

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Сліпченко Максим Володимирович

УДК 631.362.36; 621.928.9

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ І РОЗРОБКА
ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ВІБРОВІДЦЕНТРОВИХ
ЗЕРНОВИХ СЕПАРАТОРІВ**

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського
виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства аграрної політики та продовольства України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України, професор **Тіщенко Леонід Миколайович**, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, в.о. ректора, завідувач кафедри теоретичної механіки та деталей машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Котов Борис Іванович**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, професор кафедри автоматичних та робототехнічних систем імені І.І. Мартиненка;

кандидат технічних наук, доцент **Бакум Микола Васильович**, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри сільськогосподарських машин.

Захист відбудеться „25” 01 2013 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.01 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Артема, 44.

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

Автореферат розісланий „21” 12 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Д. Черенков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пневмосепаруючі пристрої (ПСП) високопродуктивних універсальних вібровідцентрових зернових сепараторів А1-БЦСМ-100, Р8-БЦСМ-50, Р8-БЦСМ-25, СВС-25, СВС-15, СВС-5 ВАТ «Вібросепаратор» (м. Житомир) призначені для очищення зернових сумішей (ЗС) від легких домішок (пилу, соломи, решток бур'янів). Але зношеність комбайнового парку, існуюча вітчизняна культура землеробства, рослинництва при забур'яненні полів і, як наслідок, занадто засмічених ЗС призводять до підвищеного вмісту легких домішок. Подальше підвищення продуктивності вібровідцентрових сепараторів також вимагає підвищення ефективності процесу очищення ЗС ПСП (особливо ворохоочисників СВС-25, СВС-15, СВС-5).

Проведеним аналізом відомих досліджень і конструкцій встановлено, що перспективним напрямком підвищення ефективності очищення ЗС від легких домішок є інтенсифікація процесу та застосування нової конструкції ПСП. Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС та розробка нової конструкції ПСП найпродуктивніших вібровідцентрових сепараторів є актуальним науково-прикладним завданням для розвитку зернопереробної галузі України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно: з Державною цільовою програмою «Розвиток українського села до 2015 р.»; з Комплексною державною цільовою програмою «Зерно України - 2008-2015»; до вимог Законів України «Про основні напрями державної аграрної політики на період до 2015 р.», «Про державну підтримку сільського господарства України», «Про зерно та ринок зерна в Україні»; з регіональною програмою «Найважливіші проблеми АПК на період до 2011 р.»; з розділом комплексної теми 1-4 НДР ХНТУСГ «Розробка та впровадження елементів вібраційно-відцентрових сепараторів для підвищення їх продуктивності», (1995-2010 рр.); з НДР «Обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС ПСП вібровідцентрових зернових сепараторів» (ДР № 0108U008943, 2008-2012 рр.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу очищення ЗС від легких домішок шляхом обґрунтування його параметрів та розробки нової конструкції ПСП вібровідцентрових сепараторів ВАТ «Вібросепаратор».

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- виконати теоретичні дослідження руху потоку ЗС по розробленому ПСП;
- створити математичні моделі нелінійної динаміки процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим віяло-кільцевим конусно-каскадним ПСП;
- виконати комплексне обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів ПСП;
- виконати експериментальні дослідження траєкторій і швидкостей руху легких домішок, швидкостей повітряного потоку (ПП) в кільцевих зонах; визначити ефективність процесу очищення та його залежність від параметрів ПСП і фізико-механічних властивостей ЗС;
- розробити, виготовити та провести спільно з ВАТ «Вібросепаратор» порівняльні з серійним виробничі випробування ПСП, визначити техніко-економічну

ефективність його застосування;

- впровадити в серійне виробництво ВАТ «Вібросепаратор» розроблений віяло-кільцевий конусно-каскадний ПСП.

Об'єкт дослідження: процес очищення ЗС від легких домішок, зв'язок процесу з конструктивно-технологічними параметрами ПСП, фізико-механічними властивостями домішок.

Предмет дослідження: обґрунтування параметрів процесу і розробка ПСП вібровідцентрових зернових сепараторів.

Методи дослідження: теоретичні дослідження виконані із застосуванням основних положень теоретичної механіки, аеродинаміки, механіки суцільних і гетерогенних середовищ, тензорного аналізу, теорії швидких рухів гранульованих сипучих матеріалів, теорії тонких шарів. Розв'язок побудованих математичних моделей виконано чисельним методом Рунге-Кутта з використанням обчислювальної техніки. Експериментальні дослідження проведені на виготовлених лабораторних установках та експериментальному сепараторі-ворохоочиснику СВС-25 із застосуванням відеозйомки і тензовимірювання. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням положень теорії ймовірності та математичної статистики з використанням пакетів програм «MatLab», «Mathcad», «Exel». Для визначення оптимальних співвідношень конструктивно-технологічних параметрів ПСП застосована методика планування факторного експерименту. Виробничі випробування сепаратора з розробленим ПСП проведені у відповідності з методикою випробувань зерноочисних машин.

Наукова новизна одержаних результатів:

- для визначення закономірностей руху потоку ЗС перед входженням в кільцеві зони очищення розробленого ПСП вібровідцентрових сепараторів вперше за допомогою побудованої математичної моделі нелінійної динаміки двофазного потоку ЗС встановлені зміни складових швидкостей та траєкторій зернових частинок та легких домішок на тарілчастому розкидачі (ТР) та при сході з нього [5-10];

- для прогнозування вилучення легких домішок, керування та розрахунку технологічних показників продуктивності та якості процесу очищення ЗС вперше створені математичні моделі нелінійної динаміки суцільного трифазного середовища «зерно - легкі домішки - повітряний потік» в основній кільцевій зоні і на конусно-каскадній поверхні пристрою. У моделях вперше враховано взаємодію фаз як суцільних середовищ з реологічними законами, які визначають вплив в'язких, гідродинамічних, інерційних сил, неоднорідності поля швидкостей рухливих взаємопроникних континуумів [3,4];

- для оцінки впливу розробленого ПСП на ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок вперше виконано комплексне обґрунтування його параметрів з урахуванням технологічних показників (швидкості ПП, засміченості ЗС) і фізико-механічних властивостей домішок [1, 2, 11].

Практичне значення одержаних результатів

Запропонована і обґрунтована нова універсальна конструкція ПСП вібровідцентрових сепараторів. Використання розробленого віяло-кільцевого конусно-каскадного ПСП підвищує ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок до 70% і збільшує продуктивність вібровідцентрових сепараторів на 12-15%.

На основі проведених досліджень ВАТ «Вібросепаратор» виготовив експериментальний СВС-25 з розробленим ПСП, який випробувано у виробничих умовах дослідного поля «Центральне» ХНТУСГ протягом 2009-2012 рр. (с. Перше травня Харківського р-ну Харківської обл.) з щорічним економічним ефектом біля 32 тис. грн.

З 2009 р. ВАТ «Вібросепаратор» впровадив у серійне виробництво вібровідцентрових зернових сепараторів типу СВС і БЦСМ розроблений ПСП. Його застосування на одному сепараторі-ворохоочиснику СВС-25 дає економічний ефект 18,7 тис. грн, а при їх річній програмі випуску в 50 шт. – 935 тис. грн.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи здобувачем одержані самостійно. У наукових роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок полягає в наступному: [3] - одержано математичні вирази розподілів швидкості та тиску ПП, зміни об'ємної щільності по товщині шару ЗС; [4-7, 9, 10] - розроблені математичні моделі нелінійної динаміки дво- і трифазного потоку, складені граничні умови, отримано розв'язок, виконано аналіз результатів; [8] - одержано осереднені значення компонентів тензора в'язких напружень; [11] - проведено експерименти та встановлено значення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості засміченого ПП. Виробничі випробування розробленого ПСП сепаратора СВС-25 проведені спільно з ВАТ «Вібросепаратор». Дольова участь здобувача (обробка результатів виробничих випробувань, їх узагальнення та видача рекомендацій проведені самостійно) становить 80%. Участь у розробці нової конструкції – 65%.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися: на міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях (МНПК, МНТК) «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв», «Технічний прогрес в АПК» (ХНТУСГ ім. П.Василенка, Харків, 2008-2012 рр.); на ІХ - Х МНПК «Вібрації в техніці та технологіях» (ВНАУ, Вінниця, 2009, 2012 рр.; ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, Полтава, 2012 р.); на МНПК «Моделювання технологічних процесів в АПК» (ТДАТУ, Мелітополь, 2010 р.); на ХІХ МНТК «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (ННІ "ІМЕСГ", Глеваха, 2011 р.); на МНПК «Сучасні проблеми землеробської механіки» (ЛНАУ, Луганськ, 2011 р.); на VIII МНТК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (КНТУ, Кіровоград, 2011 р.); на Всеукраїнському конкурсі-виставці «Кращий вітчизняний товар 2010 року» в номінації «Наука» з одержанням золотої медалі переможця (НК «Експоцентр», Київ, 2010 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових статтях фахових видань та 2 тезах доповідей, з яких 2 статті – самостійно. Одержано патент України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 214 найменувань і 3 додатків. Повний обсяг дисертації викладено на 273 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина 221 сторінка), містить 117 рисунків, 11 таблиць і 3 додатки на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність теми, викладений зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета та завдання досліджень, наведено наукову новизну та значення одержаних результатів.

У першому розділі наведено аналіз відомих досліджень процесу очищення ЗС від легких домішок, виконано порівняння способів та конструкцій ПСП.

Дослідженнями взаємодії сипких середовищ з робочими органами зерноочисних машин займалися В.П. Горячкін, П.М. Василенко, Є.С. Гончаров, Г.Є. Листопад, П.М. Заїка, А.Н. Прилуцький, П.С. Берник, Б.І. Котов, В.С. Ловейкін, В.В. Адамчук, Д.І. Мазоренко, О.І. Завгородній, Л.М. Тіщенко, В.А. Дубровін, С.І. Малюта, В.М. Дринча, М.В. Бакум, В.В. Бредихін, М.В. Півень, Ф.М. Абдуєва, О.В. Мандрика та ін. Очищення ЗС в ПП досліджували І.Є. Кожуховський, Є.С. Гончаров, П.М. Заїка, А.І. Бурков, В.Л. Андрєєв, В.В. Гортинський, А.Б. Демський, А.Я. Маліс, А.І. Нелюбов, А.С. Матвєєв, М.Н. Мігреладзе, В.П. Нілов, С.П. Степаненко, С.О. Харченко та ін.

Перспективним напрямком підвищення ефективності очищення ЗС від легких домішок є використання багатократного їх очищення за рахунок створення основної і додаткових зон на конусно-каскадній поверхні ПСП (рис. 1).

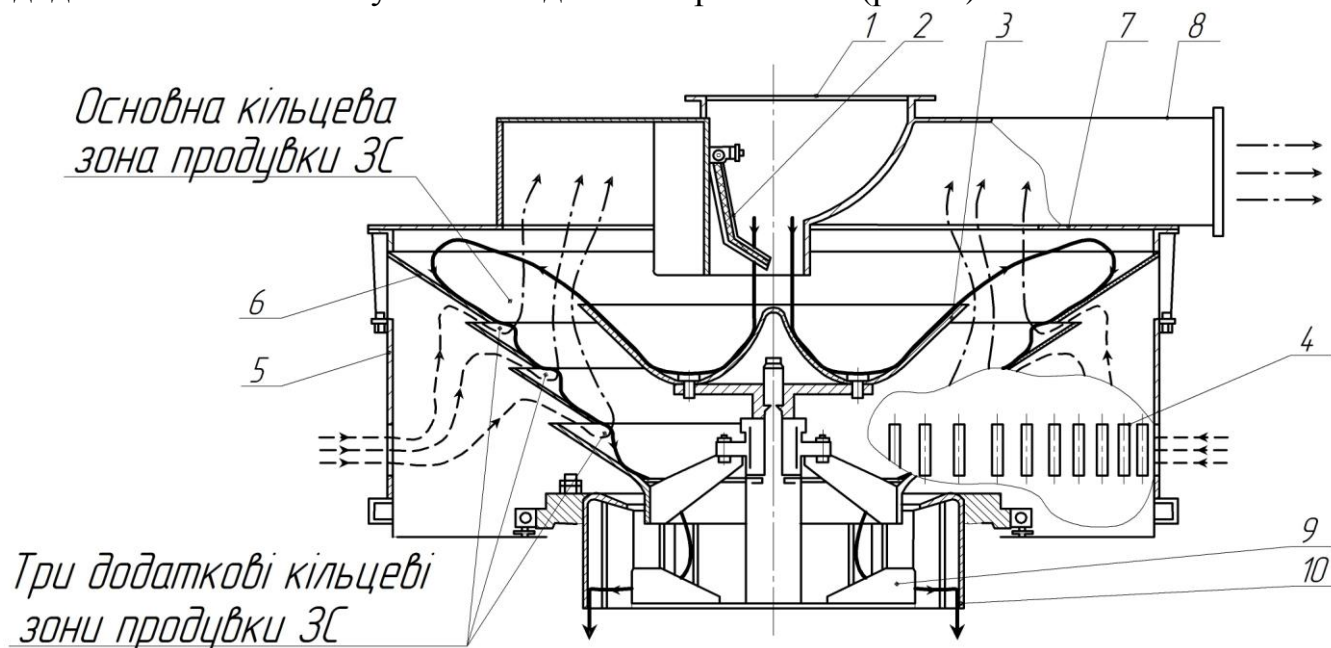


Рис. 1. Конструктивна схема розробленого віяло-кільцевого конусно-каскадного ПСП: 1 - патрубок завантажувальний; 2 - клапан дозуючий; 3 - розкидач тарілчастий; 4 - вікна повітрязабірні, 5 - кожух сепаратора; 6 - конус каскадний складений; 7 - діафрагма; 8 - патрубок відвідний; 9 - розкидач дисковий; 10 - блок решітний; \longrightarrow – рух ЗС; $-\ - \blacktriangleright$ – ПП; $-\cdot \blacktriangleright$ – ПП з легкими домішками

Працює розроблений ПСП наступним чином. Через завантажувальний патрубок 1 і клапан 2 ЗС надходить на ТР 3, що обертається, сходять з нього по віялоподібних траєкторіях і продувається ПП. Останній надходить через повітрязабірні вікна 4 і проходить між кільцевими щілинами каскадного, складеного конуса 6, утворюючи три додаткові кільцеві зони продувки. Потім направляється в

основну кільцеву зону очищення, обмежену ТР і складеним конусом. Легкі домішки спрямовуються до відповідного патрубку 8, а ЗС по каскадах конусу, де встряхується, надходить на дисковий розкидувач 9 і далі в решітний блок 10 сепаратора. Встряхування ЗС на каскадах сприяє більш інтенсивному виділенню домішок, що не вилучаються в основній зоні.

Таким чином, необхідно вирішити науково-прикладне завдання з обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС ПП від легких домішок.

У другому розділі проведено теоретичні дослідження руху потоку ЗС по ТР розробленого ПСП. Побудовано математичні моделі нелінійної динаміки процесу очищення ЗС в основній кільцевій зоні та на конусно-каскадній поверхні ПСП.

ТР ПСП обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю $\vec{\Omega}$, має увігнуту кругово-конусну поверхню, яка розділена радіальними перегородками S_5, S_6 , що утворюють канали $[V]$, які розходяться під кутом β_1 (рис. 2). Зерно з бункера, разом з домішками, надходить на ТР і втягується його перегородками в обертальний рух. Виникаючі сили інерції змушують суміш рухатися по каналам в напрямку периферії ТР. У процесі руху зерно і домішки набувають різні швидкості на виході з каналів, що лежить в основі поділу двофазного середовища на складові.

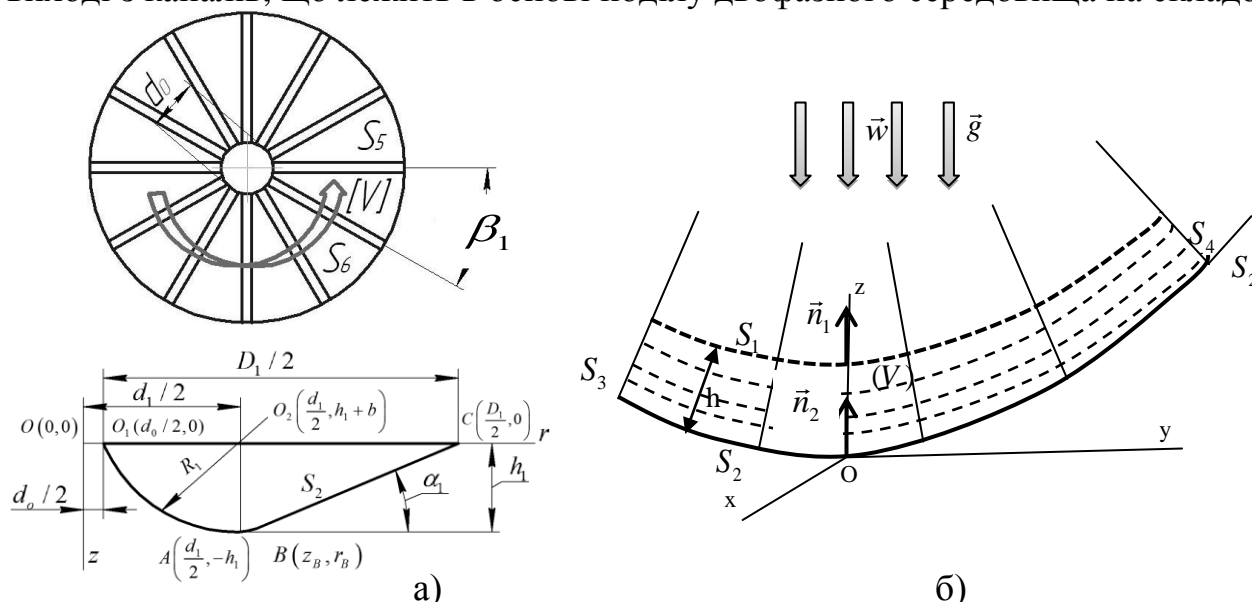


Рис. 2. Розрахункова схема: а) ТР; б) ділянки ТР з потоком ЗС

При значній різниці між щільностями зерна ρ_1^0 , домішок ρ_2^0 і щільністю повітря ρ_3^0 ($\rho_1^0, \rho_2^0 \gg \rho_3^0$) впливом повітря на рух ЗС по ТР знехтуємо. Також вважаємо, що частки домішок не взаємодіють між собою та слабо впливають на рух зернової фази $\hat{\sigma}_2 \equiv 0$, а сила взаємодії фаз між собою являє силу в'язкої взаємодії Стокса.

Для кожної з двох фаз (зернової і домішкової), з урахуванням допущень, мають місце:

– рівняння нерозривності, що виражають закон збереження мас:

$$\frac{\partial \rho_{1,2}}{\partial t} + \text{div } \rho_{1,2} \vec{v}_{1,2} = 0, \quad (1)$$

– рівняння руху:

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} + \vec{v}_1 \cdot \nabla \vec{v}_1 \right) = \text{div} \hat{\sigma}_1 + \rho_1 \vec{g} - \rho_1 \left[\vec{\Omega} \vec{\Omega} \cdot \vec{r} - \Omega^2 \vec{r} \right] - 2\rho_1 \vec{\Omega} \times \vec{v}_1, \quad (2)$$

$$\rho_2 \left(\frac{\partial \vec{v}_2}{\partial t} + \vec{v}_2 \cdot \nabla \vec{v}_2 \right) = \frac{9\mu_1\rho_2}{2a_2^2\rho_2^0} \vec{v}_1 - \vec{v}_2 + \rho_2 \vec{g} - \rho_2 \left[\vec{\Omega} \vec{\Omega} \cdot \vec{r} - \Omega^2 \vec{r} \right] - 2\rho_2 \vec{\Omega} \times \vec{v}_2, \quad (3)$$

де $\vec{v}_{1,2}$ – відносні швидкості фаз; $\hat{\sigma}_1$ – тензор напружень зернової фази; μ_1 – коефіцієнт динамічної зсувної в'язкості зернової фази; a_2 – еквівалентний радіус частинок домішок; $\rho_{1,2} = \rho_{1,2}^0 \varepsilon_{1,2}$ – насипна щільність фаз; $\varepsilon_{1,2}$ – їх об'ємні щільності, $\varepsilon_{1,2} = V_{1,2}^u / V_{1,2}^\phi$; $V_{1,2}^u$ – об'єми частинок фаз, $V_{1,2}^\phi$ – об'єми фаз; g – інтенсивність зовнішніх масових сил (сила тяжіння).

Одержана формула кривої O_1ABC , що описує поверхню ТР:

$$z = Z(r) = \begin{cases} \frac{-d_1^2 + 4h_1^2 + \sqrt{d_1^4 - 8d_1^2h_1^2 + 16h_1^4 + 64d_1rh_1^2 - 64r^2h_1^2}}{8h_1}, & (0 \leq r \leq r_B), \\ k \left(\frac{D_1}{2} - r \right), & \left(r_B \leq r \leq \frac{D_1}{2} \right), \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \frac{h_1}{2} \frac{8d_1^2D_1 + 32d_1h_1^2 - 32h_1^2D_1 - 8d_1^3 -}{-8\sqrt{-16d_1^3h_1^2D_1 - 32d_1h_1^4D_1 + d_1^4D_1^2 - 2d_1^5D_1 + 8d_1^2D_1^2h_1^2 + 16h_1^4D_1^2} \times} \quad (5)$$

$$\times 32D_1h_1^2d_1 - 8d_1^2h_1^2 + d_1^4 + 16h_1^4 - 16D_1^2h_1^2^{-1},$$

$$z_B = k \frac{4D_1h_1 - kd_1^2 + 4kh_1^2 - 4d_1h_1}{8h_1(1+k^2)}, \quad r_B = kz_B + k \left(\frac{d_1^2}{8h_1} - \frac{h_1}{2} \right) + \frac{d_1}{2}, \quad (6)$$

де z_B , r_B – висота та радіус ТР в т. B , до якої його поверхня описується дугою O_1AB , а далі – похилою прямою BC (рис.2, а).

З урахуванням (1)-(6) математичну модель нелінійної динаміки двофазного потоку ЗС по ТР одержано у вигляді:

– рівняння нерозривності:

$$v^1 \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho_1 \frac{\partial v^1}{\partial r} + v^3 \frac{\partial \rho_1}{\partial n} + \rho_1 \frac{\partial v^3}{\partial n} + v^2 \frac{\partial \rho_1}{\partial \varphi} + \rho_1 \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + \left(\left(-\frac{Z''' + Z'''Z'^2 - 3Z''^2Z'}{1 + Z'^2} - \frac{Z''}{1 + Z'^2} + \frac{Z'}{r^2\sqrt{1 + Z'^2}} \right) n + \frac{Z'Z''}{1 + Z'^2} + \frac{1}{r} \right) \rho_1 v^1 = 0, \quad (7)$$

– радіальна складова рівняння руху:

$$\frac{\partial^2 v^1}{\partial n^2} - A_1 \frac{\partial v^1}{\partial n} + B_1 v^1 + F_1 = 0, \quad (8)$$

– трансверсальна складова:

$$\frac{\partial^2 v^2}{\partial n^2} + \left(-\frac{Z''}{1 + Z'^2} + \left(-\frac{Z''^2}{1 + Z'^2} - \frac{2Z'^2}{r^2(1 + Z'^2)} \right) n - \frac{2Z'}{r\sqrt{1 + Z'^2}} \right) \frac{\partial v^2}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

– нормальна складова:

$$\begin{aligned}
& \nu_1 + \mu_1 / 3 \frac{\partial^2 v^3}{\partial n^2} + \left(-\frac{Z'' \mu_1}{1 + Z'^2} - \frac{\mu_1 Z'}{r \sqrt{1 + Z'^2}} + \left(-\frac{Z''^2 \mu_1}{1 + Z'^2} - \frac{\mu_1 Z'^2}{r^2 (1 + Z'^2)} \right) n \right) \frac{\partial v^3}{\partial n} + \\
& + \left\{ \left(\frac{Z''^2 n}{1 + Z'^2} - \frac{Z''}{\sqrt{1 + Z'^2}} \right) v^1 - \left(\frac{r Z'}{\sqrt{1 + Z'^2}} - \frac{Z'^2 n}{1 + Z'^2} \right) v^2 \right\} + \\
& + \left[\left(\frac{Z' Z'' r^2}{2 (1 + Z'^2)} + \frac{Z'^2 r}{\sqrt{1 + Z'^2}} \right) n - \frac{Z'}{2 r^2} \right] \Omega v^2 + \left[\left(\frac{Z' Z'' r^2}{4 (1 + Z'^2)} + \frac{Z'^2 r}{2 \sqrt{1 + Z'^2}} \right) n - \frac{r^2 Z'}{4} \right] \Omega^2 + \\
& + \left[\left(\frac{Z' r}{4 (1 + Z'^2)} + \frac{Z'}{4 \sqrt{1 + Z'^2}} \right) n - 1/4 r \right] g \left. \right\} \rho_1 = 0.
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\text{де } A_1 = A_1(r) = \left(-\frac{Z'^2}{r^2 (1 + Z'^2)} - \frac{3Z''^2}{1 + Z'^2} \right) n - \frac{3Z''}{1 + Z'^2} - \frac{Z'}{r \sqrt{1 + Z'^2}}; \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
B_1 = B_1(r) = & - r \left[\nu_1 + \mu_1 / 3 Z'^4 - 2Z' Z'' r \mu_1 + Z''^2 r^2 \mu_1 + 2\nu_1 + 2\mu_1 / 3 Z'^2 - \right. \\
& \left. - 2\mu_1 Z' Z'' r + \mu_1 / 3 + \nu_1 - Z''^2 r^2 \mu_1 \right] (1 + Z'^2)^{11/2} + \left[7 (1 + Z'^2)^4 Z''^3 - 2Z'^2 - 1 \right] n r^3 - \\
& - 5 (1 + Z'^2)^5 Z''^2 Z' n r^2 - 2/3 (1 + Z'^2)^6 Z''^3 Z'^2 + 1 n r + 2/3 (1 + Z'^2)^7 Z' n \mu_1 + \\
& + \left[(1 + Z'^2)^6 Z'' n r + 2 (1 + Z'^2)^7 Z' n \right] \nu_1 \left. \right\} \mu_1^{-1} (1 + Z'^2)^{17/2};
\end{aligned} \tag{12}$$

$$F_1 = \left(-\frac{Z' \rho_1 r \Omega^2}{2 (1 + Z'^2) \mu_1} + \frac{Z'^2 \rho_1 g}{4 (1 + Z'^2) \mu_1} \right) n + \frac{\rho_1 r^2 \Omega^2}{4 \sqrt{1 + Z'^2} \mu_1} - \frac{Z' \rho_1 r g}{4 \sqrt{1 + Z'^2} \mu_1}, \tag{13}$$

де ν_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості при всебічному розширенні (стискуванні); Z' , Z'' , Z''' – частинні похідні z по r ; v^1 , v^2 , v^3 – складові швидкості зернової фази в криволінійній системі координат (r, φ, n) .

Для розв'язку рівнянь задавали граничні умови:

– непроникнення фаз суміші через поверхню S_2 ТР (рис. 2, б):

$$\vec{v}_{1,2} \cdot \vec{n}_2 = 0; \tag{14}$$

– дотична складова сили тертя згідно закону Кулона (виражена через тензор напружень):

$$\left[(1 + Z'^2) \sigma^{31}{}^2 + r^2 \sigma^{32}{}^2 \right]^{1/2} = f_e |\sigma^{33}|, \quad (n = 0), \tag{15}$$

– нормальна складова кінематичної умови на вільній поверхні S_1 ЗС:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = V_{S_1}; \tag{16}$$

– збереження маси на вільній поверхні:

$$\tilde{\rho}_1 w_n - V_{S_1} = \rho_1 v_n - V_{S_1}, \quad (17)$$

– збереження імпульсу при переході через вільну поверхню:

$$\tilde{\rho}_1 w^3 - V_{S_1}^2 = \rho_1 v^3 - V_{S_1}^2 + \sigma^{33}; \tilde{\rho}_1 w^3 - V_{S_1} w^1 = \rho_1 v^3 - V_{S_1} v^1 + \sigma^{31}; \tilde{\rho}_1 w_3 - V_{S_1} w^2 = \rho_1 v^3 - V_{S_1} v^2 + \sigma^{32}, \quad (18)$$

де f_e – коефіцієнт тертя ЗС по поверхні ТР; σ^{ik} – компоненти двічі контраваріантного тензора другого рангу; V_{S_1} – швидкість переходу ЗС через вільну поверхню; $\tilde{\rho}_1$ – середня щільність потоку ЗС; \vec{w}, \vec{v} – відносні швидкості, $w_n = \vec{w} \cdot \vec{n}_1$, $v_n = \vec{v} \cdot \vec{n}_1$ – нормальні складові швидкостей; w^1, w^2, w^3 – складові швидкості зернової фази до вільної поверхні у криволінійній системі координат; \vec{n}_1, \vec{n}_2 – одиничні нормалі до поверхонь S_1 та S_2 , відповідно.

Для визначення форми вільної поверхні ЗС залучено додаткове співвідношення, яке одержали з інтегрального рівняння балансу маси і яке після перетворень, згідно до теорії тонких шарів, має вигляд:

$$\int_0^h \rho_1 v^1 dn + r \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h \rho_1 v^1 dn - \rho_1 v^1 \Big|_{n=h} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_0^h \rho_1 v^2 \sqrt{1+Z'^2} dn = \frac{\tilde{\rho}_1 w_z}{\sqrt{1+Z'^2}}. \quad (19)$$

де w_z – вертикальна складова швидкості потоку ЗС, що поступає на ТР.

У випадку стаціонарного руху маємо на вільній поверхні:

$$\left(\frac{Z'^3 + Z' + Z''r}{1+Z'^2} h - r\sqrt{1+Z'^2} \right) \rho_1 v^3 + \left(\frac{Z'^3 + Z' + Z''r}{1+Z'^2} h - r \right) \tilde{\rho}_1 w_z = 0, \quad (20)$$

$$\left(1 + Z'^2 - \frac{2Z''h}{\sqrt{1+Z'^2}} \right) \mu_1 \frac{\partial v^1}{\partial n} = 0, \quad (21) \quad \left(r^2 - \frac{2Z'r h}{\sqrt{1+Z'^2}} \right) \mu_1 \frac{\partial v^2}{\partial n} = 0, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{Z''r}{1+Z'^2} + Z' \right) h - r\sqrt{1+Z'^2} \right] p + \left[\frac{\mu_1 - 3v_1}{3} \frac{rhZ''}{1+Z'^2} - \left(\frac{\mu_1}{3} + v_1 \right) hZ' + \right. \\ & + \left. \sqrt{1+Z'^2} \mu_1 / 3 + \sqrt{1+Z'^2} v_1 r \right] \frac{\partial v^3}{\partial n} + \left[\left(-\frac{4\mu_1 Z'}{3} \frac{1}{1+Z'^2} + \frac{2v_1 Z'}{1+Z'^2} \right) rhZ'' + \right. \\ & + \left. \left(\left(-\frac{2\mu_1 Z'}{3\sqrt{1+Z'^2}} + \frac{v_1 Z'}{\sqrt{1+Z'^2}} \right) r + \left(\frac{2}{3} \frac{Z'^2 + 2\mu_1}{1+Z'^2} - \frac{Z'^2 + 2v_1}{1+Z'^2} \right) h \right) Z'' + \right. \\ & \left. + Z'' \frac{2\mu_1 - 3v_1}{3} \frac{rh}{1+Z'^2} + \sqrt{1+Z'^2} v_1 - \frac{2\mu_1}{3} \sqrt{1+Z'^2} \right] v^1 = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

при $n = 0$ – умова (15), а також:

$$v^3(r, \varphi, 0) = 0. \quad (24)$$

Розглянемо рух частинок домішок вздовж поверхні ТР, вважаючи, що вони не взаємодіють між собою:

$$m \frac{d\vec{v}_2}{dt} = -mg\vec{k} + N\vec{n}_1 - f_{mp} N\vec{\tau} - C_\mu \vec{v}_2 - \vec{V}^{**} - m \left[\vec{\Omega} \vec{\Omega} \cdot \vec{r} - \Omega^2 \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v}_2 \right], \quad (25)$$

де \vec{k} – орт осі Oz ; m – маса частинки домішки; $\vec{v}_2 = v_2 \vec{\tau}$ – вектор швидкості руху частинки домішки; N – реакція поверхні ТР на частинку; f_{mp} – коефіцієнт тертя ковзання частинки по поверхні; $\vec{\tau}$ – одиничний вектор, дотичний до поверхні ТР; C_μ – коефіцієнт сили Стокса; $\vec{V}^{**} = v_2 \sqrt{1+Z'^2} \vec{\tau}$ – швидкість потоку ЗС в місці, де знаходиться частинка домішки.

Рівняння (7-10), з урахуванням (14-24), а також рівняння (25) розв'язували чисельно методом Рунге-Кутта п'ятого порядку точності. Основні результати наведені на рис. 3-5.

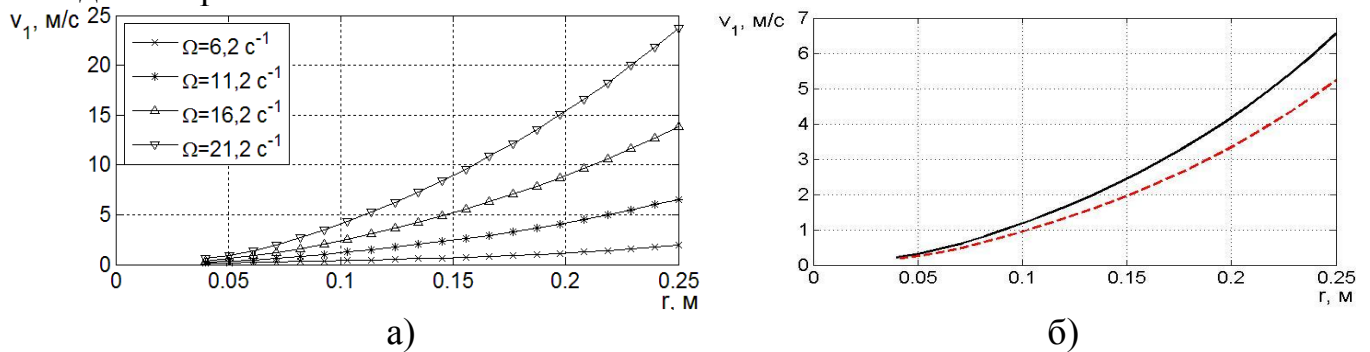


Рис. 3. Розподіли швидкостей зернових частинок пшениці вздовж ТР в залежності від: а) його кутової швидкості; б) насипної щільності зернової фази, що обробляється — — — $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$; — — — $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$ ($\Omega = 11,2 \text{ с}^{-1}$)

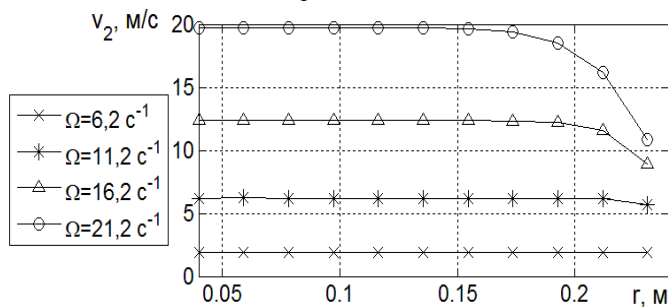


Рис. 4. Залежності швидкостей сходу частинок домішок від їх місця потрапляння на ТР та його кутової швидкості ($a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$)

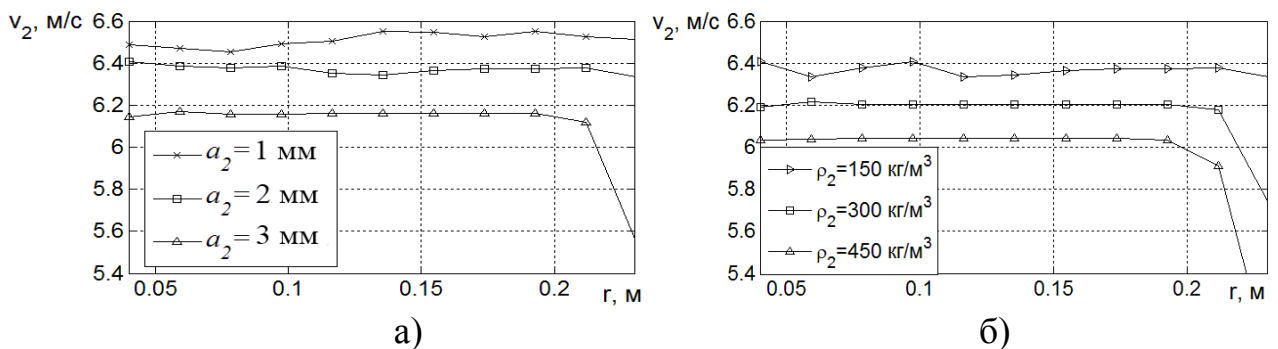


Рис. 5. Розподіли швидкостей сходу частинок домішок з місця їх потрапляння на ТР в залежності від: а) розмірів частинок ($\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$); б) насипної щільності домішкової фази ($a_2 = 0,002 \text{ м}$)

Швидкість сходу зернових частинок з ТР збільшується в 3,6 разів, з 6,7 до 24 м/с, при підвищенні його кутової швидкості з 11,2 до 21,2 с^{-1} . Зменшення насипної щільності зернової фази з 750 до 600 кг/м^3 знижує її на 22 %, з 6,7 до 5,2 м/с. Зі збільшенням діаметра ТР з 0,5 до 0,6 м вона підвищується в 1,5 разів, з 6,7 до 9,8 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – знижується на 43%, до 3,8 м/с.

Швидкість сходу частинок домішок визначається також і зерною фазою ЗС. Зменшення насипної щільності зернової фази з 750 до 600 кг/м³ знижує її на 18%, з 6,2 до 5,1 м/с. При збільшенні діаметру ТР з 0,5 до 0,6 м швидкість сходу частинок домішок підвищується в 1,5 разів, з 6,2 до 9,2 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – знижується на 40%, до 3,7 м/с. Збільшення кутової швидкості ТР від 11,2 до 21,2 с⁻¹ підвищує її в 3,1 разів, з 6,2 до 19,5 м/с. Збільшення розмірів частинок легких домішок від 1 до 3 мм зменшує її на 5 %, з 6,5 до 6,15 м/с. Збільшення насипної щільності домішкової фази з 150 до 450 кг/м³ – зменшує на 6 %, з 6,4 до 6 м/с. При кутовій швидкості ТР в 11,2 с⁻¹ спостерігається поява застійних утворень ЗС поблизу осі обертання, а при $\Omega \geq 16,2$ с⁻¹ – вони відсутні. Одержані значення використано в якості початкових умов для розрахунку процесу очищення ЗС у основній кільцевій зоні.

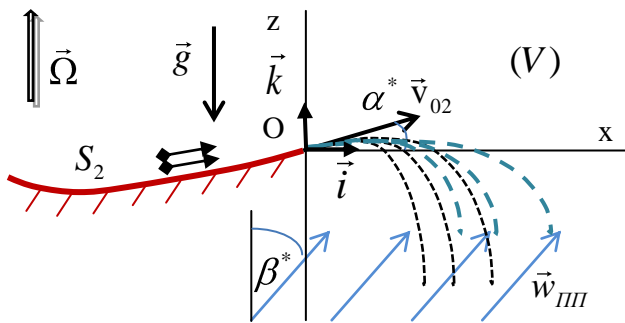


Рис. 6. Розрахункова схема руху потоку ЗС в основній кільцевій зоні

зони.

Будемо вважати ПП однорідним, який рухається з постійною швидкістю \vec{w}_{III} , спрямованим під кутом β^* по відношенню до вертикалі (рис. 6). ЗС сходять з ТР під кутом α^* із товщиною шару h_0 .

Частинки зерна або домішок сходять з ТР з початковими швидкостями \vec{v}_{01} та \vec{v}_{02} , які визначені розв'язком попередньої задачі, та мають радіальну, вертикальну та ненульову трансверсальну складові. Будемо досліджувати розподіл частинок домішок в радіальному напрямі. Трансверсальна складова не впливає на цей розподіл. Знехтуємо взаємодією частинок між собою. Тоді на рух частинок впливають сила тяжіння і сила Стокса, за рахунок взаємодії з ПП:

$$m \frac{d\vec{v}_2}{dt} = -mg\vec{k} - 6\pi\mu_3 a_2 \vec{v}_2 - \vec{w}_{III}, \quad (26)$$

де $\vec{v}_2 = \dot{x}_2\vec{i} + \dot{z}_2\vec{k}$ – вектор швидкості руху домішкової частинки; μ_3 – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості засміченого ПП; $\vec{w}_{III} = w_{III} \sin \beta^* \vec{i} + w_{III} \cos \beta^* \vec{k}$ – швидкість ПП.

Рівняння розв'язували чисельним методом Рунге-Кутта. Частинку вважаємо вилученою, якщо вертикальна складова швидкості додатна, та її траєкторія перетинає верхню границю ($z = 0,2$ м) кільцевої зони. Тоді, в залежності від конструктивно-технологічних параметрів ПСП, вилучення є прогнозованим.

Вертикальна складова швидкості легких домішок, що вилучаються, (рис.7) з підвищенням кутової швидкості ТР з 11,2 до 16,2 с⁻¹ збільшується в 2,1 разів, з 1,5 до 3,2 м/с, на початку кільцевої зони і в 1,5 разів з 1,9, до 2,9 м/с, в кінці. Підвищення швидкості ПП з 5 до 7 м/с збільшує V_{z_2} в 1,3 разів, з 1,6 до 2,1 м/с, на початку кільцевої зони і в 1,5 разів в кінці. Збільшення насипної щільності домішкової фази знижує її на 31%, з 2,6 до 1,8 м/с, в кінці кільцевої зони, а підвищення розмірів частинок з 1 до 3 мм знижує її на 50%, з 3,2 до 1,6 м/с.

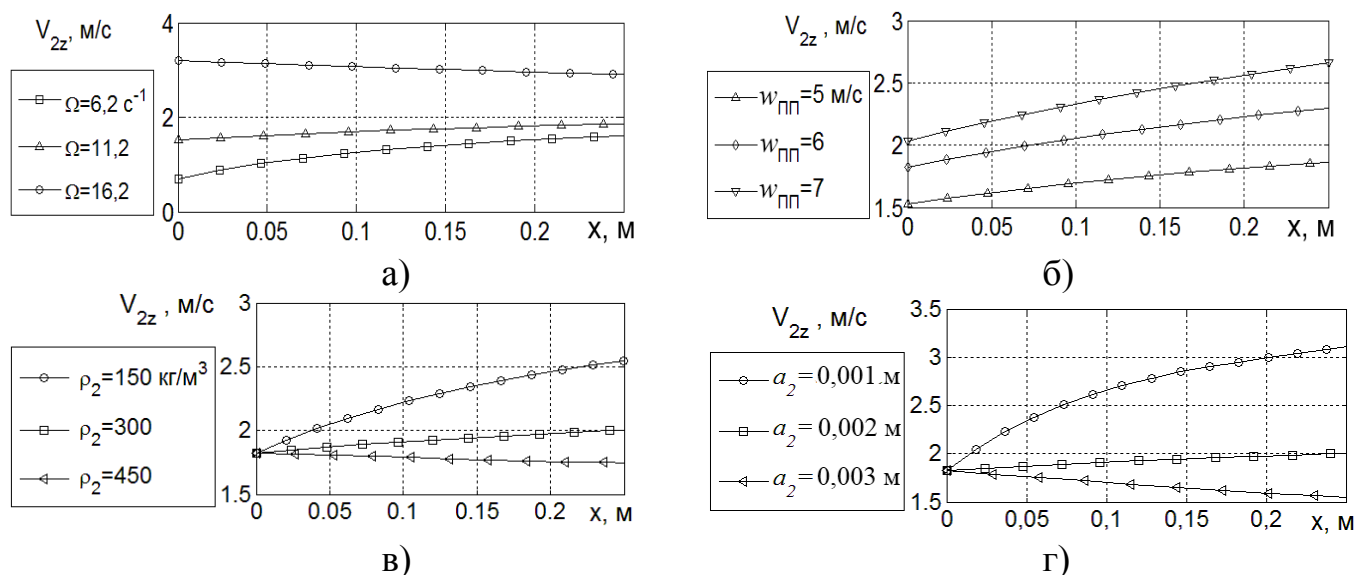


Рис. 7. Залежності вертикальних складових швидкості частинок домішок у основній кільцевій зоні від: а) кутової швидкості ТР ($w_{\text{III}} = 5$ м/с, $a_2 = 0,002$ м, $\rho_2 = 300$ кг/м³); б) швидкості ПП ($\Omega = 11,2$ с⁻¹, $a_2 = 0,002$ м, $\rho_2 = 300$ кг/м³); в) щільності домішок ($\Omega = 11,2$ с⁻¹, $a_2 = 0,002$ м, $w_{\text{III}} = 5$ м/с); г) розмірів домішок ($\Omega = 11,2$ с⁻¹, $w_{\text{III}} = 5$ м/с, $\rho_2 = 300$ кг/м³)

Збільшення кута β^* від 0° до 30° (рис. 8) збільшує розрахункову ширину основної кільцевої зони в 1,4 разів, з 0,2 до 0,27 м, а при подальшому його збільшенню – вилучення домішок на конструктивно обмеженому проміжку стає неможливим. Зменшення кута α^* з 45° до 15° збільшує її в 1,9 разів, з 0,14 до 0,27 м, а при $\alpha = 0^\circ$ – вилучення домішок стає неможливим.

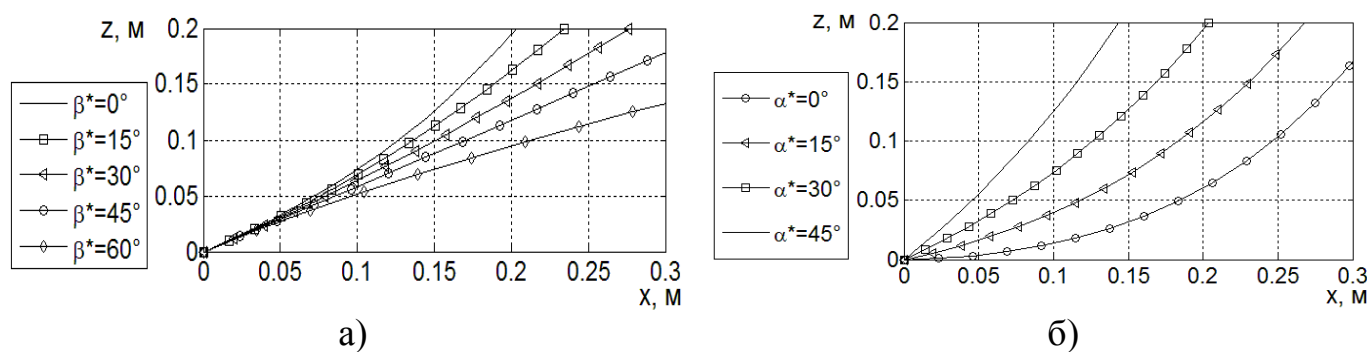


Рис. 8. Залежності траєкторій частинок домішок у основній кільцевій зоні від: а) кута β^* ($\alpha^* = 30^\circ$); б) кута α^* ($\beta^* = 0^\circ$) при: $\Omega = 11,2$ с⁻¹, $a_2 = 2$ мм, $\rho_2 = 300$ кг/м³, $w_{\text{III}} = 5$ м/с

Для створення математичної моделі нелінійної динаміки процесу очищення ЗС на конусно-каскадній поверхні ПСП досліджували рух потоку по еквівалентній повітропроникній поверхні Σ_1 ($y = 0$), нахилений під кутом β до горизонту (рис. 9). ЗС з постійною швидкістю надходить через вхідний перетин Σ_0 ($x = 0$) висоти h^* і рухається далі шаром постійної товщини по поверхні під дією сили тяжіння інтенсивності \vec{g} . Шар продувається ПП, направленим під кутом α по відношенню до нормалі, побудованої до Σ_1 , що призводить до псевдорозрідження ЗС.

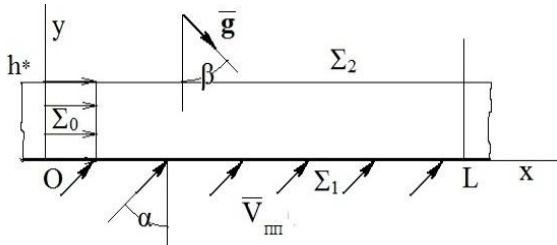


Рис. 9. Розрахункова схема до дослідження нелінійної динаміки трифазного середовища "зерно - легкі домішки - повітряний потік" на еквівалентній скатній повітропроникній поверхні ПСП

Використовуючи рівняння збереження маси та руху суцільних середовищ створено математичну модель нелінійної динаміки процесу очищення ЗС на конусно-каскадній поверхні ПСП:

$$\ddot{x} = g \cos \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{v_x^{(3)2} + v_y^{(3)2}} v_x^{(3)} + K_z \sqrt{v_x^{(1)2} - v_x^{(2)2} + v_y^{(1)2} - v_y^{(2)2}} v_x^{(1)} - v_x^{(2)} \right\}, \quad (27)$$

$$\ddot{y} = -g \sin \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{v_x^{(3)2} + v_y^{(3)2}} v_y^{(3)} + K_z \sqrt{v_x^{(1)2} - v_x^{(2)2} + v_y^{(1)2} - v_y^{(2)2}} v_y^{(1)} - v_y^{(2)} \right\}, \quad (28)$$

де K_z – феноменологічний коефіцієнт, що враховує від'ємність сили Стокса для зерна від відповідної сили для ПП;

$$\text{з початковими умовами: } x(0) = 0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0, y(0) = y_0, \dot{y}(0) = 0, \quad (29)$$

з розподілом швидкості ПП в шарі у вигляді:

$$\vec{v}^{(3)}(x) = v_x^{(3)}, v_y^{(3)} = \left(V_{III} \sin \alpha, \frac{V_{III} \cos \alpha}{\varepsilon_3(x)} \right) = \left(V_{III} \sin \alpha, \frac{V_{III} \cos \alpha}{1 - \varepsilon_1(x)} \right), \quad (30)$$

з рівнянням для визначення об'ємної щільності:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dx} = \left[\frac{0,165}{\rho_1^0 a_1} V_{III} \sin \alpha^2 + g \sin \beta \right] \left(\frac{K_p}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \frac{dF(\varepsilon_1)}{d\varepsilon_1} - \frac{Q_0^2}{\varepsilon_1^3} \right)^{-1}, \quad (31)$$

де $Q_0 = \varepsilon_1^0 V_{III} \sin \alpha \approx 0,64 V_{III} \sin \alpha$, $\varepsilon_1(0) = \varepsilon_1^0$, $K_p = \frac{107}{1 - k_{ak}^2} \left(\frac{\rho_3^0}{\rho_1^0} \right)^2$, $F(\varepsilon_1) = \varepsilon_1 \frac{(\varepsilon_1^0 / \varepsilon_1)^{1/3} - 1}{(1 - \varepsilon_1)^2}$, k_{ak} – коефіцієнт акомодатії.

Одержані рівняння вирішували чисельно, вважаючи, що частинка полишає ЗС за умови, якщо вона до досягнення кінця скату її шару $x = L$ проходить через границю Σ_2 ($y = h^*$). Частинки, що осідають на повітропроникну поверхню Σ_1 ($y = 0$) або досягають кінця скату шару $x = L$, вважаємо такими, які залишаються в ньому, тобто не вилучаються.

Граничної довжина стійкого шару (рис. 10) збільшується в 6 разів, з 0,1 до 0,6 м, з підвищенням початкової швидкості ЗС від 0,5 до 1,5 м/с, та збільшується також на 59-68% зі збільшенням кута установки каскадів з 30° до 60° . Вертикальна складова швидкості частинок домішок (рис. 11), що вилучаються з шару, зменшується зі збільшенням їх розмірів і щільності та підвищується із зростанням швидкості ПП. Ефективність процесу очищення збільшується із зростанням швидкості ПП від 5 до 7 м/с і для частинок з насипною щільністю до 300 кг/м^3 збільшується в 1,5 разів. Ефективність процесу очищення збільшується зі зростанням швидкості ПП і зменшується зі збільшенням розмірів та насипної щільності домішок.

У третьому розділі наведено програму та методику проведення експериментальних досліджень.

Для визначення траєкторій та швидкостей частинок ЗС побудовано лабораторні установки з оргскла та застосовано експериментальний метод із залученням відеозйомки з подальшою обробкою на комп'ютері.

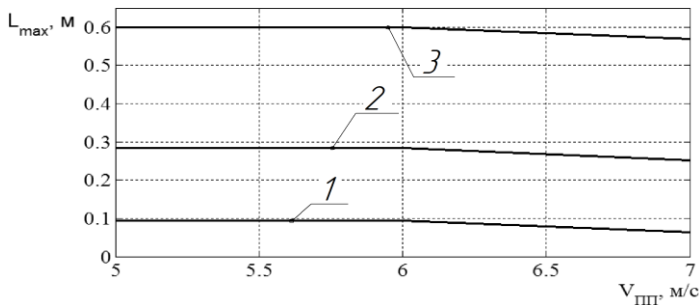


Рис. 10. Залежності граничної довжини стійкого шару від швидкості ПП та початкової швидкості ЗС: 1 – $v_{(1)x0} = 0,5$ м/с; 2 – $v_{(1)x0} = 1$ м/с; 3 – $v_{(1)x0} = 1,5$ м/с ($\alpha = 45^\circ$, $\beta = 37^\circ$)

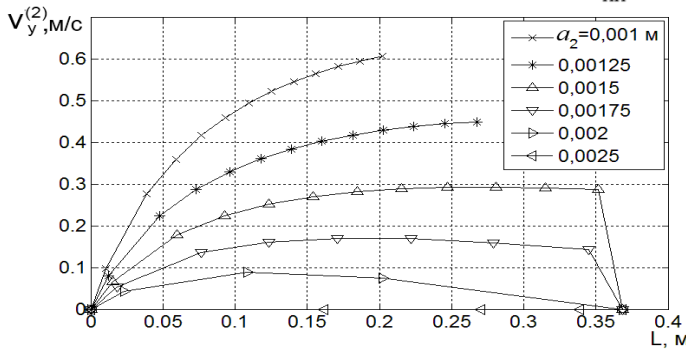


Рис. 11. Залежності швидкості виходу частинок домішок з шару по довжині скатної повітропроникної поверхні ПСП в залежності від їх розмірів ($h^* = 0,04$ м, $V_{III} = 5$ м/с, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $v_{x0}^{(1)} = 1,2$ м/с, $\rho_2 = 300$ кг/м³)

Для визначення ефективних коефіцієнтів динамічної в'язкості засмічених ПП використано експериментальний метод. Для цього в засмічений потік вводиться тензодатчик, а отриманий сигнал оброблюється USB-осцилографом та після підсилення оброблюється спеціальною програмою. Це надає можливість визначити дотичні зусилля в'язкого тертя, і, використовуючи дані високошвидкісної зйомки, отримати значення коефіцієнту динамічної в'язкості засміченого ПП.

Для визначення швидкостей ПП в характерних зонах розробленого і серійного ПСП застосовано трубку Піто-Прандля, з'єднану з мікроманометром.

Визначення якості процесу очищення ЗС від домішок виконано стандартними методами.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Дослідженням закономірностей руху легких частинок встановлено, що ефективність процесу очищення ЗС залежить від їх розмірів, щільності, товщини шару суміші та швидкості ПП. Розмір домішок, що вилучаються, залежить від поєднання зазначених параметрів.

Експериментальними дослідженнями встановлені значення коефіцієнту динамічної в'язкості засміченого ПП, які складають $\mu_3 = (18,01-18,66) \cdot 10^{-6}$ Па·с. Збільшення продуктивності сепаратора призводить до збільшення ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості засміченого ПП на 0,8-3,7 %. Швидкість ПП впливає на нього також незначно, від 1,3 до 2,9 %, як і початкова засміченість – від 2,5 до 5,4 %. Протяжність проєкцій траєкторій домішок, що вилучаються, в основній кільцевій зоні очищення ПСУ збільшується: при підвищенні кутової швидкості ТР з 6,2 до 12,4 с⁻¹ в 4,3 разів, з 0,045 до 0,195 м; зі зростанням розміру домішок з 0,001 до 0,002 м в 1,8 разів, з 0,14 до 0,25 м; зі збільшенні насипної щільності домішкової фази з 150 до 450 кг/м³ в 1,6 разів, з 0,16 до 0,25 м. При зростанні швидкості ПП з 5 до 7 м/с – вона зменшується на 15,9%, з 0,22 до 0,185 м. Одержані результати узгоджуються з даними теоретичних досліджень з розбіжностями 3-5%. Це підтверджує адекватність побудованих математичних моделей динаміки процесу очищення ЗС.

Відносна ефективність процесу очищення розробленим ПСП у порівнянні з

серійним збільшується на 30-40 % і досягає 70 % при паспортній продуктивності в 25 т/год (рис. 12).

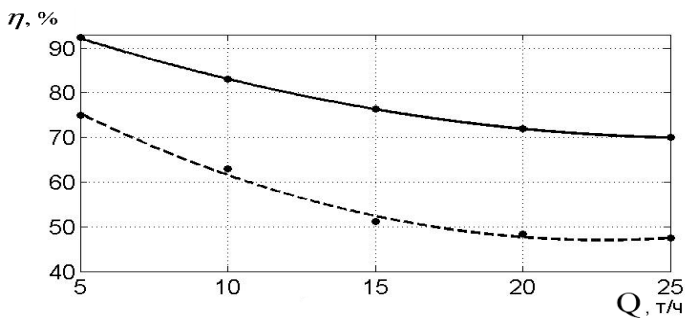


Рис. 12. Залежності ефективності процесу очищення ЗС від продуктивності ПСП: — розробленого; - - - - серійного

Застосуванням методики планування факторного експерименту одержано рівняння регресії (у розкодованому виді):

$$Y = 6,936 + 100,215S^* + 3,041n^* + 15,683q_B^* + 427,31B^* + 198,796z^* - 5,1824S^*n^* + 4,0027S^*q_B^* - 303,5S^*B^* - 145,36S^*z^* - 7,331B^*n^* - 7,963n^*z^* - 48,4533B^*q_B^* + 20,224z^*q_B^* - 822B^*z^* - 98,5S^{*2} - 0,0874n^{*2} - 3,2467q_B^{*2} - 798,48B^{*2} - 545,68z^{*2} \quad (32)$$

Встановлені оптимальні конструктивно-технологічні параметри ПСП: кількість каскадів $n^* = 3$; витрата повітря (визначає швидкість ПП у різних перетинах) $q_B^* = 1,68 - 1,82 \text{ м}^3/\text{с}$; відстань від основи нижнього конуса каскадної поверхні до повітрязабірних вікон $z^* = 0,06 - 0,08 \text{ м}$; сумарна площа продувки кільцевих зон $S^* = 0,19 - 0,21 \text{ м}^2$; ширина основної кільцевої зони очищення $B^* = 0,13 - 0,14 \text{ м}$.

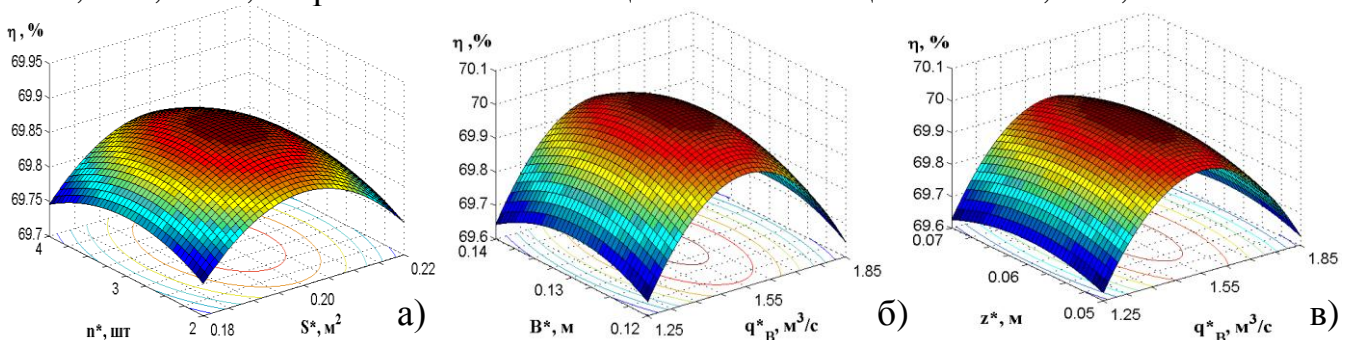


Рис. 13. Залежності ефективності процесу очищення від: а) площі продувки кільцевих зон та кількості каскадів; б) витрат повітря та ширини кільцевої зони; в) витрат повітря та висоти розташування повітрязабірних вікон

У п'ятому розділі наведено результати виробничих випробувань розробленого ПСП. Виробничі випробування проведені в умовах дослідного поля «Центральне» ХНТУСГ спільно з фахівцями ВАТ «Вібросепаратор». Встановлено, що продуктивність сепаратора підвищилася на 12-15 %, відносна ефективність процесу очищення розробленим ПСП – на 30-40 %, і при продуктивності 25-28 т/год складає до 70 %. Питомі енергоємність та металомісткість процесу очищення ЗС розробленим ПСП знижені з 0,17 кВт·год/т до 0,15 кВт·год/т – на 11,8 %; з 4,4 кг/т·год до 3,96 кг/т·год – на 10 %, відповідно.

Щорічний економічний ефект від застосування сепаратора СВС-25 з розробленим ПСП на полі «Центральне» складає біля 32 тис. грн. З 2009 р. розроблений віяло-кільцевий конусно-каскадний ПСП впроваджено в серійне виробництво ВАТ "Вібросепаратор" з річним економічним ефектом 935 тис. грн при програмі випуску вібровідцентрових сепараторів-ворохоочисників СВС-25 – 50 шт.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукового завдання, що виявляється в обґрунтуванні процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим ПСП зернових вібровідцентрових сепараторів як процесу нелінійної динаміки суцільного трифазного середовища «зерно - легкі домішки - повітряний потік» з реологічними законами, які враховують вплив в'язких, гідродинамічних, інерційних сил, неоднорідності поля швидкостей рухливих взаємопроникних континуумів. Це дозволило підвищити ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок, збільшити продуктивність вібровідцентрових зернових сепараторів, впровадити розроблений ПСП в серійне виробництво ВАТ «Вібросепаратор» (м. Житомир).

Головними підсумками виконаної роботи є наступні результати:

1. Проведеним аналізом результатів відомих досліджень встановлено, що існуючі ПСП вібровідцентрових зернових сепараторів задовольняють зростаючі вимоги виробництва не в повній мірі. Збільшення засміченості зерна і зростання продуктивності сепараторів призводять до підвищення кількості легких домішок в ЗС і зниження ефективності процесу очищення. Для інтенсифікації процесу очищення і забезпечення необхідної його якості розроблено новий віяло-кільцевий конусно-каскадний ПСП, що має основну і три додаткові кільцеві зони очищення. Для визначення конструктивних параметрів розробленого ПСП необхідно виконати теоретичні та експериментальні дослідження, які б дозволили керувати і розраховувати технологічні показники процесу очищення ЗС від легких домішок.

2. Для встановлення закономірностей руху потоку ЗС по ТР і сходу з нього, визначення складових швидкостей і траєкторій зернових частинок і легких домішок перед входженням в основну кільцеву зону очищення створено математичну модель нелінійної динаміки двофазного потоку. Отримано залежності швидкостей сходу зернових частинок і домішок. Встановлено, що на швидкість сходу зернових частинок найбільш впливають: кутова швидкість ТР, збільшення якої з 11,2 до 21,2 с^{-1} збільшує її в 3,6 разів, з 6,7 до 24 м/с, і діаметр ТР, збільшення якого з 0,5 до 0,6 м підвищує її в 1,5 разів, з 6,7 до 9,8 м/с. Зменшення насипної щільності зернової фази ЗС з 750 до 600 $\text{кг}/\text{м}^3$ знижує її на 22%, з 6,7 до 5,2 м/с. Визначено, що швидкість сходу частинок домішок зі збільшенням кутової швидкості і діаметра ТР також збільшується в 3,1 і 1,5 разів, відповідно. Збільшення розмірів частинок і насипної щільності домішкової фази від 1 до 3 мм і з 150 до 450 $\text{кг}/\text{м}^3$ швидкість сходу зменшують незначно – на 5 та 6 %, відповідно з 6,5 до 6,15 м/с і з 6,4 до 6 м/с. Зменшення насипної щільності зернової фази, як несучої, з 750 до 600 $\text{кг}/\text{м}^3$ знижує швидкість сходу частинок домішок на 18 %, з 6,2 до 5,1 м/с. При кутовій швидкості ТР в 11,2 с^{-1} спостерігається поява застійних утворень ЗС поблизу осі обертання, а при $\Omega \geq 16,2 \text{ с}^{-1}$ – вони відсутні.

3. Для розрахунку і керування якістю та продуктивністю процесу очищення створена математична модель нелінійної динаміки потоку ЗС в основній кільцевій зоні. Отримано залежності вертикальних складових швидкостей і траєкторій вилучаємих частинок від параметрів ПСП і фізико-механічних властивостей домішок. Встановлено, що вертикальна складова швидкостей вилучаємих домішок з

підвищенням кутової швидкості TR з 11,2 до 16,2 с^{-1} збільшується в 2,1 разів, з 1,5 до 3,2 м/с, на початку кільцевої зони, і в 1,5 разів, з 1,9 до 2,9 м/с, в кінці. Підвищення швидкості ПП з 5 до 7 м/с збільшує її в 1,3 разів, з 1,6 до 2,1 м/с, на початку кільцевої зони, і в 1,5 разів, з 1,9 до 2,9 м/с, в кінці. Збільшення насипної щільності домішкової фази знижує її на 31 %, з 2,6 до 1,8 м/с, в кінці кільцевої зони, а підвищення розмірів частинок з 1 до 3 мм знижує її там же на 50 %, з 3,2 до 1,6 м/с. Траєкторії частинок дозволили визначити можливість їх вилучення і розрахувати ширину кільцевої зони. Відхилення напрямку ПП від вертикалі до 30° і зменшення кута надходження домішок в основну кільцеву зону з 45° до 15° збільшують її в 1,4 разів, з 0,2 до 0,27 м, і в 1,9 разів, з 0,14 до 0,27 м, відповідно.

4. Для розрахунку і керування якістю та продуктивністю процесу очищення ЗС створена математична модель нелінійної динаміки трифазного суцільного середовища на конусно-каскадній поверхні ПСП. Максимальна довжина стійкого шару збільшується в 6 разів, з 0,1 м до 0,6 м, з підвищенням початкової швидкості ЗС від 0,5 до 1,5 м/с, і збільшується також на 59-68 % зі збільшенням кута установки каскадів поверхні з 30° до 60° . Вертикальна складова швидкості частинок домішок, що вилучаються з шару, зменшується зі збільшенням їх розмірів і насипної щільності та підвищується зі зростанням швидкості ПП. Ефективність процесу очищення збільшується із зростанням швидкості ПП від 5 до 7 м/с і для частинок з насипною щільністю до 300 $\text{кг}/\text{м}^3$ збільшується в 1,5 разів.

5. Експериментальним методом із застосуванням швидкісної відеозйомки і тензометрування визначені значення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості засмічених ПП, які складають $\mu_3 = (18,01-18,66) \cdot 10^{-6}$ Па·с і збільшуються незначно на 1,3-2,9 % з підвищенням швидкості ПП з 5 до 7 м/с; на 2,5-5,4 % зі збільшенням засміченості ЗС з 5 до 10 %; на 0,8-3,7 % з підвищенням продуктивності з 5 до 25 т/год. Протяжність проекцій траєкторій домішок, що вилучаються, в основній кільцевій зоні очищення ПСУ збільшується: при підвищенні кутової швидкості TR з 6,2 до 12,4 с^{-1} в 4,3 разів, з 0,045 до 0,195 м; зі зростанням розміру домішок з 0,001 до 0,002 м в 1,8 разів, з 0,14 до 0,25 м; зі збільшенням насипної щільності домішкової фази з 150 до 450 $\text{кг}/\text{м}^3$ в 1,6 разів, з 0,16 до 0,25 м. При зростанні швидкості ПП з 5 до 7 м/с – вона зменшується на 15,9%, з 0,22 до 0,185 м. Одержані результати узгоджуються з даними теоретичних досліджень з розбіжностями 3-5%. Це підтверджує адекватність побудованих математичних моделей динаміки процесу очищення ЗС.

6. Комплексним аналізом результатів теоретичних і експериментальних досліджень, проведеного факторного експерименту визначено оптимальні значення конструктивно-технологічних параметрів ПСП: кількість каскадів $n^* = 3$; витрата повітря $q_B^* = 1,68-1,82$ $\text{м}^3/\text{с}$; відстань від основи нижнього конуса каскадної поверхні до повітрязабірних вікон $z^* = 0,06-0,08$ м; сумарна площа продувки кільцевих зон $S^* = 0,19-0,21$ м^2 ; ширина основної кільцевої зони очищення $B^* = 0,13-0,14$ м.

7. Виробничими випробуваннями сепаратора-ворохоочисника з розробленим ПСП в умовах дослідного поля «Центральне» ХНТУСГ встановлено, що в порівнянні з серійним відносна ефективність процесу очищення ЗС підвищено на 30-40 %. Питомі енергоємність і металомісткості процесу очищення від легких

домішок знижені з 0,17 кВт·год/т до 0,15 кВт·год/т (на 11,8 %), з 4,4 кг/т·год до 3,96 кг/т·год (на 10 %), відповідно; продуктивність сепаратора підвищено на 12-15% і складає 28 т/год з ефективністю очищення від легких домішок до 70%. Щорічний економічний ефект від використання на дослідному полі «Центральне» складає біля 32 тис. грн.

8. На підставі результатів проведених спільних виробничих випробувань з фахівцями ВАТ "Вібросепаратор" розроблений ПСП з 2009 р. впроваджено в серійне виробництво вібровідцентрових сепараторів ВАТ «Вібросепаратор» (м. Житомир) з річним економічним ефектом 935 тис. грн при програмі випуску вібровідцентрових сепараторів СВС-25 – 50 шт.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Слипченко М.В. К производственным испытаниям ворохоочистителя СВС-15 с разработанным пневмосепарирующим устройством / М.В. Слипченко // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСХ ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2009. – Вип. 88. – С. 88-95.

2. Слипченко М.В. Оптимизация конструктивно-технологических параметров пневмосепарирующего устройства виброцентробежных зерновых сепараторов / М.В. Слипченко // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2010. – Вип. 93, Т.1.– С. 214-222.

3. Тищенко Л.Н. К исследованию динамики продуваемого слоя зерновой смеси / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, Т.7. – С. 201-209 (Здобувачем одержано математичні вирази для розподілу швидкості та тиску повітряного потоку, зміни об'ємної щільності по товщині шару суміші).

4. Тищенко Л.Н. Динамика извлечения легких примесей пневмосепарирующим устройством виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 1 (61). – С. 186-193 (Здобувачем одержано рівняння руху компонентів багатофазного середовища та отримано їх чисельний розв'язок).

5. Тищенко Л.Н. К построению внутренних поверхностей тарельчатого разбрасывателя виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 3 (63). – С. 119-125 (Здобувачем визначено коефіцієнти першої, другої і третьої квадратичних форм поверхонь. Складено рівняння нерозривності потоку ЗС з урахуванням одержаних значень).

6. Тищенко Л.Н. К составлению граничных условий и уравнений динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. – Луганськ: ЛНАУ, 2011. – № 30. – С. 296-304 (Здобувачем складені граничні умови та рівняння динаміки з урахуванням геометрії ТР).

7. Тищенко Л.Н. К составлению уравнений динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – Вип. 41, Ч.1. – С. 62-67 (Здобувачем одержано рівняння кривої, що описує поверхню ТР).

8. Тищенко Л.Н. К определению осредненных компонентов тензора вязких напряжений зерновой смеси на разбрасывателе пневмосепарирующего устройства / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2011. – Вип.119. – С. 21-27 (Здобувачем отримано осереднені значення компонентів тензора в'язких напружень).

9. Тищенко Л.Н. Осредненные уравнения динамики зернового слоя на тарельчатом разбрасывателе пневмосепарирующего устройства / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 4 (64). – С. 117-124 (Здобувачем складено граничні умови та замикаючі співвідношення).

10. Тищенко Л.Н. Уравнения динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 1 (65). – С. 123-127 (Здобувачем складено інтегро-диференціальне рівняння балансу маси ЗС на ТР, отримані рівняння для випадку стаціонарного руху).

11. Тищенко Л.Н. Экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости засоренного воздушного потока при очистке зерновых смесей пневмосепарирующим устройством / Л.Н. Тищенко, М.В. Слипченко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 3 (67). – С. 138-143 (Здобувачем проведені експерименти та встановлено значення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості засміченого ПП).

Додаткові публікації

12. Пат. 50587 Україна, МПК⁹ В07В 1/00, В07В 4/00. Вібровідцентровий сепаратор / Тищенко Л.М., Пастушенко М.Г., Харченко С.О., Слипченко М.В.; заявник та власник Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. № u 201000743; заявл. 26.01.10; опубл. 10.06.10, Бюл. №11/2010.

13. Слипченко М.В. Розробка віяло-кільцевого конусно-каскадного пневмосепаруючого пристрою / М.В. Слипченко // Материали V-го міжнародного форуму молодіжи "Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке". – Харьков. ХНТУСХ, 2009. – С. 83.

14. Слипченко М.В. Динамика движения зерновых смесей с примесями на тарельчатом разбрасывателе пневмосепарирующего устройства / М.В. Слипченко // Материали VIII-го міжнародного форуму молодіжи "Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке". – Харьков. ХНТУСХ, 2012. – С. 47.

АНОТАЦІЇ

Сліпченко М.В. Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневмосепаруючого пристрою вібровідцентрових зернових сепараторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2013.

У дисертації вирішене наукове завдання, яке направлене на підвищення ефективності процесу очищення ЗС від легких домішок, шляхом обґрунтування параметрів процесу та розробки нового ПСП. Побудовані математичні моделі нелінійної динаміки процесу очищення ЗС в основній кільцевій зоні і на конусно-каскадній поверхні ПСП. Отриманими залежностями визначені траєкторії та швидкості частинок зерна та домішок, встановлено ефективність процесу очищення. Обґрунтовані конструктивно-технологічні параметри розробленого ПСП. Відносну ефективність процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим ПСП збільшено на 30-40 %, яка при продуктивності сепаратора-ворохоочисника СВС-25 25-28 т/год складає до 70 %. Розроблений ПСП впроваджено в серійне виробництво вібровідцентрових сепараторів ВАТ «Вібросепаратор».

Ключові слова: зернові суміші, процес очищення, легкі домішки, вібровідцентрові сепаратори, пневмосепаруючий пристрій, ефективність.

Слипченко М.В. Обоснование параметров процесса и разработка пневмосепарирующего устройства виброцентробежных зерновых сепараторов. – Рукопись.

Диссертация на соискания 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. Харьков, 2013.

В диссертации решено научное задание, которое направлено на повышение эффективности процесса очистки ЗС от легких примесей, путем обоснования параметров процесса и разработки нового ПСУ. В разработанном ПСУ созданы три дополнительные зоны очистки на воздухопроницаемой конусно-каскадной поверхности, что, вместе с увеличением основной кольцевой зоны и при сохранении габаритных размеров конструкции, позволило увеличить качество очистки ЗС от легких примесей. Объектом исследования является процесс очистки ЗС от частиц легких примесей, связь процесса с конструктивно-технологичными параметрами ПСУ, физико-механическими свойствами ЗС.

Созданы математические модели нелинейной динамики сплошной трехфазной среды «зерно - легкие примеси - воздушный поток», учитывающие взаимодействие фаз как сплошных сред с реологическими законами, определяющими влияние вязких, гидродинамических, инерционных сил, неоднородности поля скоростей подвижных взаимопроникающих континуумов. Решением моделей определены: закономерности устойчивости продуваемого слоя, траекторий и скоростей легких примесей разных размеров и плотности. Для оценки влияния разработанного ПСУ

на эффективность очистки ЗС от легких примесей выполнено комплексное обоснование его конструктивно-технологических параметров. Для определения коэффициента динамического вязкости запыленного ВП использован экспериментальный метод.

Применением методики планирования факторного эксперимента установлены оптимальные конструктивно-технологические параметры ПСУ: количество каскадов $n^*=3$; расход воздуха (определяет скорость ВП в разных сечениях) $q^*_B=1,68-1,82 \text{ м}^3/\text{с}$; расстояние от основания нижнего конуса каскадной поверхности до воздухозаборных окон $z^*=0,06-0,08\text{м}$; суммарная площадь продувки кольцевых каналов $S^*=0,19-0,21 \text{ м}^2$; ширина кольцевого канала основной зоны очистки $B^*=0,13-0,14 \text{ м}$.

Производственными испытаниями, проведенными на поле "Центральное" ХНТУСХ совместно со специалистами ОАО "Вибросепаратор", установлено, что производительность сепаратора повысилась на 12-15%, а относительная эффективность очистки разработанным ПСП - на 30-40%, и при производительности 25-28 т/ч составляет до 70%. Удельные энерго- и металлоемкость процесса очистки ЗС разработанным ПСУ снижены с 0,17 кВт·ч/т до 0,15 кВт·ч/т - на 11,8%, с 4,4 кг/т·ч до 3,96 кг/т·ч - на 10%, соответственно. Ежегодный экономический эффект от применения сепаратора СВС-25 с разработанным ПСУ в условиях опытного поля "Центральное" ХНТУСХ составляет около 32 тыс. грн. С 2009 г. разработанное веерно-кольцевое конусно-каскадное ПСУ внедрено в серийное производство ОАО "Вибросепаратор" с годовым экономическим эффектом 935 тыс. грн при программе выпуска виброцентробежных сепараторов-ворохоочистителей СВС-25 - 50 шт.

Ключевые слова: зерновые смеси, процесс очистки, легкие примеси, виброцентробежные сепараторы, пневмосепарирующее устройство, эффективность.

Slipchenko M.V. Ground process parameters and development pneumoseparating device of vibrocentrifugal grain separators. – Manuscript.

Dissertation for the Candidate of technical sciences degree. Speciality 05.05.11. – Machines and means of farm production mechanization. – Petro Vasilenko Kharkov National technical university of agriculture. Kharkov, 2013.

A scientific task is sent to increase quality of grain mixture cleaning process from light impurities through investigation of the process parameters and the development of new pneumoseparating device. The mathematical model of the nonlinear dynamics of the solid-phase medium "grain - light impurities- air flow", taking into account the interaction between the phases as a continuum with rheological law, which determinate the effect of viscous, hydrodynamics, inertial forces, moving interpenetrating continua are got. Production tests revealed that the performance of the separator has increased to 12-15%, and relative efficiency of treatment by developed pneumoseparating device – to 30-40%, and with productivity of 25-28 t/h increase up to 70%. Pneumoseparating device introduced in series production of "Vibroseparator" with an annual savings of 935 thousands grn with program at issue vibrocentrifugal separators SVS 25 – 50 items.

Key words: grain mixture, the process of cleaning, light impurities vibrocentrifugal separators pneumoseparating device, efficiency.

Підписано до друку 20.12.2012 р. Формат 60x84 1/16
Умов. друк. Арк. 0,9. Папір офсетний. Наклад 100 прим. Зам. 705
Друк РІЗО.

КП "Міська друкарня", м. Харків, 61002, вул. Артема, 44.
Свідоцтво про державну реєстрацію серія ДК, № 3613,
Від 29.10.2009 р.