  $v = 1,3 - 1,6$  м/с,  $\nu = 940$  кол./хв,  $A = 5$  мм,  $\alpha = 4 - 6$  град.,  $\beta = 3 - 6$  град.; соняшник:  $v = 1,2 - 1,4$  м/с.,  $\nu = 940$  кол./хв.,  $A = 5$  мм.,  $\alpha = 4 - 6$  град.,  $\beta = 5 - 6$  град.; соя:  $v = 1,2 - 1,4$  м/с,  $\nu = 940$  кол./хв,  $A = 6$  мм.,  $\alpha = 5 - 7$  град.,  $\beta = 4 - 6$  град.

6. Чисельним моделюванням процесу розділення НМ на робочій поверхні вібропневмовідцентрових сепаруючих машинах (39 – 44) визначено поля швидкостей руху компонентів та встановлено, що найбільший вплив на параметри процесу розділення НМ має частота коливань робочої поверхні ( $\nu$ ) та швидкість повітряного потоку ( $v$ ). Збільшення частоти коливань робочої поверхні призводить до відповідного зростання абсолютної швидкості руху шарів НМ вздовж робочої поверхні в напрямку вивантаження, що уможливорює майже втричі скоротити час протікання процесу. Встановлено, що за умов наближення значення швидкості повітря на вході в шар НМ до позначки  $v = 1,6$  м/с чистота основної фракції зменшується, оскільки збільшується швидкість переміщення шарів НМ в напрямку вивантаження.

7. Імітаційним моделюванням обґрунтовано та експериментально підтверджено залежність чистоти (*Purity*) основної фракції НМ (47, 48) від параметрів процесу, що дозволило визначити раціональні значення швидкості повітряного потоку ( $v$ ) та частоти коливань робочої поверхні ( $\nu$ ) вібропневмовідцентрових сепаруючих машин: пшениці  $v = 1,2 - 1,5$  м/с,  $\nu = 4500 - 5100$  кол./хв; соняшнику  $v = 1,3 - 1,5$  м/с,  $\nu = 4500 - 5000$  кол./хв; сої  $v = 1,3 - 1,6$  м/с,  $\nu = 5000 - 5500$  кол./хв.

8. Розкрито механіко-технологічні підстави збільшення інтенсивності технологічних процесів розділення НМ за густиною насіння вібропневматичними та вібропневмовідцентровими сепаруючими машинами і на цій основі розроблено нову сепаруючу машину та удосконалено технологічну лінію підготовки високоякісного НМ. Обґрунтовано раціональні значення інтенсифікаторів хвилеподібного типу, що

встановлюють на робочі поверхні: крок встановлення  $H = 350 - 450$  мм; для пшениці: висота хвилеподібного інтенсифікатору  $h = 10 - 12$  мм, висота прорізу хвилі  $h_H = 2 - 3,5$  мм, довжина хвилі  $l = 150 - 250$  мм; для кукурудзи:  $h = 15 - 20$  мм, висота прорізу хвилі  $h_H = 3 - 8,5$  мм, довжина хвилі  $l = 150 - 250$  мм; для сояшинику:  $h = 10 - 15$  мм, висота прорізу хвилі  $h_H = 3 - 4,5$  мм, довжина хвилі  $l = 150 - 250$  мм; для сої:  $h = 15 - 20$  мм, висота прорізу хвилі  $h_H = 5,5 - 7$  мм, довжина хвилі  $l = 150 - 250$  мм, що уможливило підвищити на 25 % продуктивність машин та довести чистоту основної фракції до 96 %.

9. Результати дослідження з виробництва інтенсифікаторів хвилеподібного типу впроваджено на ПрАТ ХМЗ (Хорольський механічний завод, м. Хорол) для модернізації, удосконалення ПСС-3,5, а також розроблення ПСС-10.

Річний економічний ефект від впровадження рекомендацій щодо раціональних режимів експлуатації сепаруючих машин становить 1,585 млн. грн.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень у підприємствах переробної галузі України становить з розрахунку на 1 т НМ 98 грн/т.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

### *Монографії:*

1. Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І., Півень М.В., Харченко С.О., **Бредихін В.В.**, Мандрика О.В. Моделювання процесів зернових сепараторів: монографія. Харків, 2010. 359 с.

2. **Бредихін В.В.** Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння: монографія. Харків, 2017. 81 с.

3. Ольшанський В.П., **Бредихін В.В.**, Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків, 2017. 802 с.

4. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Ольшанський О.В., **Бредихін В.В.** Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів: монографія. Харків, 2022. 262 с.

5. **Бредихін В.В.**, Богомолов О.В., Сліпченко М.В., Кісь-Коркіщенко Л.В., Іващенко С.Г., Ірклієнко В.І., Черняєв О.О., Тікунов С.Р. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: монографія. Харків, Діса+, 2023. 401 с.

*Статті у фахових виданнях України, інших держав та у виданнях, включених до міжнародних баз:*

6. Тищенко Л.Н., **Бредихін В.В.**, Харченко С.А. Вибропневмоцентробежное разделение семенной смеси с учетом влияния рифлей. Вісник ХНТУСГ. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв. 2008. Вип. 74. С. 12 – 18.

7. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., Харченко С.А. **Бредихін В.В.** Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решетками. Вісник ХНТУСГ: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. 2009. Вип. 88. С. 34 – 44.

8. **Бредихін В.В.**, Тищенко Л.М., Пивень М.В. До питання математичного моделювання процесу вибропневматичного розділення зернових сумішей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2013. № 140. С. 45 – 59.

9. **Бредихін В.В.**, Тищенко Л.Н., Пивень М.В. Определение эффективного коэффициента динамической вязкости зерновой смеси на рабочей поверхности пневмосортировального стола. MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2013. V. 15. № 7. P. 180 – 191.

10. **Бредихін В.В.** К уравнению движения зерновой смеси. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. № 148. С. 254 – 257.

11. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., **Бредихін В.В.** Исследование внутрислоевого движения частиц зерновых смесей. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014. №. 152. С. 5 – 11.

12. **Бредихін В.В.**, Пивень М.В. К уравнению послоевого движения псевдооживленной зерновой смеси. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 156. С. 204 – 208.

13. **Бредихін В.** Шевченко В. К математической модели разделения зерновой смеси по плотности семян цилиндрическими рабочими

поверхностями. MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. 2015. Т. 17. № 7. Р. 39 – 44.

14. **Бредихин В.В.** К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей. Вісник ХНТУСГ. 2016. Вип. 143. С. 45 – 47.

15. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., **Bredykhin V.**, Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Т. 2. № 7. Р. 63 – 69. (*Scopus*) (авторський внесок полягає в обґрунтуванні оптимальних параметрів процесу розділення насінневих матеріалів на робочих поверхнях циліндричної форми).

16. **Бредихин В.В.**, Харченко С.А. К уравнению движения частиц при моделировании процесса сепарации зерновых смесей вибропневматическими сепараторами. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2017. Вип. 47/2. С. 21 – 25.

17. **Vadym Bredykhin**, Petro Gurskyi, Oleksiy Alforyov, Khrystyna Bredykhina, Andrey Pak. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Т. 3/1. № 111. Р. 79 – 86. (*Scopus*) (авторський внесок полягає у моделюванні процесу сегрегації НМ за густиною насіння).

18. **Bredykhin Vadim**, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Т. 4/1. № 112. Р. 54 – 61. (*Scopus*) (авторський внесок полягає у моделюванні процесу сегрегації НМ за густиною насіння).

19. **Бредихін В.В.** Шляхи підвищення економічної ефективності процесу підготовки насінневого матеріалу. Український журнал прикладної економіки та техніки. Західноукраїнський національний університет, 2023. № 3. С. 109 – 144. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-15>

20. **Bredykhin Vadym**, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. Р. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018> (*Scopus*) (авторський внесок полягає у розробці математичної моделі калібрування насінневих матеріалів).

21. Slipchenko Maksym, **Bredykhin Vadym**, Kis-Korkishhenko Lilliia, Pak Andrey, Alfyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Т. 4/7. № 124. Р. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425> (*Scopus*) (авторський внесок полягає у дослідженні нестационарні коливання осциляторів при дії тривалих і короткочасних імпульсів).

22. Slipchenko M., **Bredykhin V.**, Pak A., Gurskyi P., Alfyorov O., Pak A. (2023). Constructing a physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 №125. P. 24 – 30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391> (*Scopus*) (авторський внесок полягає у розробці математичної моделі розділення насінневих матеріалів).

*Праці, що відображають практичні результати роботи:*

23. **Бредихін В.В.**, Мезенцев В.О., Черняєв О.О. Прилад для розділення насінневих матеріалів за густиною: пат. UA 127393 Україна: МПК (2018.01) B03B 4/00 B07B 4/08 (2006.01) B07B 9/02 (2006.01); заявл. 16.03.2018; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 4 с.

24. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Решето для очищення зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. UA 133625 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 10.12.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7. 4 с.

25. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Жолобчасте сито з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. UA 145733 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 31.08.2020; опубл. 29.12.2020, Бюл. № 24. 4 с.

26. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р., Мезенцев В.О. Сито для калібрування сипких матеріалів: пат. UA 150092 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01); заявл. 16.08.2021; опубл. 30.12.2021, Бюл. № 52. 4 с.

*Список наукових праць, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

*Монографії:*

27. F. Peretsevov, P. Gurskyi, V. Ladyka, M. Ianchyk, I. Krapivnytska, S. Omelchenko, **V. Bredykhin**, V. Kis, T. Marenkova, Z. Garncaec. Food technology using structurants: the monograph. Sumy-Kharkiv-Kyiv-Wroclaw, 2021. 250 p.

28. Кунденко М.П., Єгорова Ю.О., **Бредихін В.В.**, Єгоров О.Ю. Метрологічне забезпечення електронних систем вимірювання електрофізичних параметрів: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2021. 198 с.

*Матеріали і тези конференцій:*

29. **Бредихін В.В.** Исследование влияния распределения и силы воздушного потока на параметры процесса пневматического разделения зерновых смесей. Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Кіровоград: КНТУ. 2013. Вип. 1. С. 103 – 115.

30. **Бредихін В.В.** Перспективи розвитку машинних технологій та обладнання для розділення зернових матеріалів за густиною насіння. *The 9<sup>th</sup> international youth conference* (New York, 10 may), 2019. P. 14 – 20.

31. Тікунов С.Р., Сметанкіна Н.В., **Бредихін В.В.**, Мезенцев В.О. Рациональне проектування решіт сепараторів із замкненим перерізом отвору. *Dynamics, strength and modelling in mechanical engineering*: тези доповідей ІІ Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 05 – 08 жовтня 2020 р.). Харків, 2020. С. 283 – 284.

32. **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В., Тікунов С.Р. Перфоровані поверхні з отворами у формі овалу Кассіні. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: матеріали ХХІ Міжнародної науково-практичної конференції*. (Харків, 13 листопада 2020 р.). Харків: ХНТУСГ. 2020. С. 52-53.

33. Тікунов С.Р., **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В. Дослідження пропускнувості спроможності сепаруючих робочих поверхонь. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. (Харків, 25 – 26 листопада 2021 р.). Харків: ДБТУ, 2021. С. 76-77.

34. Тікунов С.Р., **Бредихін В.В.**, Сметанкіна Н.В. Класифікація робочих поверхонь з отворами у формі овалу Кассіні: *Digital transformations of modernity: multidisciplinary international scientific – practical conference*. (Coimbra, Portugal, 24 January 2022.). Portugal, 2022. P. 110-111.

35. **Bredykhin V.** Improving the quality of the seed production process. *Innovations and prospects in modern science*. (Stocholm, 13 – 15 March 2023 y.). Stocholm, 2023. P. 64 – 67.

36. **Бредихін В.В.**, Макаренко С.Р., Повассар Г.С. До процесу ошадливого розділення насінневого матеріалу для отримання насіння з підвищеним біологічним потенціалом. Підвищення ефективності процесу підготовки насінневого матеріалу зернових культур. *Технічний прогрес в*

*АПВ*: матеріали наук.-практ. конф. (Харків, 9 – 10 травня 2023 р.). Харків: ДБТУ, 2023. С. 21 – 23.

37. **Бредихін В.В.** До питання підвищення надійності процесу виробництва насіння. *Проблеми надійності та міцності машин і споруд*: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. (Харків, 11 – 12 травня 2023 р.). Харків, 2023. С. 7 – 9.

*Праці, які засвідчують апробацію роботи:*

38. Тищенко Л.Н., Пивень М.В., **Бредихін В.В.** Обоснование процесса сегрегации зерновых смесей при просеивании виброцентробежными решетками. *MOTROL. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*. 2013. Vol. 15. №7. Р. 104 – 111.

39. Харченко С.О., Ольшанський В.П., Харченко Ф.М., **Бредихін В.В.** Визначення динаміки зернової суміші гречки при її просіюванні через отвори плоских віброрешет. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2017. Т.47(1). С. 240 – 248.

40. Мезенцев В.А., **Бредихін В.В.**, Черняєв О.О., Ільїна Н.А., Кобизева Л.М., Безугла О.М. Вплив розмірних характеристик частинок на товщину насінневої оболонки нута. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. Харків, 2018. Вип. 194. С. 90 – 100.

## АНОТАЦІЯ

**Бредихін В.В.** Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Центральноукраїнський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Кропивницький, 2023.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему інтенсифікації та підвищення ефективності процесу розділення насінневого матеріалу за густиною насіння у псевдорозрідженому шарі.

Проведено аналіз техніко-технологічного виконання робочого процесу розділення насінневих матеріалів. Обґрунтовано забезпечення інтенсифікації та підвищення ефективності процесу розділення насінневих матеріалів за густиною насіння на робочих поверхнях пневмосепарувальних

столів та вібропневмоцентрифуг без збільшення площі робочої поверхні сепаруючої машини, при цьому технічні засоби задовольняють вимогам ефективного розділення насіннєвого матеріалу на фракції відповідної густини.

Виконані теоретичні дослідження процесу розділення насіннєвих матеріалів: пшениці, кукурудзи, соняшнику та сої за густиною насіння та розроблено відповідні механіко-математичні моделі розділення матеріалу. Розкрито фізичну сутність та вдосконалено модельні підходи що до динамічної взаємодії компонентів насіннєвого матеріалу з повітряним потоком та робочими органами сепаруючих машин. На основі проведених експериментальних досліджень проведено верифікацію розроблених теоретичних моделей та узгоджено технічне забезпечення розділення насіннєвих матеріалів пшениці, кукурудзи, соняшнику та сої з оптимальними конструктивними параметрами та кінематичними режимами сепаруючих машин. Обґрунтовано використання інтенсифікаторів хвилеподібного типу.

Розраховано техніко-економічну ефективність показників впровадження результатів досліджень у виробничі процеси підприємств переробної галузі.

Основні результати досліджень використовуються у навчальному процесі підготовки здобувачів вищої освіти Державного біотехнологічного університету (м. Харків) для підготовки фахівців на I, II та III рівнях вищої освіти за спеціальностями: «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування», «Агроінженерія».

Результати дослідження прийнято для модернізації і удосконалення ПСС-3,5 та розробки ПСС-10 шляхом впровадження інтенсифікаторів хвилеподібного типу впроваджено на ПрАТ ХМЗ (Хорольський механічний завод, м. Хорол). Результати досліджень використано підприємствами, що спеціалізуються на переробці зерна та науково-дослідними і проектними установами для розробки нових і модернізації існуючих машин, обладнання, технологічних ліній з підготовки насіння: на ПрАТ «Харківський комбікормовий завод» (м. Харків); ТОВ «Крок-Укрзалізбуд» (м. Київ); ТОВ «Ремавтокомплект-Сервіс» (м. Конотоп); ТОВ «Батьківщина» (Сумська обл., с. Карабутове); ФОП Знайдюк Василь Григорович (м. Чернігів); впроваджено у процес підготовки НМ для закладання в Національне сховище на довготривале зберігання «Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва» Національної академії аграрних наук України.

**Ключові слова:** насіннєвий матеріал, сепаруюча машина, пневмосортувальний стіл, вібропневмовідцентровий сепаратор,



вібропневматичне розділення, робоча поверхня, густина насіння, псевдорозріджений шар, псевдорідина, внутрішньосарові процеси, частинка.

#### ANNOTATION

***Bredykhin V.V. Scientific basis of processes of vibropneumatic separation of seed materials by seed density. – Qualifying scientific work on manuscript rights.***

The dissertation on competition for the scientific degree of doctor of technical sciences on the specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of agricultural production. Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

In the dissertation solves an important scientific and technical problem of intensification and increasing the efficiency of the process of separating seed material by seed density in a fluidized bed.

The analysis of the technical and technological performance of the work process of cleaning and separating seed materials was carried out. It is substantiated to ensure intensification and increase the efficiency of the process of separating seed materials by seed density on the working surfaces of pneumatic separation tables and vibro-pneumocentrifuges without increasing the area of the working surface of the separating machine, while the technical means meet the requirements for effective separation of seed material into fractions of the appropriate density.

Theoretical studies of the processes of separation and separation of seed materials: wheat, corn, sunflower and soybean by seed density have been carried out, and appropriate mechanical and mathematical models of material separation have been developed. The physical essence was revealed and model approaches to the dynamic interaction of the components of the seed material with the air flow and the working bodies of the separating machines were improved. Using the method of hydrodynamics of multiphase media, a theoretical modeling of the seed separation process was carried out, in which the seed material is modeled by a multiphase structure consisting of a discrete component (solid seed particles that differ in density) and a continuous component (air). From the point of view of mechanics and hydrodynamics, these components are considered as continuous media that interact with each other. On the basis of the conducted experimental studies, the adequacy of the developed theoretical models was confirmed and the technical support for the separation of seed materials of wheat, corn, sunflower and soybean with optimal design parameters and kinematic modes of the separating machines was agreed upon.

The maximum purity of the main fraction obtained by separating wheat material is achieved at an air flow speed in the range of 1.3...1.5 m/s. For corn, the rational speed of the air flow is 1.3...1.6 m/s, for sunflower and soybeans – 1.2...1.4 m/s. These values are valid under the condition of using appropriate rational values of the frequency and amplitude of oscillations of the working surface of the pneumatic sorting table and the longitudinal and transverse angles of its inclination during seed separation.

The rational design parameters of the wave-type intensifiers installed on the working surfaces of the pneumatic sorting table are substantiated. The technical and economic efficiency of the indicators of the implementation of research results into the production processes of enterprises in the processing industry has been calculated.

The technical and economic efficiency of the indicators of the implementation of research results into the production processes of enterprises in the processing industry has been calculated.

The main results of the research are given in the monographs: "Theory of grain separation", "Theoretical foundations of vibro-pneumocentrifugal separation of seed materials by seed density" and "Scientific foundations of thrifty preparation of seeds with improved biological potential", which are used in the educational process of students of higher education of the State Biotechnology University (Kharkiv city) for the training of specialists at the I, II and III levels of higher education in the specialties: "Industrial Mechanical Engineering", "Agroengineering".

The results of studies on the intensification of the process of preparing high-quality NM were used by grain processing, NM preparation enterprises and research and design institutions for the development of new and modernization of existing machines, equipment, technological lines for NM preparation: at PJSC "Kharkiv Compound Feed Plant"(Kharkov city); "Krok-Ukrzalizbud" LLC (Kyiv city); "Remavtokomplekt-Service" LLC (Konotop city); "Batkivshchyna" LLC (Karabutov village, Sumy region); IE Znaydyuk Vasyl Hryhorovych (Chernihiv city).

**Keywords:** seed material, separating machine, pneumatic sorting table, vibro-pneumocentrifugal separator, vibropneumatic separation, working surface, seed density, fluidized bed, fluid, intra-bed processes, particle.