

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Борщ Юрій Петрович**



УДК 631.362.36; 621.928.9

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ І РОЗРОБКА  
ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНОГО КАНАЛУ ЗЕРНОВИХ СЕПАРАТОРІВ

05.05.11 – Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Харченко Сергій Олександрович,**  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
доцент кафедри оптимізації технологічних  
систем імені Т.П. Євсюкова.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Котов Борис Іванович,**  
Подільський державний  
аграрно-технічний університет,  
професор кафедри машиновикористання в АПК;

кандидат технічних наук, доцент  
**Васильковський Олексій Михайлович,**  
Центральноукраїнський національний  
технічний університет,  
доцент кафедри сільськогосподарського  
машинобудування.

Захист відбудеться «22» травня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

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

Автореферат розісланий «19» квітня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Збільшення річного виробництва зернових культур до 64 млн. т та їх експорту до 42,5 млн. т на основі застарілої матеріально-технічної бази господарств та зернопереробних підприємств вимагає інтенсифікації технологічних процесів роботи зернових сепараторів. Пневмосепарувальні канали (ПСК) барабанних сепараторів типу КБС призначені для очищення зернових сумішей (ЗС) у повітряному потоці від легких домішок. Збільшення пропускної здатності сепараторів, за умов нормованої якості очищення та мінімізації пропусків ЗС, потребує підвищення продуктивності процесу їх пневмосепарації.

Проведеним аналізом досліджень вчених встановлено, що перспективним напрямком підвищення ефективності очищення ЗС від легких домішок є інтенсифікація попередньої підготовки суміші на розшарувальному пристрої ПСК. Використання розшарування ЗС перед вертикальним ПСК дозволяє підвищити питоме завантаження та збільшити якість очищення та продуктивність сепараторів. Обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС ПСК з розшарувальним пристроєм відсутнє та потребує проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС і розробка нової конструкції ПСК барабанних сепараторів є актуальним і перспективним завданням для розвитку агропромислового комплексу України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до НДР: що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологічнобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насінневих матеріалів» (ДР 0116 U 004624, 2016 – 2017 р.р.); комплексної державної цільової програми «Зерно України – 2008 – 2015»; державної цільової програми «Розвиток українського села до 2015 р.»; регіональних програм «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2020 року», «Найважливіші проблеми АПК на період до 2015 р.»; комплексної теми наукових досліджень з ПАТ «КМЗ» м. Карлівка «Підвищення ефективності роботи зернових сепараторів при розділенні насіння с. г. культур» (договір № 12/1 від 24.12.2012 р.); науково-дослідної роботи: «Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневмосепаруючого каналу зернових сепараторів» (ДР № 0115 U 002722, 2015 – 2016 рр.).

**Мета дослідження.** Метою роботи є підвищення продуктивності барабанних зернових сепараторів шляхом обґрунтування параметрів ПСК з розшарувальним пристроєм.

### **Завдання дослідження:**

- провести оцінку і аналіз існуючих підходів до підвищення ефективності процесів очищення ЗС;
- виконати моделювання руху полідисперсного середовища ЗС в ПСК, встановити закономірності швидкості переміщення компонентів ЗС з урахуванням їх властивостей та попереднього розшарування;
- обґрунтувати підхід і розробити метод оцінки залежностей складових швидкості ЗС від конструктивно-технологічних параметрів розробленого ПСК, що визначають ефективність розшарування та подальшого очищення ЗС;

– обґрунтувати критерії оптимізації процесу очищення ЗС, запропонувати цільову функцію та визначити раціональні конструктивні параметри розробленого ПСК барабаних зернових сепараторів;

– виконати оцінку впливу конструктивно-технологічних параметрів ПСК на траєкторії та поле швидкості ЗС в розробленому ПСК;

– провести ідентифікацію параметрів швидкості, пористості ЗС та розмірних характеристик їх компонентів, виконати оцінку адекватності та ефективності отриманих залежностей процесу очищення ЗС експериментальними дослідженнями і виробничою апробацією розробленого ПСК.

**Об'єкт дослідження:** процес очищення ЗС від легких домішок, його зв'язок з конструктивними параметрами ПСК.

**Предмет дослідження:** рух ЗС в робочих зонах розшарувального пристрою та вертикального каналу, їх інтенсифікація та обґрунтування параметрів розробленого ПСК.

**Методи дослідження:** теоретичні дослідження виконані із застосуванням основних положень механіки суцільних та гетерогенних середовищ, аеродинаміки. Розв'язок побудованих математичних моделей виконано з використанням методів розв'язання диференціальних рівнянь та обчислювальної техніки. Експериментальні дослідження проведені на виготовлених лабораторних установках з використанням відеозйомки та розробленого програмного забезпечення. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням положень теорії ймовірності та математичної статистики з використанням пакетів програм "Mathcad", "MatLab", "Excel". Для визначення оптимальних співвідношень конструктивно-технологічних параметрів розробленого ПСК застосована методика планування факторного експерименту. Виробнича апробація розробленого ПСК проведена у відповідності до діючих міжнародних і державних стандартів, методів натурних випробувань та імітаційного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів:** *Вперше:*

– визначено критерії ефективності процесу очищення ЗС в розробленому ПСК, що ґрунтуються на взаємодії фаз суцільних сипких середовищ за реологічними законами, які відрізняються від існуючих етапним моделюванням попереднього розшарування та основного очищення ЗС;

– встановлені закономірності руху компонентів ЗС, які враховують їх властивості, конструктивно-технологічні параметри розробленого ПСК за допомогою визначених рівнянь руху ЗС в робочих зонах розшарувального пристрою та вертикального каналу;

– комплексно обґрунтуванні параметри розробленого ПСК з розшарувальним пристроєм з врахуванням ефективності попереднього розшарування, технологічних показників і фізико-механічних властивостей домішок.

*Отримав подальший розвиток:* напрям моделювання руху ЗС з використанням коефіцієнту в'язкості, який відрізняється врахуванням властивостей легких домішок ЗС та параметрів повітропроникної лускатої поверхні розшарувального пристрою розробленого ПСК.

*Удосконалено:* методи визначення програмованої ефективності очищення ЗС у вертикальних ПСК сепараторів, які доповнені врахуванням попереднього розшарування ЗС.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами теоретичних та експериментальних досліджень комплексно обґрунтовані раціональні параметри ПСК з розшарувальним пристроєм, використання якого підвищує ефективність роботи зернових барабанних сепараторів. Новизна запропонованої конструкції ПСК та метод експериментальних досліджень підтверджені патентами.

Запропонована науково-обґрунтована нова конструкція ПСК зернових сепараторів, яка підвищує ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок на 30...40% (до 80...96%) і збільшує продуктивність зернових сепараторів типу КБС на 23,5...29%, порівняно з існуючими.

Розроблена нормативно-технічна документація нової конструкції ПСК на барабанні сепаратори типу КБС, виготовлено дослідні зразки, які успішно пройшли тривалу апробацію у виробничих умовах при очищенні ЗС пшениці, кукурудзи та соняшнику. Модернізовані сепаратори апробовано у виробничих умовах філії «Хлібна база №88» ДП «Полтавський КХП» (Полтавська обл.), ДП «Хлібна база №76» (Миколаївська обл.), АТ «Носівське ХПП» (Чернігівська обл.). Загальний щорічний економічний ефект склав 198,45 тис. грн.

З 2016 року ПАТ «Карлівський машинобудівний завод» (м. Карлівка) впровадив у серійне виробництво барабанних сепараторів типу КБС розроблений ПСК з економічним ефектом 600 тис. грн при їх щорічній програмі випуску в 20 штук.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [1 - 15]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [1 - 4, 6, 11], де наведено результати огляду і аналізу досліджень, визначено напрями підвищення ефективності очищення ЗС; [5, 10, 12], в яких наведено результати математичного моделювання руху ЗС та їх аналіз, обґрунтовані граничні умови; [7, 9, 13], де представлено методики і результати проведених експериментів, наведено рекомендації щодо подальшого застосування розробки.

Запропонована конструкція ПСК з розшарувальним пристроєм та метод експериментальних досліджень захищено патентами [14, 15]

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на міжнародних науково-практичних конференціях (МНПК): на МНПК «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробки і харчових виробництв» (ХНТУСГ, Харків, 1.11.2012 р.); на VII МНПК «Вібрації в техніці та технологія» (ХНТУСГ, Харків, 21.10.2013 р.); на МНПК «Технічний прогрес в АПК», «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин» (ХНТУСГ, Харків, 21.03.2013 р., 20.03.2014 р., 19.03.2015 р., 24.03.2016 р., 23.03.2017 р., 21.03.2019 р.); на XVII МНПК «Сучасні проблеми землеробської механіки» (СНАУ, Суми, 17.10.2016 р.); на НПК присвяченій 40-річчю СНАУ (СНАУ, Суми, 19.04.2017 р.); на XI МНПК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (КНТУ, м. Кіровоград, 1.11.2017 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових працях, у тому числі: 10 статтях у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 2 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз – [6, 9]); 2 публікаціях у закордонних виданнях; 3 тезах у збірках доповідей наукових конференцій; отримано 2 патенти.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків на 56 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 166 сторінок, містить 99 рисунків, 7 таблиць. Список використаних джерел нараховує 192 найменувань на 19 сторінках.

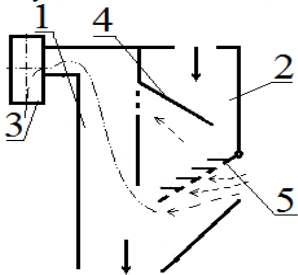
## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми та необхідність проведення досліджень, викладений зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У першому розділі наведено аналіз стану проблеми, огляд та оцінку сучасних досліджень, класифікацію перспективних способів і засобів підвищення ефективності процесу очищення ЗС в ПСК.

Подальше підвищення продуктивності зерноочисних машин стримане недостатньою ефективністю роботи їх ПСК при розділенні відмінних за властивостями ЗС сільськогосподарських культур, обмежене метало- та енерговитратами.

Дослідженнями взаємодій сипких середовищ з робочими органами сільськогосподарських машин, у том числі зернових сепараторів, інтенсифікацією їх технологічних процесів займалися В.П. Горячкін, П.М. Василенко, В.В. Адамчук, Г.Є. Листопад, П.М. Заїка, П.С. Берник, Б.І. Котов, В.С. Ловейкін, О.І. Завгородній, Л.М. Тіщенко, В.І. Мельник, В.М. Дринча, В.О. Шейченко, В.П. Ольшанський, М.В. Бакум, С.П. Степаненко, О.М. Васильковський, М.В. Сліпченко та інші.



1 – канал вертикальний; 2 – бункер завантажувальний; 3 – вентилятор; 4 – поверхня формувальна; 5 – поверхня повітропроникна; — — — рух ЗС; — — — рух повітряного потоку; — . . . — рух частинок домішок

Рисунок 1 – Схема розробленого ПСК з розшарувальним пристроєм

Разом з тим, моделі не розглядають ЗС, як гетерогенне середовище з неоднорідною структурою. Моделі руху таких середовищ в ПСК дозволяють отримувати достовірні результати, але виключають ефект взаємодії фаз за реологічними законами та не дають можливості врахувати вплив попереднього розшарування ЗС перед їх основним очищенням.

Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу очищення ЗС є його інтенсифікація шляхом попереднього розшарування ЗС за рахунок використання розробленої конструкції ПСК, конструктивна схема якої наведена на рис.1.

Для цього в ПСК встановлено розшарувальний пристрій, який складається з нахиленої лускатої повітропроникної поверхні. Частинки легких домішок під дією повітряного потоку та лусок розшарувального пристрою перерозподіляються до верхнього підшару ЗС. Отримана розшарована ЗС потрапляє до основного вертикального каналу, де відбувається заключний етап – основне очищення. Розшарувальний пристрій ПСК здійснює попередню підготовку ЗС, що дозволяє інтенсифікувати процес його очищення та збільшити продуктивність зернових сепараторів.

Таким чином, пропонується розв'язання науково-практичного завдання підвищення ефективності процесу очищення ЗС розробленим ПСК з розшарувальним пристроєм шляхом обґрунтування його параметрів.

У **другому розділі** представлені теоретичні дослідження, результатом яких стало визначення закономірностей змінювання коефіцієнтів розшарування та очищення, складових швидкостей повітряного потоку і частинок легких домішок в робочих зонах розробленого ПСК, обґрунтування його параметрів.

Моделювання динамічних процесів ЗС проведено ґрунтуючись на аналогії руху в'язких рідин і сипких псевдозріджених середовищ.

Для опису руху ЗС по нахиленій поверхні 5 (рис.1) ПСК використано рівняння руху суцільних середовищ з напруженнями, які в декартовій системі координат мають вигляд:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = \rho F_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = \rho F_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} ; \\ \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = \rho F_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

та рівняння нерозривності:  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0$ ,

де  $\sigma_{ij}$  – компоненти тензора напружень  $\sigma_{ij} = 2 \left[ \frac{\tau^{\frac{1}{k}}}{J^m} + \mu^{\frac{1}{m}} \right]^k J^{\frac{k-1}{m}} e_{ij}$ , де  $\sigma_{ij}$ ,  $e_{ij}$  –

тензор в'язких напружень і швидкостей деформацій, відповідно;  $\mu$  – зсувна в'язкість;  $\tau$  – границя плинності;  $k$ ,  $m$  – реологічні параметри;  $J$  – інтенсивність швидкостей деформацій;  $\rho$ ,  $u$  – щільність та швидкість середовища, відповідно;  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – проекції вектору зовнішніх об'ємних сил.

Модель узагальнює реологічні моделі нелінійних в'язкопластичних середовищ. При незначних швидкостях зсуву ЗС поводитья як ньютонівська рідина. При їх підвищеннях напруження зсуву пропорційні квадрату швидкості зсуву. Частинки ЗС, окрім поступальної швидкості руху в напрямку зсуву, отримують розподілену в просторі компоненту швидкості хаотичних переміщень, модуль якої має той же порядок, що й модуль відносної швидкості їх поступального переміщення.

Має місце реологічний закон:  $\mu \approx \mu_0 + \mu_\infty \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$ , де перший доданок враховує

в'язку частину тензора напруження, а другий – відхилення від нього.

Прийняті граничні умови: рівність нулю на вільній поверхні дотичних напружень і внутрішнього надлишкового тиску; на твердій поверхні ефект «ковзання» ( $u_x = \beta \frac{\partial u_x}{\partial y}$ , де  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує властивості ЗС і поверхні ковзання).

Для моделювання прийнята схема руху псевдозрідженого шару ЗС товщиною  $H$  по нахиленій поверхні (рис.2), яка продувається повітряним потоком та нахилена під кутом  $\theta$  до горизонту через луски висотою  $a$  та періодом розташування  $l$ .

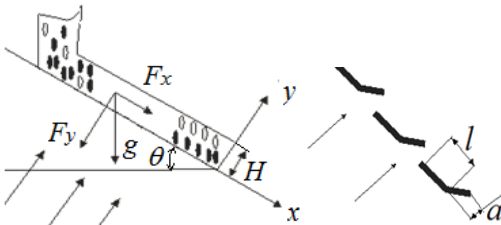


Рисунок 2 – Схеми руху псевдозрідженої ЗС по нахиленій повітропроникній поверхні ПСК

Рівняння руху ЗС в системі  $хоу$  з урахуванням припущень має вигляд:

$$\begin{cases} \rho F_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0 \\ \rho F_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $F_x = g \sin \theta$ ,  $F_y = g \cos \theta - \Delta p$  – проекції вектору зовнішніх об'ємних сил;  $\Delta p$  – перепад тиску на шарі ЗС;  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  – напруження, які представлено через проекції швидкості за допомогою співвідношень узагальненого закону Ньютона.

Прийняті граничні умови:  $\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0$ ,  $p = 0$  – на вільній поверхні шару ЗС при  $y=H$ ; на внутрішній поверхні шару ЗС в площині контакту з лускатою поверхнею виконана узагальнююча умова ковзання.

Розв'язок рівнянь проведено ітераційним методом бісекції, а інтегрування – методом трапецій або Сімпсона.

Рівняння профілю швидкості шару ЗС, що рухається по поверхні, має вигляд:

$$u_x(y) = u_0 - \frac{\mu_0}{2\mu_\infty} y + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\rho g \sin \theta}{\mu_\infty}} \times \left[ \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} - \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y) \right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (3)$$

де  $u_0 = \beta \frac{-\mu_0 + \sqrt{\mu_0^2 + 4\mu_\infty \rho g H \sin \theta}}{2\mu_\infty}$  – швидкість прозковзування ЗС по поверхні;

$\mu_0$  – в'язкість псевдозрідженого шару при малих швидкостях зсуву

При рівних швидкостях на поверхні шару, відхилення закону руху псевдозрідженої ЗС від ньютонівської рідини призводить до того, що в глибині швидкість руху шару виявляється дещо нижча. Це визначає процес поділу шару на основне зерно і легкі домішки під дією повітряного потоку при русі по нахиленій поверхні.



Встановлено, що у нижніх підшарах ЗС швидкість їх руху інтенсивно підвищується, але з наближенням до верхньої зони зростання швидкості сповільнюється. Це підтверджує обрану площину досліджень – розшарування ЗС в нижній зоні шару, де горизонтальні складові швидкості потоку відносно невеликі.

Для моделювання розшарування ЗС середовище розглянуте як полідисперсне сипуче, для якого псевдозрідження відбувається поступово в заданому інтервалі швидкостей. В таких шарах тиск зернистого матеріалу урівноважується силою гідравлічного опору шару, яка у момент початку псевдозрідження дорівнює:

$$\Delta p = (\rho - \rho_c)(1 - \varepsilon_0)h_0 g, \quad (4)$$

де  $\rho$ ,  $\rho_c$  – щільність твердих частинок ЗС і густина повітря, відповідно;  $\varepsilon_0 = (V_0 - V)V_0$  – пористість нерухомого шару,  $V_0$ ,  $V$  – об'єм нерухомого шару і частинок ЗС, відповідно;  $h_0$  – висота нерухомого шару.

У підсумку отримано діапазон швидкості псевдозрідження полідисперсної ЗС, що рухається по похилій повітропроникній поверхні (рис.3):

$$\frac{\rho_p d_p^2 g \cos \theta}{v_c 1400 + 5,22d \sqrt{\rho_c \rho_p d g \cos \theta}} \leq u_n \leq \frac{\rho_p d_p^2 g \cos \theta}{v_c 18 + 0,6d \sqrt{\rho_c \rho_p d g \cos \theta}}, \quad (5)$$

де права частина визначає швидкість витання частинок ЗС;  $v_c$  – кінематична в'язкість повітря;  $d_p$ ,  $\rho_p$  – усереднені еквівалентний діаметр і щільність частинок домішок ЗС:  $d_p = 1/(\sum (f_i / d_i))$ ,  $\rho_p = 1/(\sum (f_i / \rho_i))$ , де  $d_i$ ,  $\rho_i$  – еквівалентний діаметр та щільність частинок домішок  $i$ -ої фракції, відповідно;  $f_i$  – вагова доля фракції в ЗС.

В'язкість шару ЗС, відповідно до реологічної моделі, визначали за виразом:

$$\eta \approx \mu_0 - \gamma \frac{2\pi u (a/l)}{1 + 2\pi u (a/l)}, \quad (6)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує вплив лускатої поверхні на в'язкість шару ЗС;  $u$  – швидкість руху шару ЗС;  $l$ ,  $a$  – період розташування лусок та їх висота.

Швидкість «спливання» частинок домішок ЗС визначено з урахуванням рівняння Стокса-Ейнштейна:

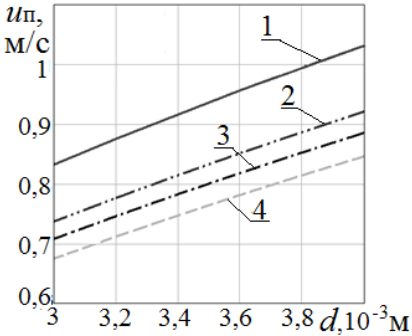
$$w = w_0 \frac{1 + k_f (1 - \varepsilon_0)}{1 + k_f (1 - \varepsilon)}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon = \left( \frac{18 \text{Re} + 0,36 \text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21}$  – пористості шару при  $u_n$  за (5);

$$w_0 = \frac{d_p^2 (\rho - \rho_p)}{18 \left( \mu_0 - \gamma \frac{\omega a^*}{1 + \omega a^*} \right)} g; \quad k_f - \text{емпіричний коефіцієнт форми частинок домішок};$$

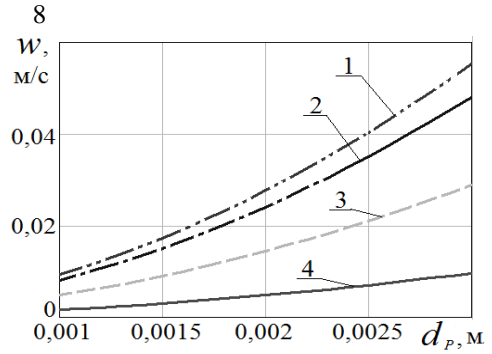
$\omega$ ,  $a^*$  – частота та амплітуда вібрацій шару ЗС на лускатій поверхні.

В результаті чисельного розрахунку отримані відповідні залежності (рис. 4) та встановлені діапазони варіювання швидкості спливання частинок домішок ЗС в залежності від їх розмірів, щільності та швидкості повітряного потоку.



1 -  $\theta=0^\circ$ ; 2 -  $\theta=35^\circ$ ; 3 -  $\theta=40^\circ$ ; 4 -  $\theta=45^\circ$ ;

Рисунок 3 – Залежності швидкості початку псевдозрідження ЗС від еквівалентного діаметра зерна, при кутах нахилу повітропроникної поверхні



1 -  $\rho_p=50 \text{ кг/м}^3$ ; 2 -  $\rho_p=200 \text{ кг/м}^3$ ;  
3 -  $\rho_p=600 \text{ кг/м}^3$ ; 4 -  $\rho_p=1000 \text{ кг/м}^3$ ;

Рисунок 4 – Залежності швидкості спливання частинок домішок ЗС на розшарувальному пристрої ПСК від їх щільності та розмірів ( $u=3 \text{ м/с}$ )

Для визначення ступеню розшарування ЗС складені рівняння їх руху на розшарувальному пристрої, які ураховують вирази Ланжевена, дії сил гравітації, Архімедової сили і сили в'язкого опору. Введено коефіцієнт ефективної дифузії, що враховує вплив на рух частинки ЗС зіткнень і флуктуацію повітряного потоку.

Використанням умов та припущень, інтегруванням отримані кінцеві рівняння траєкторій руху частинок домішок у шарі ЗС:

$$\begin{aligned}
 x - x_0 = & -tg\theta \cdot (y - y_0) - \frac{1}{w \cos \theta} \frac{\mu_0}{4\mu_\infty} (y^2 - y_0^2) + \\
 & + \frac{2}{3w} \sqrt{\frac{\rho g \cdot tg\theta}{\mu_\infty}} \left[ \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} y + \frac{2}{5} \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y) \right)^{\frac{5}{2}} \right] - \\
 & - \frac{2}{3w} \sqrt{\frac{\rho g \cdot tg\theta}{\mu_\infty}} \left[ \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + H \right)^{\frac{3}{2}} y_0 + \frac{2}{5} \left( \frac{\mu_0^2}{4\mu_\infty \rho g \sin \theta} + (H - y_0) \right)^{\frac{5}{2}} \right] + \\
 & + \frac{\beta}{w \cos \theta} \cdot \frac{-\mu_0 + \sqrt{\mu_0^2 + 4\mu_\infty \rho g H \sin \theta}}{2\mu_\infty} (y - y_0).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Перетворенням (8), використанням чисельних методів, в тому числі методу ітерацій, отриманий вираз товщини нижнього підшару ЗС без частинок домішок:

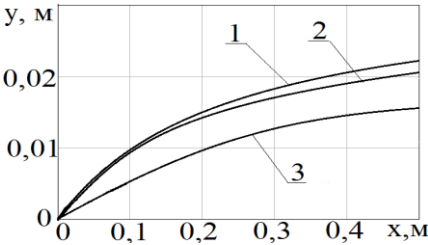
$$h \approx \frac{w \cos \theta}{\bar{u} - w \sin \theta} L, \quad (9)$$

де  $\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(y) dy \approx \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \left[ \beta + \frac{2}{5} H \right]$  – середня за перетином швидкість руху шару ЗС;  $L$  – довжина поверхні розшарувального пристрою.

Коефіцієнт ефективності розшарувального пристрою ПСК визначає товщину звільненого від частинок домішок підшару ЗС до загальної товщини шару ЗС:

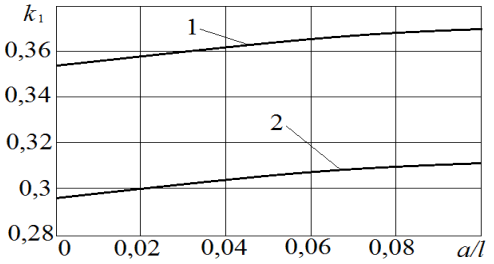
$$k_1 \approx \min \left( w \cos \theta / \left( H(u_x)_{cp} \left( 1 - \frac{w}{(u_x)_{cp}} \sin \theta \right) \right) L, 1 \right). \quad (10)$$

Результати моделювання отримані у вигляді траєкторій руху частинок ЗС по повітропроникній поверхні (рис.5), залежностей коефіцієнту розшарування від конструктивно-технологічних параметрів ПСК, властивостей ЗС (рис.6).



1 –  $\rho_p=100 \text{ кг/м}^3$ ; 2 –  $\rho_p=200 \text{ кг/м}^3$ ;  
3 –  $\rho=600 \text{ кг/м}^3$

Рисунок 5 – Траєкторії руху частинок домішок ЗС по лускатій поверхні розробленого ПСК ( $u=3 \text{ м/с}$ ,  $d_p=0,002 \text{ м}$ )

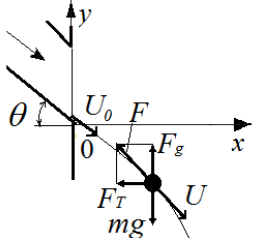


1 –  $u=3 \text{ м/с}$ ; 2 –  $u=1 \text{ м/с}$

Рисунок 6 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС від коефіцієнту лускатості поверхні розробленого ПСК ( $H=0,05 \text{ м}$ )

Аналізом залежностей встановлено, що збільшення швидкості продування повітряним потоком лускатої поверхні розробленого ПСК в діапазоні 1...3 м/с підвищує коефіцієнт розшарування на 20...25%. Зменшення щільності частинок домішок, в діапазоні що досліджується, також підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 25...35%. Зменшення висоти шару в діапазоні що досліджується, також інтенсифікує розшарування ЗС та збільшує коефіцієнт її розшарування на 30...35%.

Для виконання наступного етапу моделювання проведено обґрунтування параметрів процесу очищення попередньо-розшарованої ЗС у вертикальному ПСК. На частинки ЗС у ПСК (рис.7) діють сила тяжіння і протилежно спрямована сила від дії повітряного потоку, співвідношення яких визначає траєкторію їх руху. Використано систему рівнянь руху частинки ЗС в ПСК:



$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F \sin \gamma \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg + F \cos \gamma \end{cases}, \quad (11)$$

де  $m$  – вага частинки ЗС;  $F=\zeta d^2 \rho_c U^2/2$  – сила, що діє від повітряного потоку;  $\zeta=0,4...0,5$  – емпіричний коефіцієнт;  $U$  – швидкість частинки у ПСК;  $\gamma$  – кут між напрямком  $F$  та вертикальною віссю.

→ – рух попередньо-розшарованої ЗС;  
→ – рух повітряного потоку  
Рисунок 7 – Схема вертикального ПСК

Результатом моделювання є рівняння

для траєкторії руху частинок домішок ЗС у вертикальному каналі, у вигляді координат їх виходу з шару ЗС:

$$x_v = \frac{H - y_0}{W} \tilde{u} \cos \theta, y_v = U \left( \frac{-mg + Fk_p}{Fk_p} \right) \left\{ -\frac{mU}{Fk_p} \ln \left( 1 - \left( \frac{H - y_0}{W} \right) \frac{Fk_p}{mU} \right) - \frac{H - y_0}{W} \right\} - \sin \theta \cdot \frac{H - y_0}{W} \tilde{u} + H, \quad (12)$$

де  $W = \sqrt{\frac{\rho_z U^2 - (\pi d_p \rho_p g / 3\zeta)}{\rho_0 (1 - \varepsilon)}}$  – швидкість підйому частинок домішок в потоці ЗС;

$$\rho_o - \text{насіпна щільність зерна; } \tilde{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u(y) dy \approx \sqrt{\frac{\rho g H \sin \theta}{\mu_\infty}} \left[ \beta + \frac{2}{5} H \right] - \text{середня}$$

за перетином каналу швидкість;  $k_p$  – коефіцієнт що урахує  $U_e = k_p U$ , де  $U_e$  – відносна швидкість частинок ЗС.

Частина домішок рахується вловленою при умові її виходу з шару ЗС до того, як вона досягне протилежного краю вертикального ПСК.

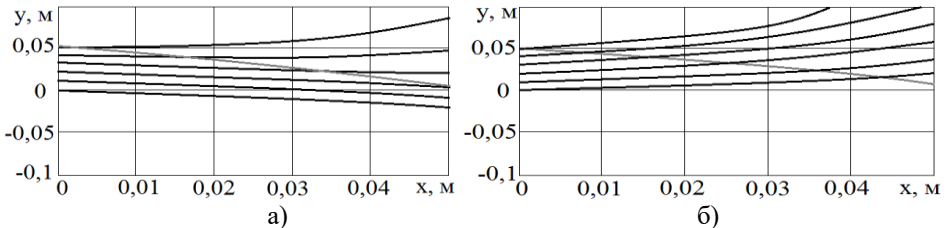
Ступінь очищення ЗС в вертикальному ПСК визначена коефіцієнтом очищення:

$$k_2 = \min \left( k_1 + \frac{(W / (u_{cp} \cos \theta)) M}{H}, 1 \right). \quad (13)$$

де  $M$  – ширина каналу.

Результатом математичного моделювання стало отримання траєкторій частинок домішок у вертикальному ПСК за різних параметрів (рис.8). Також вперше встановлені залежності ефективності очищення ЗС розробленим ПСК від властивостей частинок домішок та значень коефіцієнтів розшарування (рис.9, 10).

Встановлений діапазон коефіцієнту розшарування ЗС пшениці склав 0,14...0,37. Максимальне розшарування ЗС ( $k_1=0,31...0,37$ ) спостерігається зі збільшенням діаметру частинок домішок у діапазоні  $d_p=0,0017...0,002$ м і зменшенні їх щільності у межах  $\rho_0=200...500$  кг/м<sup>3</sup>. Збільшення розшарування, у межах встановленого діапазону, підвищує ефективність очищення розробленого ПСК на 18,3...47%. Також встановлено, що збільшення щільності частинок домішок ЗС зменшує коефіцієнт ефективності розробленого ПСК на 18...44%, а збільшення розмірів, навпаки, підвищує на 4...16%.



а –  $d_p=0,003$ м;  $\rho_p=750$  кг/м<sup>3</sup>;  $u=6$  м/с; б –  $d_p=0,0038$ м;  $\rho_p=350$  кг/м<sup>3</sup>;  $u=5$  м/с;

— — — — — верхня границя шару ЗС; ————— — траєкторії домішок ЗС ( $H=0,05$  м)

Рисунок 8 – Траєкторії частинок домішок у вертикальному ПСК

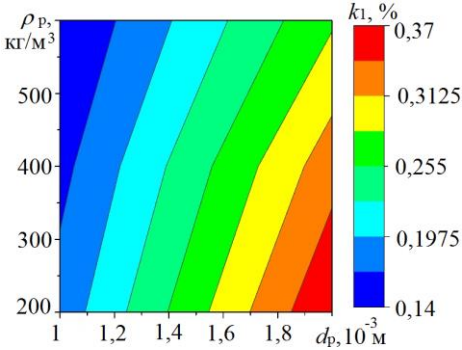


Рисунок 9 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС розшарувальним пристроєм ПСК від діаметру частинок домішок

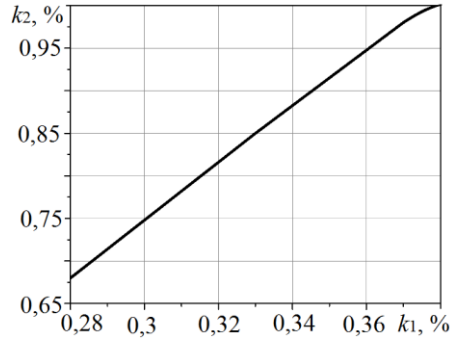
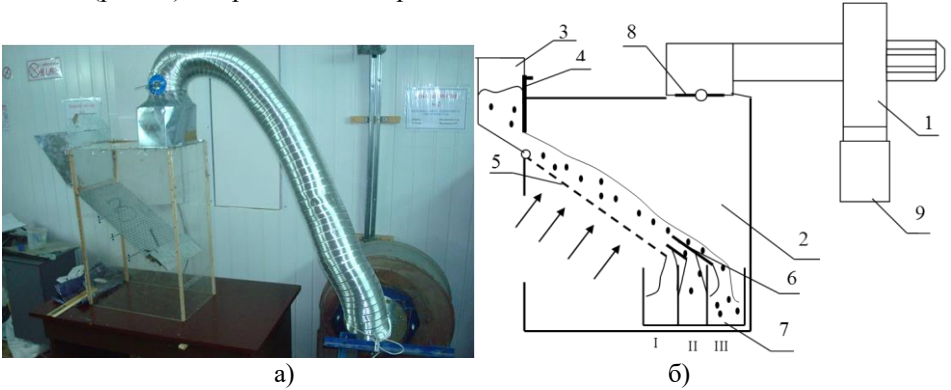


Рисунок 10 – Залежності коефіцієнту очищення ЗС пшениці вертикальним ПСК від коефіцієнту розшарування

За результатами математичного моделювання також визначено коефіцієнт очищення розробленого ПСК, який для зазначених ЗС склав 0,68...1.

У **третьому розділі** наведено характеристику об'єкту, програму та методику проведення експериментальних досліджень.

Для дослідження руху ЗС при її розшаруванні та очищенні розроблена лабораторна установка з прозорими боковими стінками з оргскла та відповідним устаткуванням (рис. 11), запропоновані та реалізовані методи досліджень.



а – загальний вигляд; б – конструктивна схема;

1 – вентилятор; 2 – канал основний; 3 – бункер; 4 – заслінка; 5 – поверхня повітропроникна; 6 – розшарувач; 7 – блок приймачів; 8 – регулятор; 9 – фільтр

Рисунок 11 – Лабораторна установка

Експериментальні дослідження ПСК проведені на ЗС пшениці, соняшнику, кукурудзи природного гранулометричного складу. Якість процесу очищення ЗС визначали розробленими та базовими методами, які рекомендовані ДСТУ.

Визначення складових швидкостей повітряного потоку виконано з застосуванням термоанемометру Testo 416, трубки Піто з мікроманометром.

Визначення складових швидкості компонентів ЗС проведено на лабораторній установці за допомогою відеозйомки та подальшої обробки графічних зображень.

Для визначення пористості шару ЗС, що є значущим параметром процесу її очищення, запропоновано і реалізовано методику яка дозволила встановити відповідні закономірності. Ідентифікація розмірів компонентів ЗС проведена за розробленим методом з використанням устаткування та комп'ютерної програми.

Для оптимізації параметрів процесу очищення ЗС використано багатофакторний експеримент відповідно плану Бокса-Бенкіна для розробленого ПСК за критеріями оптимізації – коефіцієнтами розшарування та очищення.

**У четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень процесу очищення ЗС, виконано оцінку їх збіжності з теоретичними даними, підтверджено адекватність одержаних математичних моделей.

Експериментальними дослідженнями встановлені залежності коефіцієнтів розшарування ЗС та її очищення вертикальним ПСК від технологічних параметрів: завантаження та швидкості повітряного потоку.

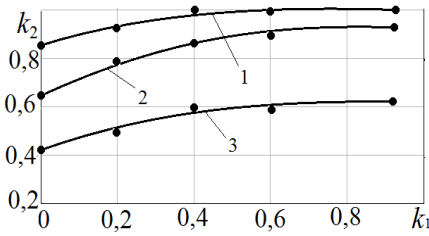
Аналізом отриманих результатів встановлено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 9,3...21%. Діапазони варіювання отриманих коефіцієнтів розшарування склали для ЗС: пшениці  $k_1=0,23...0,9$ ; сояшнику  $k_1=0,12...0,22$ ; кукурудзи  $k_1=0,24...0,48$ . Також встановлено, що ефективність розробленого вертикального ПСК при очищенні розшарованої ЗС підвищується на 3...42%, порівняно з базовою конструкцією. Це підтверджує інтенсифікацію процесу очищення ЗС у вертикальному ПСК за рахунок їх попереднього розшарування.

Отримані експериментальні залежності коефіцієнту очищення вертикального ПСК від коефіцієнту розшарування ЗС (рис.12). Встановлено, що збільшення розшарування ЗС, у визначених раніше діапазонах, підвищує ефективність роботи розробленого ПСК при очищенні ЗС: пшениці на 15...32%; сояшнику на 8...33%; кукурудзи на 20...28,5 %, порівняно з нерозшарованою сумішшю (при  $k_1=0$ ).

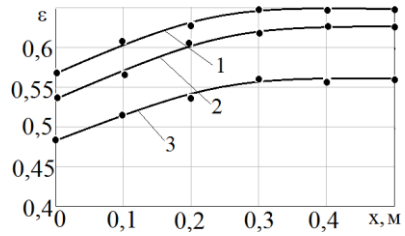
Визначені діапазони швидкості псевдозрідження ЗС на розробленому ПСК: кукурудзи – 2,5...3,5 м/с; пшениці – 2...3 м/с; сояшника – 0,6...2 м/с. Узагальнені раціональні параметри псевдозрідження ЗС склали: швидкість початку псевдозрідження 2,8...3,5 м/с; кут нахилу повітропроникної поверхні –  $\theta=40...45^\circ$ . Розбіжність результатів теоретичних досліджень та експериментальних не перевищує 3,5 %, що підтверджує адекватність розробленого математичного моделювання.

Параметри руху та пористості ЗС експериментально досліджено за використанням відозйомки та подальшою обробкою фотографічних зображень (рис.13). Збільшення розмірів та зменшення щільності частинок легких домішок підвищують швидкість їх спливання в шарі ЗС в 2,8...5,6 разів та на 9...20%, відповідно. Це пояснюється активізацією їх перерозподілу в шарі ЗС під дією повітряного потоку.

Збільшення швидкості повітряного потоку до 3 м/с на повітропроникній поверхні ПСК підвищує швидкість спливання частинок домішок на 62,5...77 %, пористість – на 12,2...17 %. Діапазон варіювання швидкості повітряного потоку, з урахуванням швидкості початку псевдозрідження та швидкості витання компонентів ЗС, мінімізації енергетичних витрат, склав 2...3 м/с.



1 –  $u=7,25$  м/с; 2 –  $u=6$  м/с; 3 –  $u=4,75$  м/с;  
Рисунок 12 – Залежності коефіцієнту очищення ЗС пшениці ПСК від коефіцієнту розшарування ( $H=0,05$  м;  $a/l=0,08$ ;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)

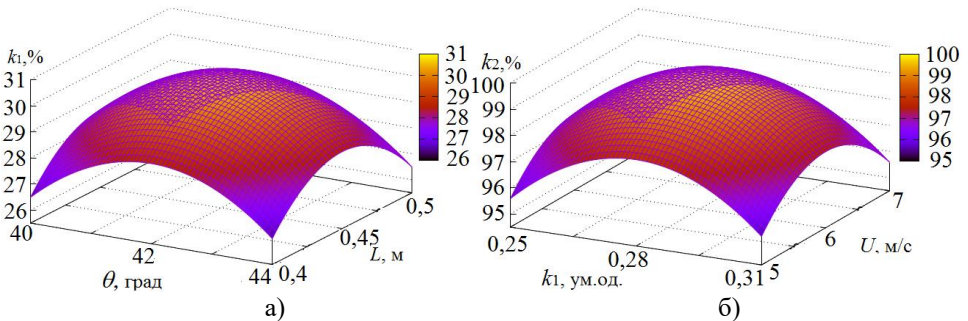


1 – сояшник; 2 – кукурудза; 3 – пшениця;  
Рисунок 13 – Залежності пористості ЗС по довжині повітропроникної лускатої поверхні розробленого ПСК ( $H=0,05$  м;  $a/l=0,08$ ;  $\theta=45^\circ$ ;  $u=3$  м/с)

Збіжність траєкторій ЗС на розшарувальному пристрої ПСК отриманих експериментально та теоретично складає до 3%, що підтверджує адекватність розробленого моделювання.

Досліджено та встановлено рекомендовані діапазони варіювання пористості ЗС: для пшениці 0,48...0,56; для кукурудзи 0,54...0,63; для сояшнику 0,57...0,65, що є значущим параметром процесу їх очищення. Також встановлено діапазон довжини повітропроникної поверхні, при якому підвищується пористість ЗС та забезпечується її стає розшарування, який складає 0,4...0,5 м. Це обумовлено перерозподілом частинок ЗС в шарі під дією повітряного потоку та лусок.

В результаті дослідження на екстремум рівняння регресії, що описують поверхні відгуку – коефіцієнти розшарування та очищення, встановлені раціональні значення найбільш значущих факторів (рис.14): кут нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=41...43^\circ$ ; довжина повітропроникної поверхні  $L=0,43...0,47$  м; швидкість повітряного потоку  $u=2,3...2,7$  м/с; швидкість повітряного потоку у вертикальному каналі  $U=6,1...6,7$  м/с; ширина вертикального каналу  $B=0,21...0,3$  м.



а – коефіцієнту розшарування ЗС від кута нахилу лускатої поверхні та її довжини;  
б – коефіцієнту очищення ЗС від коефіцієнту її розшарування та швидкості повітряного потоку у вертикальному каналі;

Рисунок 14 – Залежності ефективності процесу очищення ЗС розробленого ПСК

Отримані рівняння регресії процесу очищення ЗС в розробленому ПСК у розкодованому вигляді, для:

$$\text{а) коефіцієнту розшарування } k_1 = -1009,7 + 40,842 \theta + 676,654 L + 28,797 u + 1,25 \theta L + 0,3167 \theta u - 3,668 L u - 0,503 \theta^2 - 812,76 L^2 - 8,32 u^2,$$

$$\text{б) коефіцієнту очищення } k_2 = -313,14 + 1450,587 k_1 + 38,139 U + 445,513 B - 8,61 k_1 U - 841,67 k_1 B - 8,33 U B - 2071 k_1^2 - 2,16 U^2 - 195,35 B^2.$$

Встановлено, що за вказаними параметрами коефіцієнт розшарування ЗС пшениці складає  $k_1=30,53\dots31,75\%$ , а ефективність її очищення розробленим ПСК  $k_2=92,15\dots99,29\%$ .

Експериментальною апробацією підтверджено адекватність математичних моделей руху ЗС в розробленому ПСК з підвищенням ефективності процесу очищення (за критерієм Фішера з 95% ймовірністю).

У **п'ятому розділі** представлені результати виробничих випробувань розробленого ПСК, які проведені протягом 2016 – 2017 років на модернізованих барабанних сепараторах КБС на філії «Хлібна база №88» ДП «Полтавський КХП» (Полтавська обл.), на ДП «Хлібна база №76» (Миколаївська обл.), на АТ «Носівське ХПП» (Чернігівська обл.). Загальний об'єм очищеного зерна за період випробувань склав: 2,77 тис. т. – пшениці, 53 тис. т. – кукурудзи, 15 тис. т. – сояшнику.

Модернізація передбачала заміну базового ПСК на розроблений з розшарувальним пристроєм за отриманими науково-обґрунтованими параметрами. Встановлено, що ефективність очищення ЗС на модернізованих сепараторах КБС-1270.4.00 збільшилась на 30...40% і складає 80...96%. При цьому, продуктивність сепаратора збільшилась: при очищенні пшениці на 23,5...25% до 100...105 т/год; сояшнику на 26...26,6% до 35...38 т/год; кукурудзи на 27...29% до 46...49 т/год.

Визначено, що інтенсифікація процесу очищення ЗС, за рахунок використання розробленого ПСК, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 13 % та 25 %, відповідно.

Загальний річний економічний ефект від використання модернізованих сепараторів КБС-1270.4.00 на зернопереробних підприємствах за рахунок зменшення експлуатаційних витрат на ДП «Хлібна база №76» Миколаївської області; на філії «Хлібна база №88» ДП «Полтавський КХП» Полтавської області; на АТ «Носівське ХПП» Чернігівської області склав 198,45 тис. грн.

На підставі проведених виробничих випробувань розроблений ПСК впроваджений з 2016 р. в серійне виробництво барабанних сепараторів ПАТ «КМЗ» з річним економічним ефектом 600 тис. грн при програмі випуску сепараторів 20 штук.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і вирішення наукового завдання інтенсифікації процесу очищення ЗС, яке ґрунтується на моделюванні руху двофазного попередньо-розшарованого сипкого середовища та дозволяє визначати закономірності, розробити математичні вирази і методи оптимізації технологічних показників роботи ПСК барабанних зернових сепараторів, створити та обґрунтувати параметри ПСК з розшарувальним пристроєм, впровадити їх у серійне виробництво.

Основні наукові й прикладні результати досліджень:



1. На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень щодо збільшення продуктивності барабанних сепараторів встановлено, що існуючі ПСК не задовольняють зростаючі вимоги виробництва та мають занижені показники їх питомого завантаження. Для цього запропоновано використати розроблений ПСК з розшарувальним пристроєм, що має нахилену повітропроникну лускату поверхню. Моделювання руху ЗС в робочих зонах розробленого ПСК ґрунтується на взаємодії фаз суцільних середовищ за реологічними законами з урахуванням попереднього розшарування ЗС. Розробка теоретичних та експериментальних методів, обґрунтування параметрів розробленого ПСК дозволить інтенсифікувати процес очищення ЗС та підвищити продуктивність барабанних сепараторів.

2. Побудовані рівняння руху двофазного полідисперсного середовища, за допомогою яких встановлені закономірності швидкості руху частинок ЗС та коефіцієнту їх розшарування на лускатій повітропроникній поверхні. Обґрунтовані умови та параметри псевдозрідження ЗС, які визначають ефективність їх розшарування на пристрої ПСК. Встановлено, що збільшення швидкості продування ЗС повітряним потоком на лускатій поверхні розробленого ПСК, зменшення щільності частинок ЗС та висоти її шару, в діапазонах що досліджуються, підвищують коефіцієнти розшарування на 20...35%.

3. Для розрахунку і керування продуктивністю процесу очищення ЗС побудовані математичні моделі: руху псевдозрідженої ЗС по повітропроникній лускатій поверхні; руху попередньо-розшарованої ЗС у вертикальному ПСК барабанних зернових сепараторів. Розв'язками моделей отримані закономірності зміни коефіцієнтів розшарування та очищення ЗС, траєкторії руху частинок домішок. Визначено, що використання попереднього розшарування ЗС культур що досліджувались, підвищує коефіцієнти їх очищення в розробленому ПСК на 18,3...47% до 0,68...1, порівняно з базовою конструкцією. Також встановлено, що варіювання щільності та розмірів частинок домішок ЗС призводить до зміни коефіцієнтів їх очищення розробленим ПСК на 4...44%.

4. Запропонований метод визначення швидкості та траєкторій компонентів ЗС в робочих зонах розробленого ПСК, який ґрунтується на відеозйомці руху частинок ЗС з застосуванням трубки Піто, мікроманометра і анемометра Testo 416. За встановленими залежностями швидкості «спливання» та траєкторіями частинок домішок експериментально підтверджено їх перерозподіл до верхніх підшарів ЗС під дією повітряного потоку та лусок, який забезпечує розшарування. За умови псевдозрідження ЗС та її максимального розшарування рекомендовані діапазони варіювання параметрів розробленого ПСК: довжини повітропроникної поверхні 0,4...0,5 м; швидкості повітряного потоку 2,5...3,5 м/с; кута нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=40...45^\circ$ . Розбіжність результатів теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує 3,5%, що підтверджує адекватність розроблених наукових положень.

5. Запропонованими методами з розробленим програмним забезпеченням експериментально ідентифіковані діапазони варіювання значущих параметрів процесу очищення ЗС: пористості та розмірів частинок компонентів зернових сумішей.

За розробленим методом визначені діапазони варіювання пористості ЗС, які досліджувались: пшениці 0,48...0,56; кукурудзи 0,54...0,63; соняшнику 0,57...0,65. Використання розшарувального пристрою ПСК призводить до збільшення пористості ЗС на 12,2...17%, що підтверджує можливості інтенсифікації процесу їх очищення.

6. Встановлені залежності ефективності процесу очищення ЗС за умови їх попереднього розшарування на розробленому ПСК. Визначено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 9,3...21 %. Встановлені діапазони варіювання коефіцієнтів розшарування для ЗС: пшениці  $k_1=0,23...0,9$ ; соняшнику  $k_1=0,12...0,22$ ; кукурудзи  $k_1=0,24...0,48$ . Підвищення продуктивності розробленого ПСК при очищенні попередньо розшарованих ЗС склало 3...42%, порівняно з базовою конструкцією.

7. В результаті проведення багатофакторного експерименту процесу очищення ЗС рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів розробленого ПСК: кут нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=41...43^\circ$ ; довжина повітропроникної поверхні  $L=0,43...0,47$  м; швидкість повітряного потоку  $u=2,3...2,7$  м/с; швидкість повітряного потоку у вертикальному каналі  $U=6,1...6,7$  м/с; ширина вертикального каналу  $B=0,21...0,3$  м. Встановлено, що за визначеними параметрами коефіцієнт розшарування ЗС пшениці складає  $k_1=30,53...31,75\%$ , а коефіцієнт її очищення розробленим ПСК –  $k_2=92,15...99,29\%$ .

8. За результатами досліджень розроблено нормативно-технічну документацію на ПСК, яка впроваджена та використовується в серійному виробництві на ПАТ «КМЗ». Виробничими випробуваннями розробленого ПСК встановлено, що ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок підвищується на 30...40% до 80...96 %, що забезпечує збільшення продуктивності барабанних сепараторів КБС 1270.4.00 на 23,5...29 %. Визначено, що інтенсифікація процесу очищення ЗС, за рахунок використання розробленого ПСК, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на 13 % та 25 %, відповідно.

Загальний щорічний економічний ефект від застосування модернізованого сепаратора КБС 1270.4.00 у виробничих умовах філії «Хлібна база №88» ДП «Полтавський ХХП» (Полтавська обл.), ДП «Хлібна база №76» (Миколаївська обл.), АТ «Носівське ХПП» (Чернігівська обл.) склав 198,45 тис. грн.

Розроблений ПСК впроваджений в серійне виробництво барабанних сепараторів типу «КБС» на ПАТ «КМЗ» (м. Карлівка) з річним економічним ефектом 600 тис.грн при програмі випуску 20 штук.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Способ повышения эффективности пневмосепарирования зерновых смесей в пневмосепарирующих устройствах / Л.Н. Тищенко, С.А. Харченко, Ю.П. Борщ, М.М. Абдуев. *Механізація сільськогосподарського виробництва*: Вісник ХНТУСГ. 2014. Вип.148. С.150 – 159.

2. Харченко С.А., Борщ Ю.П. Математическая модель расслоения псевдооживленной зерновой смеси на воздухопроницаемой скатной плоскости типа “чешуйчатое” решето. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2014. Вип.14. Т.2. С.86 – 91.

3. Харченко С.А., Борщ Ю.П. К моделированию динамики расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. №1 (73). С.40 – 43.

4. Борщ Ю.П. Моделирование динамики расслоенной зерновой смеси в вертикальном канале пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2014. Вип.152. С. 128 – 135.

5. Тищенко Л.М., Харченко С.О., Борщ Ю.П. Моделирование динамики зерновых смесей по скатым воздухопроницаемым поверхностям пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов. *Інженерія природокористування*. Харків, 2014. № 2(2). С. 61 – 69.

6. Харченко С.О., Борщ Ю.П. К моделированию процесса расслоения псевдооживленной зерновой смеси на воздухопроницаемой скатной плоскости типа “чешуйчатое” решето. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Poland: Lublin-Kharkiv, 2014. Vol.16, №7. С.17 – 23.

7. Харченко С.О., Борщ Ю.П., Сліпченко М.В. Експериментальні дослідження повітропроникної розшаруючої поверхні розробленого пневмосепаруючого пристрою зернових сепараторів. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 156. С.196 – 203.

8. Експериментальне визначення параметрів зернової суміші при псевдооживленні на повітропроникних поверхнях пневмосепаруючих пристроїв / Ю.П. Борщ, та ін. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 157. С.192 – 197.

9. Борщ Ю.П., Щур Т.Г. Экспериментальное определение параметров псевдооживления зерновых смесей. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Poland: Lublin-Kharkiv, 2016. Vol.18, №7. С.61 – 67.

10. Харченко С.О., Борщ Ю.П., Абдуев М.М. Ефективність розшарування зернових сумішей при їх очищенні в пневмосепарувальних каналах зернових сепараторів. Загальнодержавний міжвідомчий збірник: *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. Вип.47, Ч.1. С. 253-260.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Харченко С.А., Борщ Ю.П. Моделирование динамики псевдооживленной зерновой смеси по наклонной чешуйчатой поверхности пневмосепарирующих устройств. *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: Вестник БГАТУ*, 2014. Секция 2. С. 239 – 251.

12. Борщ Ю.П. Теорія пневмосепарації зернових сумішей з його попереднім розшаруванням. *Розумна агротехніка для ефективного землеробства: матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції-форуму*. Харків: ХНТУСГ, 2016. С. 52 – 55.

13. Борщ Ю.П. Експериментальна ідентифікація динаміки зернових сумішей у робочій зоні розробленого пневмосепаруючого каналу. *Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів (присвяченій 40-річчю Сумського НАУ)*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми, 2017. С.62.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. Пневмосепаратор: пат. 101068 У Україна: МПК В07В 4/00. № у 2015 01888; заявл. 03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

15. Спосіб визначення розмірів насіння: пат. 101069 У Україна: МПК G01B 11/00, G01B 11/02. № у 2015 01890; заявл.03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

### АНОТАЦІЯ

**Борщ Ю.П.** Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневмосепарувального каналу зернових сепараторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

У дисертації вирішене наукове завдання, яке направлено на підвищення ефективності процесу очищення зернових сумішей шляхом попереднього їх розшарування пристроєм пневмосепарувальних каналів барабанних зернових сепараторів. Запропоновано напрям інтенсифікації процесів очищення зернових сумішей, який ґрунтується на взаємодії фаз суцільних середовищ за реологічними законами з урахуванням їх попереднього розшарування розробленим пневмосепарувальним каналом. Розроблено математичні моделі динаміки розшарування зернових сумішей на повітропроникній лускатій поверхні та очищення у вертикальному каналі, в яких враховано вплив конструктивно-технологічних параметрів розробленого пневмосепарувального каналу, властивостей зернових сумішей. Розроблений пневмосепарувальний канал пройшов виробничу апробацію та впроваджений в серійне виробництво зернових барабанних сепараторів. Ефективність очищення зернових сумішей розробленим пневмосепарувальним каналом збільшена на 30...40%, що дозволило підвищити продуктивність зернових сепараторів на 23,5...29 %.

**Ключові слова:** процеси очищення, пневмосепарувальний канал, зернові суміші, легкі домішки, продуктивність, ефективність.

### АННОТАЦИЯ

**Борщ Ю.П.** Обоснование параметров процесса и разработка пневмосепарирующего канала зерновых сепараторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019.

В диссертации решено научное задание, которое направлено на повышение эффективности процесса очистки зерновых смесей путем предварительного их расслоения устройством пневмосепарирующих каналов барабанных зерновых сепараторов. Предложено направление интенсификации процессов очистки зерновых смесей, которое основывается на взаимодействии фаз сплошных сред по реологическим законам с учетом их предварительного расслоения разработанным пневмосепарирующим каналом. Разработаны математические модели динамики расслоения зерновых смесей на воздухопроницаемой чешуйчатой поверхности и очистки в

вертикальном канале, в которых учтено влияние конструктивно-технологических параметров разработанного пневмосепарирующего канала, свойств зерновых смесей. Разработанный пневмосепарирующий канал прошел производственную апробацию и внедрен в серийное производство зерновых барабанных сепараторов. Эффективность очистки зерновых смесей разработанным пневмосепарирующим каналом повышена на 30...40%, что позволило увеличить производительность зерновых сепараторов на 23,5...29 %.

**Ключевые слова:** процессы очистки, пневмосепарирующий канал, зерновые смеси, легкие примеси, производительность, эффективность.

### ABSTRACT

**Borshch Y.P.** Substantiation of process parameters and development of pneumatic separating channel of grain separators. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.11 – Machines and means of mechanization of agricultural production. – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

In the thesis decided the scientific task, which is aimed at improving the efficiency of process of grain mixtures cleaning by pre-stratification on the pneumatic separating channels of drum grain separators. For this purpose in the pneumatic separating channel before the basic vertical channel device, representing the permeable scaly surface is established. Particles of light impurities under influence of delamiring device are redistributed in the grain mixtures layer, concentrating in its upper sublayers. The formed layer of grain mixture of a greater thickness is sent to the main vertical pneumatic separating channel, where it is cleaned by aerodynamic properties. This allows to increase the specific loading of the pneumatic separating channel, which intensifies the process of cleaning grain mixtures on grain separators.

Mathematical modelling of grain mixes movement in working zones of developed pneumatic separating channel is based on interaction of phases of continuous mediums according to the rheological laws taking into account preliminary of grain mixes. The equations of motion of two-phase polydisperse medium were constructed with the help of which the regularities of particle velocity of grain mixtures and the coefficient of its stratification on the scaly air permeable surface were established. The conditions and parameters of fluidized of grain mixes, which determine the effectiveness of its stratification on the developed pneumatic separation channel are grounded. It has been established that the increase of the speed of blowing by air flow of grain mixture on the scaly surface of developed pneumatic separating channel, reduction of particle density of grain mixtures and the height of its layer, increase the stratification coefficients by 20...35%.

For calculation and management of productivity of process of grain mixes cleaning the mathematical models are constructed: movements of the fluidized grain mix on a scaly air permeable surface; movement of pre-stratified grain mixture in vertical pneumatic separating channel of drum grain separators. The decision of models is obtained regularities of change of stratification coefficients and cleaning of grain mixes, trajectories of movement of impurities particles. It is determined that the use of pre-stratified

grain mixtures increases the coefficients of its purification in the developed pneumatic separation channel for 18,3...47% to 0,68...1, compared to the base construction.

The method of determination of speed and trajectory of grain mixture components in working zones of developed pneumatic separator channel, which is based on video shooting of particles of grain mixture with application of Pitot tube, micromanometer and anemometer Testo 416 is offered. According to the set speed dependencies of "float" and the trajectory of particles the impurities experimentally confirmed its redistribution to the upper layers of grain mixture under the influence of air flow and scales, providing stratification. On condition of pseudo-liquefied grain mixture and its maximal stratification the recommended ranges of variation of parameters of the developed pneumatic separator channel.

Proposed methods with the developed software experimentally identified ranges variation of significant parameters of process of grain mixture cleaning: porosity and particle size of grain mixture components. According to the developed method the ranges of variation of grain mixture porosity were determined, which were investigated: wheat 0,48...0,56; corn 0,54...0,63; sunflower 0,57...0,65. The use of stratification device developed by pneumatic separator channel leads to increase of porosity of grain mixture for 12,2...17%, confirming the possibility of intensification of grain mixture purification process.

The dependence of process of grain mixtures purification on condition of its preliminary bundles on the developed pneumatic separator channel is established. It is determined that the increase of air flow rate, in the explored ranges, increases the coefficient of bundle of grain mixtures by 9,3...21%. Established ranges of variation of coefficients bundle for grain mixtures: wheat 0,23...0,9; sunflower 0,12...0,22; corn 0,24...0,48. The increase of productivity of developed pneumatic separator channel at cleaning of pre-stratification grain mixture 3...42%, in comparison with the basic construction is established.

The complex analysis of results of theoretical and experimental researches, conducted multifactorial experiment of process of grain mixes cleaning are established constructive and technological parameters of the developed pneumatic separating channel: angle of air permeable surface 41...43<sup>0</sup>; length of air permeable surface 0,43...0,47 m; air flow rate on air permeable surface 2,3...2,7 m/s; speed of air flow in vertical channel 6,1...6,7 m/s; width of vertical channel 0,21...0,3 m. It was established that at the specified parameters the coefficient of stratification of wheat grain mixtures amounted to 30,53...31,75%, the coefficient of its purification developed by the pneumatic separating channel – 92,15...99,29 %.

The production tests of the developed pneumatic separating channel on the grain processing plants have been established to increase the efficiency of process of corn grain mixtures cleaning, sunflower and wheat by 30...40% to 80...96%, which provides increased productivity of drum separators KBS 1270.4.00 for 23,5...29%.

The developed normative-technical documentation on pneumatic separating channels with the delamifying device is introduced and used in serial production at KMZ Industries.

**Keywords:** cleaning processes, pneumatic separating channel, grain mixtures, light impurities, productivity, efficiency.