

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 20 р.
Зав. кафедри к.т.н., доцент
(науковий ступінь, вчене звання)
Андрій ВОЙТІК
(підпис) (ініціали, прізвище)

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістр

(освітній рівень)

тема роботи «ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ
СУМІШЕЙ І РОЗРОБКА ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНОГО КАНАЛУ
ЗЕРНОВИХ СЕПАРАТОРІВ»

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208
«Агроінженерія»
Король В.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.е.н., доцент, Кутковецька Т.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та
ініціали)

м. Умань – 2023 рік

РЕФЕРАТ

Король В.А. Дослідження процесу очищення зернових сумішей і розробка пневмосепарувального каналу зернових сепараторів (Дипломна робота, Уманський національний університет садівництва, 2023: пояснювальна записка на 62 сторінках, у т.ч. 5 розділів, 51 рисунок, 1 таблиця, 19 джерел літератури).

Дипломна робота присвячена вирішенню завдання підвищення ефективності процесу очищення зернових сумішей в пневмосепарувальних каналах, які входять до складу зернових сепараторів та визначають їх продуктивність.

На підставі оцінки і проведеного аналізу результатів досліджень обґрунтовано перспективний напрямок підвищення продуктивності очищення зернових сумішей від легких домішок із застосуванням розробленого пневмосепарувального каналу з розшарувальним пристроєм.

Метою дипломної роботи є підвищення продуктивності барабанних зернових сепараторів шляхом обґрунтування параметрів пневмосепарувального каналу з розшарувальним пристроєм.

Об'єкт дослідження – процес очищення зернових сумішей від легких домішок, його зв'язок з конструктивними параметрами ПСК.

Предмет дослідження – рух зернових сумішей в робочих зонах розшарувального пристрою та вертикального каналу, їх інтенсифікація та обґрунтування параметрів розробленого ПСК.

Ключові слова: ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИЙ КАНАЛ, ЗЕРНОВІ СУМІШІ, ЗЕРНОВІ СЕПАРАТОРИ, ПРОЦЕС ОЧИЩЕННЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ.....	9
1.1. Характеристики зернового вороху і технологічні показники процесу його очищення.....	9
1.2. Аналіз досліджень процесів, способів очищення зернових сумішей від легких домішок і конструкцій пневмосепарувальних каналів.....	10
1.3. Обґрунтування мети та завдання досліджень.....	19
Висновки по розділу.....	20
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ.....	21
2.1. Математичні моделі процесу очищення зернових сумішей від легких домішок.....	21
2.2. Моделювання розшарування зернової суміші на повітропроникній лускатій поверхні розробленого пневмосепарувального каналу.....	22
Висновки по розділу.....	35
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ.....	37
3.1. Ефективність процесу очищення зернової суміші розробленим пневмосепарувальним каналом.....	37
3.2. Закономірності руху компонентів зернових сумішей.....	44
3.3. Закономірності зміни пористості зернових сумішей.....	50
3.4. Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів пневмосепарувального каналу.....	51
Висновки по розділу.....	52
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	53
4.1. Організація умов та заходів з охорони праці на підприємстві.....	53
4.2. Моделювання процесів виникнення травм при роботі із зерновими	54

сепараторами.....	
Висновки по розділу.....	55
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ	
РОЗРОБЛЕНОГО ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНОГО КАНАЛУ.....	56
Висновки по розділу.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

ВСТУП

Основним завданням АПК України є забезпечення населення високоякісними і екологічно безпечними продуктами харчування, промисловість – сировиною, а також – формування експортного потенціалу. Україна, завдяки сприятливим природно-кліматичним умовам, є потужним світовим виробником основних зернових культур: пшениця, кукурудза, соняшник, ячмінь та ін. Збільшення виробництва зернових культур та їх експорту на основі застарілої матеріально-технічної бази господарств та зернопереробних підприємств вимагає інтенсифікації технологічних процесів роботи зернових сепараторів.

Технології очищення зернових матеріалів визначаються технічним рівнем зерноочисних машин і обладнання. Процес очищення ЗС здійснюється за різними ознаками розділення: аеродинамічні властивості, розмірні характеристики, щільність, стан поверхні, форма та ін. Найпоширенішими (42%) є машини універсального призначення з повітряно-решітними робочими органами.

Подальше підвищення обсягів виробництва зерна, підвищення засміченості зернових сумішей (ЗС) ведуть до того, що пневмосепарувальні канали (ПСК) сучасних зерноочисних машин мають недостатню пропускну здатність. Також слід відмітити, що стислі агростроки виконання зерноочисних робіт (внаслідок засміченості та вологості вороху) при недостатньо ефективній пневмосепарації призводить до багаторазових пропусків ЗС через робочі органи. Це призводить до втрат зерна у відходи та його травмування, збільшення експлуатаційних витрат та собівартості виконання робіт. Тому, враховуючи це, дослідження щодо удосконалення зернових сепараторів є актуальними.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ

1.1. Характеристики зернового вороху і технологічні показники процесу його очищення

ЗС, що надходить у ПСК, представляє гетерогенну систему, яка складається з газоподібної (повітряної), зернової та домішкової фаз.

Для підприємств, що займаються зберіганням і переробкою зерна, домішки – це неоднорідна система частинок, які мають різну геометричну форму, розміри та густину. Домішки комплексно характеризуються як основними геометричними ознаками (дисперсний склад, форма, макро- і мікрорельєф поверхні), так і такими фізико-механічними властивостями, як масові (густина однієї та сукупності частинок); аеродинамічні (обумовлені в'язкісним та динамічним опором повітряному середовищу); електрофізичні; теплофізичні та ін. Важливішою фізико-механічною характеристикою домішок, з точки зору пневмосепарації, є дисперсність – інтервальний розподіл частинок за крупністю.

Засміченість зернового вороху смітними та зерновими домішками залежить від природно-кліматичних умов, рівня агротехніки, стиглості хлібів, а також від якості роботи зернозбиральних комбайнів, та складає від 1 до 25% [7], причому вміст легких домішок – до 5%. Така кількість легких домішок потребує використання ефективного ПСК.

Проведений аналіз відділених повітряним потоком легких домішок [8] (для певної ЗС) дозволив встановити наступні фракції: бите зерно – 27,5%, щупле зерно – 29,1%, насіння смітних рослин – 22%, смітні домішки органічні – 20,9%, зерно основної культури – 0,5%.

Сортування та очищення ЗС засноване на здатності частинок чинити різну протидію повітряному потоку в залежності від їх властивостей. Ці фізичні властивості називають аеродинамічними властивостями частинок ЗС, а відповідна реакція зі сторони повітряного потоку – опір середовища [8].

Для роботи ПСК потрібен повітряний потік, який створюється вентилятором. Виконання технологічного процесу вимагає енергію на приведення в дію вентилятора, на подолання гідравлічного опору системи.

ПСК сепаратора, особливо мобільної машини, повинен бути легшим та займати найменший обсяг. Чим досконаліша конструкція, тим менші габаритні розміри та вага при всіх рівних умовах. Для оцінки габаритних і вагових показників ПСК використовують показники питомої ваги та об'єму по відношенню до продуктивності.

1.2. Аналіз досліджень процесів, способів очищення зернових сумішей від легких домішок і конструкцій пневмосепарувальних каналів

Підвищення продуктивності сепараторів з дотриманням відповідної якості очищення ЗС, обумовлено інноваційними способами та конструкціями ПСК.

Експериментальні та теоретичні дослідження процесу очищення зерна повітряним потоком, практика експлуатації зернових сепараторів визначили технологічні фактори, що впливають на ефективність процесу [8]: питома завантаження та початкова швидкість частинок зернового вороху; швидкість та рівномірність повітряного потоку.

Експериментами [4, 8] встановлено, що початкова швидкість вводу ЗС у ПСК, направлення руху впливає на ефективність розділення. Визначено способи подачі ЗС: за допомогою направляючої, що встановлена з нахилом; вібруючим лотком; рифленим живильником-валком. Дослідниками визначено, що оптимальна швидкість вводу ЗС складає $0,3 \dots 0,4$ м/с. При цьому кут нахилу направляючої поверхні приймають до кута тертя зерна по металу, а саме $25 \dots 35^\circ$.

Ще одним з технологічних параметрів роботи ПСК є швидкість та рівномірність повітряного потоку в робочій зоні. Якість розділення компонентів ЗС перш за все залежить від різниці швидкості витання зерна та домішок, забезпечення певної швидкості повітряного потоку.

Так в роботах [1] для забезпечення швидкості та рівномірності використано системи жалюзі, що дозволяють регламентувати величину швидкості у заданій точці робочої зони.

Таким чином, підвищити продуктивність та якість ПСК можливо шляхом забезпечення оптимальних технологічних параметрів.

Проведений огляд існуючих конструкцій ПСК виявив різницю в їх класифікації. У роботі [5] ПСК поділяють на машини з розімкненим та замкненим циклами повітряного потоку.

В практиці конструювання повітроочисних систем комбінованих зерноочисних машин набули розвитку три основні конструктивні схеми [1, 2 та ін.]: одноканальні, секційні та безканальні.

Спеціальні зерноочисні сепаратори для очищення ЗС від легких домішок з одночасним сортуванням матеріалу за різницею аеродинамічних властивостей їх компонентів сформованим повітряним потоком розрізняють за розміщенням сепарувальних каналів: з вертикальним, нахиленим і горизонтальним [1, 4 та ін.].

У роботі [12] ПСК класифікують за конструктивними особливостями: вертикальні, вертикальні з сіткою в робочій зоні, канали з подачею за периметром труби, кільцеві, канали з регульовальним перетином робочої зони.

В результаті проведеного аналізу встановлено конструкції ПСК:

- від наявності каналів: безканальні (рис. 1.1, а), канальні (рис. 1.1, б-л),
- за принципом дії: пасивні (рис.1.1, а-к), активні (обертальні) (рис.1.1, л);
- за розташуванням: одноканальні (рис.1.1, б-ж, і-л), секційні (рис. 1.1, з);
- за формою перетину каналів: прямокутні (рис.1.1, в, д, з, к), круглі (рис. 1.1, д, е), кільцеві (рис.1.1, і);
- за направленням каналів: вертикальні (рис.1.1, б-е, з-к), горизонтальні (рис. 1.1, а), похилі (рис.1.1, ж);
- за типом руху повітряного потоку: нагнітальні (рис. 1.1, а, б, ж), всмоктувальні (рис. 1.1, в, д, е, з-л), всмоктувально-нагнітальні (рис. 1.1, г).

– за типом пневмосистеми: машини з розімкненим (рис. 1.1, а,-в, д-л) та замкненим циклами повітряного потоку (рис. 1.1, г).

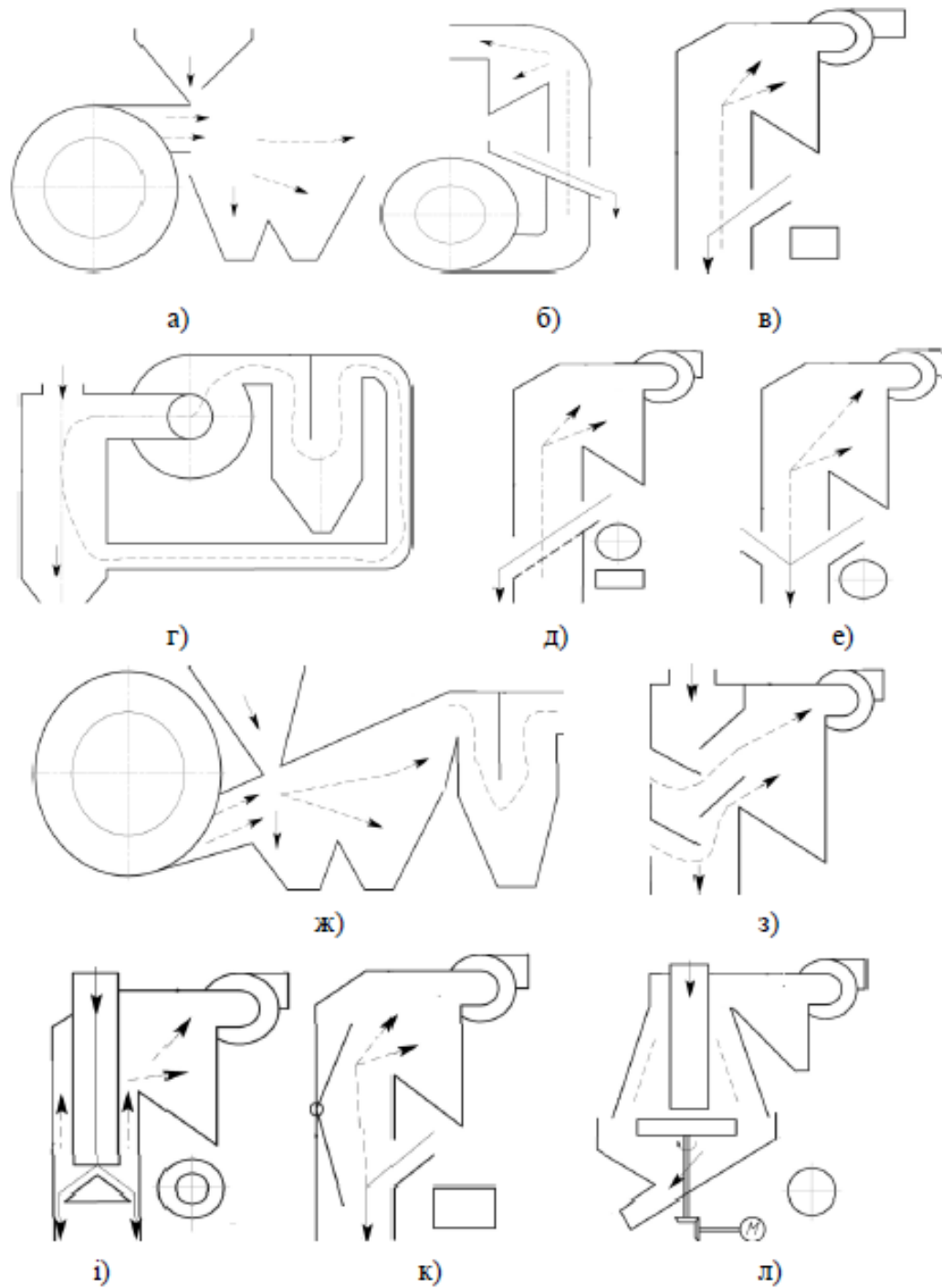


Рисунок 1.1 – Схеми пневмосепарувальних пристроїв

Недостатньо ефективним є використання безканалних ПСК внаслідок: відсутності рівномірності повітряного потоку, значними габаритними розмірами, низькою якістю очищення та високою енергоємністю. Розрізняють безканалні ПСК: нагнітальні, наприклад, віялки-сортувалки або нагнітальні

Тріумф – 100 фірми Leino (Фінляндія); всмоктувальні, наприклад, канали сепаратора фірми Miag (Німеччина). Відсутність повітроочисників у більшості безканальних сепараторів не дозволяє використовувати їх у приміщеннях.

Канальні ПСК внаслідок концентрування дії повітряного потоку на шар ЗС мають більш якісне очищення у порівнянні з безканальними. До однієї із перехідних моделей можна віднести сепаратори з горизонтальним каналом «САД» (рис. 1.1, ж). Під дією аеродинамічних сил та гравітації компоненти вихідної суміші рухаються по відмінним траєкторіям і потрапляють до приймачів. Недоліком є значна нерівномірність потоку всередині робочої камери, що знижує якість розділення суміші на фракції.

В роботі А.С. Матвеева [8] наведено аналіз ефективності роботи ПСК різної форми: прямокутної, квадратної, круглої, кільцевої. Дослідження проводились на ЗС за різного їх складу та питомого завантаження. Встановлено, що рівномірність поля швидкості повітряного потоку найвища в каналах круглої та кільцевої форми, далі – прямокутної та квадратної. Аналогічно відбувається з ефективністю очищення ЗС, відповідно до форми каналу та його завантаження.

Прямокутні ПСК є поширеними на зернових сепараторах (рис. 1.2).

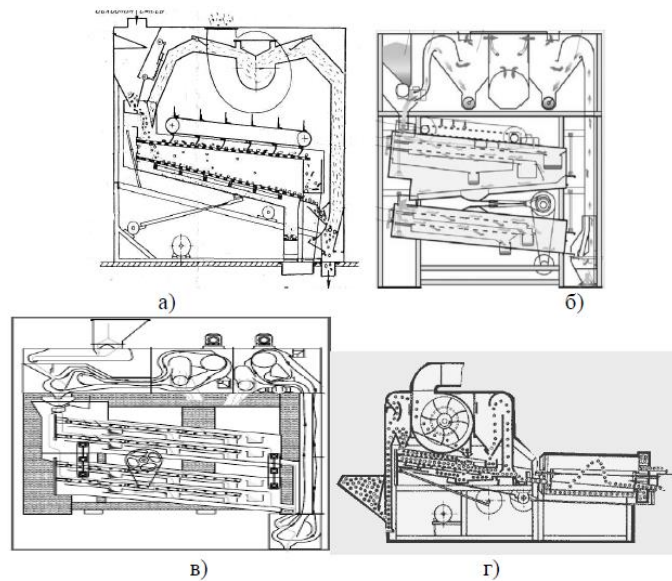


Рисунок 1.2 – Схема технологічного процесу сепараторів

а – PETKUS K 523; б – аспіраційна система зерноочисника PETKUS U12/U15;
в – Cimbria Delta Combi Cleaner 157; г – насінне-сортувальна машина K 541
Gigant фірми PETKUS

Одноканальні повітряноочисні системи у сепараторах, як правило, включають приймальну камеру, ПСК (переважно вертикальний), пилоосаджувальну камеру, вентилятор. Використання таких пристроїв передбачає відділення домішок на початковому етапі, що розвантажує решета та підвищує продуктивність сепараторів.

При підготовці насіннєвого матеріалу або роботи в приміщеннях використовують ПСК з секційними каналами (колонка БКА) (рис. 1.1, з) та багатократним очищенням (рис. 1.1, г). Такі конструкції мають переваги: низький викид пилу, зменшення металоємності за рахунок спрощеної осаджувальної системи, зменшення повітрообміну. До недоліків відносять необхідність герметичності, складність конструкції і експлуатації машини. ПСК з розімкнутим циклом потребують ефективних пиловловлювачів, які забезпечують нормовану запиленість робочої зони відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 [4].

Для підвищення якості очищення ЗС від легких домішок використовують багатократне очищення (рис. 1.3, 1.4). Подібне очищення забезпечується за рахунок замкнутої системи (рис. 1.3) або використанням двох каналів (основного та каналу другої аспірації). Подвійні ПСК є елементами в двократній аспіраційній системі з замкнуто–розімкнутим циклом повітрообміну конструкції А.І. Буркова, сепараторі Denis NSD-3 [18] та сепараторі TAS 152A-2 [19].

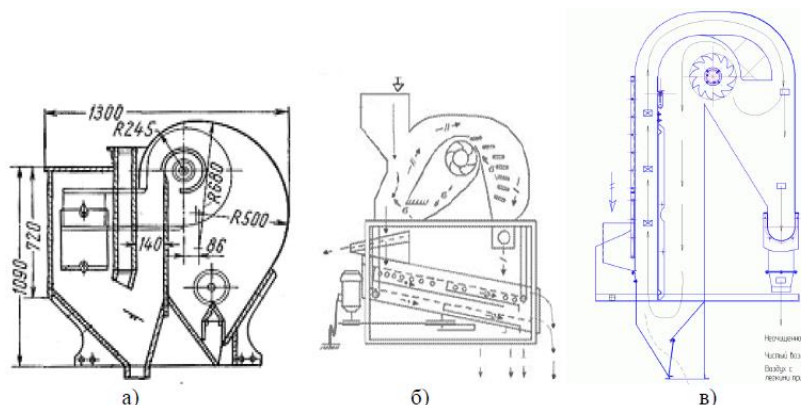


Рисунок 1.3 – Схеми пневмосепарувальних пристроїв з замкнутою системою циркуляції повітря

а – 3Д-2,5; б – машина МОЗ-50 (Агротек); в – сепаратор БСХ-100 [7]

Таке розташування каналів збільшує ефективність очищення ЗС від домішок але потребує незалежного регулювання кожного та потребує підвищення витрати повітря та ускладнює конструкцію.

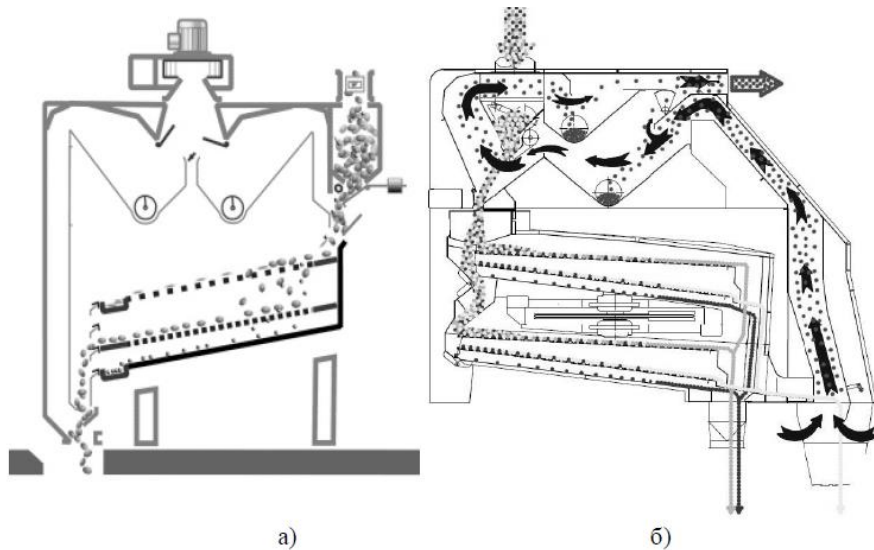


Рисунок 1.4 – Пневмосепарувальні пристрої з багатократним очищенням
а – сепаратора Denis NSD-3; б – сепаратор TAS 152A-2

Більш удосконалену конструкцію кільцевого ПСК розроблено Гончаровим Є.С. [8] впроваджено у серії вібровідцентрових сепараторах (СВС-5, СВС-15, СВС-25, Р8-БЦСМ-25, Р8-БЦСМ-50, А1-БЦСМ-100), де використано активний обертальний розкидач (рис. 1.5, а). Для рівномірності подачі зернового матеріалу в кільцевий канал тарілчастий розкидач виконано в формі пологого усіченого конусу, з встановленими лопатками.

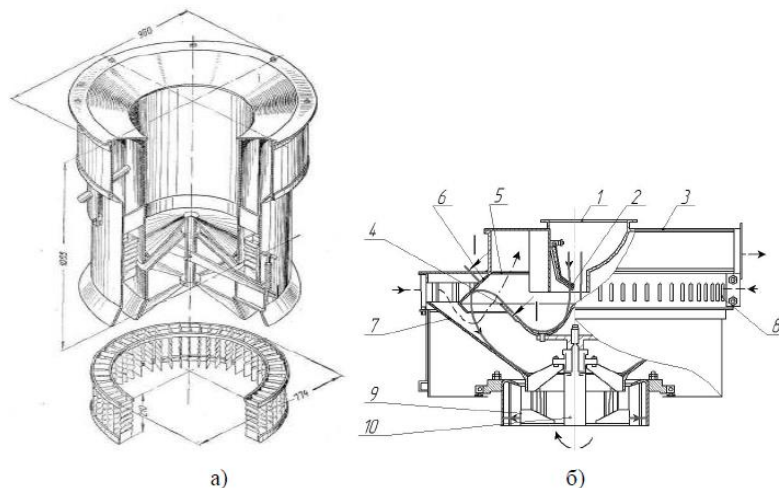


Рисунок 1.5 – Схеми сепараторів з кільцевим пневмосепарувальним пристроєм
а – кільцевий ПСК; б – ПСК сепараторів СВС та БЦС

Для підвищення ефективності розділення ЗС в роботі [1] пропонується встановлення вирівнювальних пластин-жалюзі у вертикальній та повздовжній площині. Вирівняний потік та задана швидкість повітряного потоку за шириною робочої зони дозволили підвищити ефективність очищення ЗС до 20%.

За рахунок встановлення заслінок під кутом та поєднання із загальною тягою є можливість використання у відповідності з властивостями ЗС та керування процесом очищення. Встановлення заслінок дозволяє підвищити продуктивність ПСК (рис. 1.6).

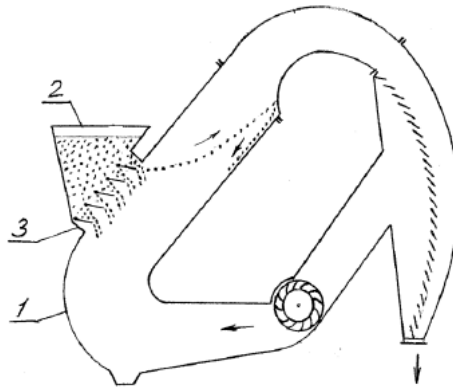


Рисунок 1.6 – Схема пневмосепаратора

1 – аспіраційний канал; 2 – бункер; 3 – пристрій для подавання матеріалу

Ще одним аналогічним конструктивним рішенням є сепаратор, який має пристрій для подавання зерна, виконаний у вигляді поділяючої перегородки [9]. Розділення на два підшари дозволяє поліпшити якість розділення та збільшити продуктивність пневмосепаратора.

В очисній машині ПСМ-5 [3] необхідний ступень рівномірності розподілу швидкості повітряного потоку за глибиною каналу забезпечується використанням сітки, а для стабілізації густини зернового потоку – бар'єрами. Внаслідок забивання сітки, через дестабілізацію розподілу швидкості повітряного потоку, ефективність очищення ЗС зменшується до 70%.

Аналізом досліджень процесу очищення ЗС у повітряному потоці та конструкцій ПСК встановлені способи підвищення ефективності: оптимізацією технологічних параметрів; попередньою підготовкою ЗС та повітряного потоку;

інтенсифікацією розподілення компонентів; використанням багатократного очищення; комбінуванням пристроїв різного типу дії.

Об'єктом дослідження обрано ПСК комплексного барабанного сепаратору типу КБС (рис. 1.7) виробництва ПАТ «Карлівський машинобудівний завод» м. Карлівка Карлівського району Полтавської області. Сепаратор призначено для попереднього очищення ЗС, який складається з ПСК з аспіраційною системою та решітного блоку. ПСК сепаратора є типовим для більшості зернових сепараторів, тому що має вертикальний прямокутний канал, де відбувається розділення ЗС за аеродинамічними властивостями. Одержані результати досліджень по аналогії можна використати для всіх зернових сепараторів, що мають вертикальний ПСК.

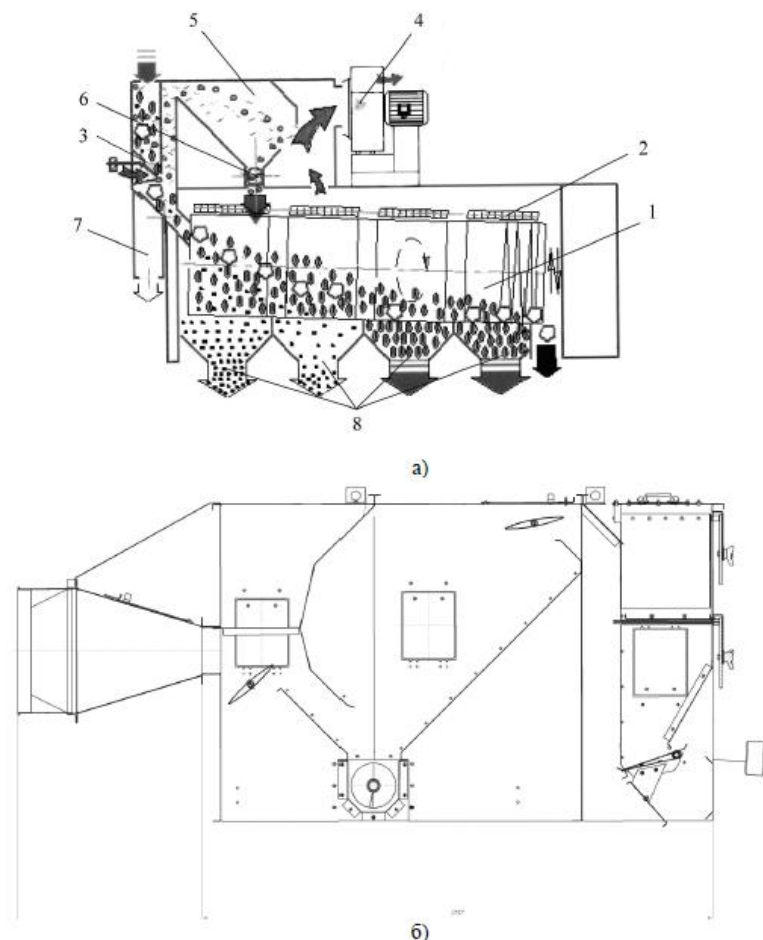


Рисунок 1.7 – Комплексний барабанний сепаратор КБС

- а – схема сепаратора: 1 – барабан; 2 – решета; 3 – канал пневмосепарувальний;
4 – вентилятор; 5 – камера пилоосаджувальна; 6 – розвантажувальний пристрій
легких домішок; 7 – патрубок вихідний; 8 – приймачі продуктів розділення;
б – аспіраційна система сепаратора КБС

ЗС подається до ПСК 3 (рис. 1.8), де за рахунок аеродинамічних властивостей відбувається її розділення: зерно направляється до решітного барабану 1 або патрубку 7; легкі домішки – до камери 5. Частинки легких домішок осаджуються в камері 5, а чисте повітря виходить через вентилятор. Зерно потрапивши до барабану 1 розділяється за розмірами на решетах 2 та направляється до відповідних приймачів 8.

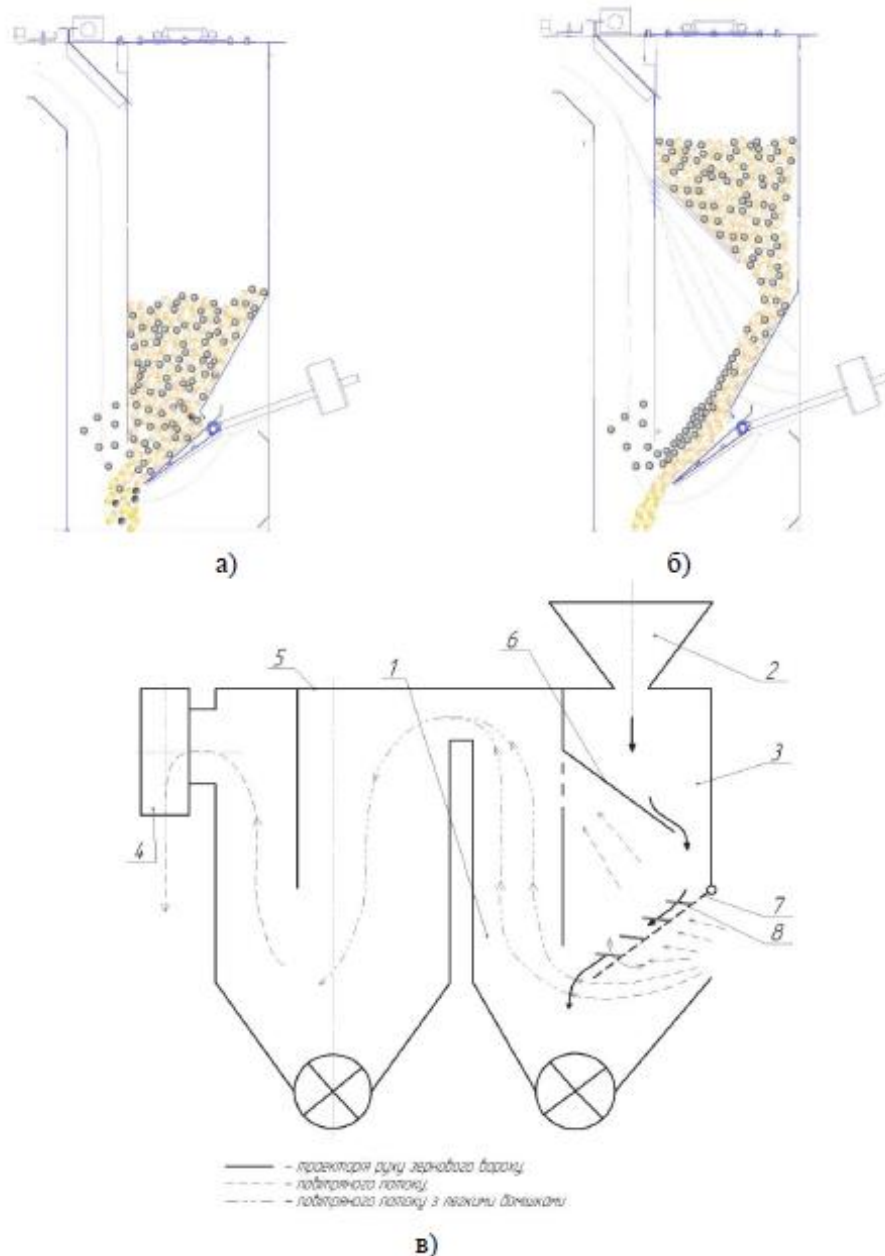


Рисунок 1.8 – Схема розробленого пневмосепарувального каналу

а – серійного; б – розробленого з розшарувальним пристроєм; в – технологічна схема розробленого пневмосепарувального пристрою: 1 – вертикальний канал;

2 – бункер завантажувальний; 3 – камера накопичувальна; 4 – вентилятор;

5 – камера пилоосаджувальна; 6 – поверхня скатна;

7 – поверхня повітропроникна; 8 – розпушувачі

Потрапивши до накопичувального бункера ПСК ЗС рухається шаром до основного вертикального каналу. Подальше збільшення товщини шару веде до того, що легкі домішки з нижніх підшарів не мають змоги виділитися з ЗС. Легкі домішки потрапляють з зерном до решітного блоку, що спричиняє втрату продуктивності та якості очищення ЗС. Це вимагає зменшення висоти шару ЗС, а відповідно і завантаження ПСК, і, як наслідок, викликає втрату продуктивності зернового сепаратора в цілому.

Для підвищення ефективності процесу очищення ЗС пропонується використати перспективний спосіб попередньої підготовки ЗС шляхом використання розшарувального повітропроникного пристрою (рис. 1.7, б) [16].

Запропонована конструкція ПСК за рахунок попередньої підготовки ЗС на повітропроникній поверхні з лусками збільшує продуктивність та якість процесу очищення. Розроблена конструкція ПСК не змінює габаритні розміри сепаратора.

Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим ПСК підвищує ефективність очищення і веде до створення конкурентоздатних зернових сепараторів, що є актуальним завданням для розвитку АПК України.

1.3. Обґрунтування мети та завдання досліджень

В результаті аналізу стану поставленого завдання підвищення продуктивності зернових сепараторів розроблено ПСК, використання яких забезпечить розшарування ЗС та істотно підвищить ефективність їх очищення.

Томк, метою дипломної роботи є підвищення продуктивності барабанних зернових сепараторів шляхом обґрунтування параметрів ПСК з розшарувальним пристроєм.

Відповідно до поставленої мети для вирішення проблеми визначені наступні завдання:

- 1) провести оцінку і аналіз існуючих підходів до розв'язання проблеми підвищення продуктивності процесів очищення ЗС;

2) виконати моделювання руху ЗС в робочих зонах ПСК з урахуванням їх попереднього розшарування та властивостей компонентів ЗС;

3) обґрунтувати підхід і вибрати метод оцінки функціональних залежностей складових швидкості ЗС з конструктивно-технологічними параметрами розробленого ПСК, що визначають ефективність розшарування та подальшого очищення ЗС;

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

5) провести техніко-економічну оцінку проекту.

Висновки по розділу

В розділі проведено аналіз літературних джерел щодо очищення ЗС та використання різних технічних засобів для цього процесу.

Із досліджень визначено, що в літературі не знайдено теоретичних досліджень процесу очищення ЗС від частинок легких домішок за допомогою рівнянь багатофазних середовищ, закономірностей зміни ефективності розшарування та очищення ЗС, швидкостей їх компонентів та пористості. Тому, в результаті аналізу стану поставленого завдання підвищення продуктивності зернових сепараторів розроблено ПСК, використання яких забезпечить розшарування ЗС та істотно підвищить ефективність їх очищення.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ

2.1. Математичні моделі процесу очищення зернових сумішей від легких домішок

Одним із ефективних способів математичного моделювання руху повітряних потоків є використання рівнянь гідродинаміки: рівняння нерозривності руху і динамічне рівняння руху нестискаємої рідини (рівняння Нав'є - Стокса) [17]. Рівняння Нав'є - Стокса визначає систему сил, яка діє в газі (рідині) у напрямку осей координат. Це рівняння урахує дію чотирьох сил: тяжіння, тиску, внутрішнього тертя (в'язкості) і інерції. Сила тяжіння (pg) являє собою зовнішній фактор, а інші сили – результат дії навколишнього середовища на виділений елементарний об'єм. Рівняння не ураховують зовнішніх дій на систему, і тому повинні бути доповнені граничними умовами. Поряд з граничними умовами для характеристики стану системи в початковий момент процесу приводяться початкові умови.

Науковці [4] отримали залежності для руху зернівки у вертикальному ПСК:

$$\begin{cases} \ddot{x} = g - Kv^2\psi - Kv\psi\dot{x}, \\ \ddot{y} = -Kv\psi\dot{y}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Нілов В.П. [12] отримав математичну модель для тонкошарової пневмоінерційної сепарації, в основу якої покладена швидкісна подача вороха:

$$y = \frac{(\sin \alpha + \varepsilon \cdot \sin \beta) \cdot \ln e^{\frac{y \cos \beta - x \sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)} k_{\pi} \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 + 4\varepsilon \cos^2 \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)}} - \varepsilon \cdot \sin \beta \cdot e^{\frac{y \cos \beta - x \sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)} k_{\pi} \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 + 4\varepsilon \cos^2 \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)}} + 1}{k_{\pi} \sqrt{(1 + \varepsilon)^2 + 4\varepsilon \cos^2 \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)}}. \quad (2.2)$$

Автор встановив, основні значущі параметри процесу: k_{π} – аеродинамічні властивості; α – кут введення; відношення ε швидкості повітряного потоку до

швидкості введення; β – кут нахилу повітряного потоку. В результаті рішення системи рівнянь отримано траєкторії руху частинки ЗС у повітряному потоці.

Для опису динаміки несучої фази – повітряного потоку, частинок легких домішок та зерна основної культури у робочій зоні пневмосепарувальних пристроїв зернових сепараторів найбільш прийнятним є використання гідродинамічних аналогій, наприклад за рівняннями Нав'є-Стокса.

2.2. Моделювання розшарування зернової суміші на повітропроникній лускатій поверхні розробленого пневмосепарувального каналу

Зернова суміш відноситься до так званих полідисперсних сипучих матеріалів, для яких перехід в псевдозріджений стан відбувається поступово в деякому інтервалі швидкостей [9]. В таких шарах відбувається обмін кількості руху між частинками різного розміру і маси. Тиск зернистого матеріалу урівноважується силою гідравлічного опору шару. У подальшому, до досягнення швидкості вільного витання одиночних частинок, перепад тиску на шарі зберігає майже постійні значення.

Це пояснюється тим, що зі зростанням швидкості повітряного потоку, який псевдозріджує, контакт між частинками зменшується і вони отримують більшу можливість хаотичного перемішування за всіма напрямками.

У момент початку псевдозрідження вага ЗС урівноважується силою гідравлічного опору шару [14]:

$$\Delta p = (\rho - \rho_s)(1 - \varepsilon_0)h_0g, \quad (2.3)$$

де h_0 – висота нерухомого шару; ρ , ρ_s – щільність твердих частинок і густина псевдозрідженого повітря; Δp – перепад тиску на шарі; ε_0 – пористість нерухомого шару:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V_0}, \quad (2.4)$$

де V_0 , V – об'єм нерухомого шару і частинок ЗС, відповідно.

Зауважимо, що зі швидкості початку псевдозрідження і вище перепад тиску на шарі зберігає практично постійні значення (рис. 2.1).

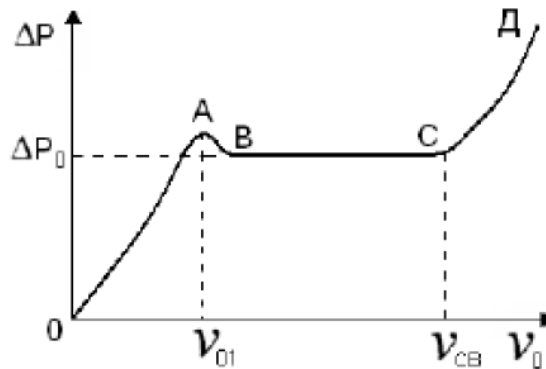


Рисунок 2.1 – Залежність тиску від швидкості повітряного потоку

ОА – фільтрування; ВС – псевдозрідження; CD – пневмотранспортування;
 АВ – падіння опору після подолання сил зчеплення між частинками

Це пояснюється тим, що з підвищенням швидкості повітряного потоку, що псевдозріджує, контакт між частинками зменшується і вони отримують більшу можливість хаотичного переміщення за всіма напрямками.

При цьому підвищується середня відстань (пори) між частинками, тобто збільшується пористість шару і, відповідно, його висота.

Для визначення величини швидкості початку псевдозрідження існує значна кількість полумпіричних і теоретичних залежностей, зокрема, відома формула Тодеса [14]:

$$Re = \frac{Ar^*}{1400 + 5,22\sqrt{Ar^*}}, \quad (2.5)$$

де $Ar^* = \frac{d^3(\rho - \rho_z)g}{\rho_z v_z^2}$ – критерій Архімеда; $Re = \frac{ud}{v_z}$ – критерій Рейнольдса, що визначає початок псевдозрідження; u – швидкість початку псевдозрідження; d – еквівалентний діаметр частинок; v_z – кінематична в'язкість повітря.

Еквівалентний діаметр для частинок неправильної форми визначають як діаметр умовної кулі, об'єм якої дорівнює об'єму реальної частинки, помноженому на фактор форми:

$$d = 6 \frac{V}{S}, \quad (2.6)$$

де V – об’єм частинки; S – площа її поверхні.

Із (2.5) отримаємо:

$$u_{\min} \approx \frac{(\rho - \rho_z) d^2 g}{\mu_z 1400 + 5,22 d \sqrt{\rho_z (\rho - \rho_z) d g}}. \quad (2.7)$$

Верхня межа псевдозрідженого стану відповідає швидкості вільного витання одиночних частинок. При швидкості потоку, що перевершує швидкість витання, відбуватиметься винос частинок з шару ЗС. Ця швидкість може бути отримана зі співвідношення:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,6 \sqrt{Ar}}. \quad (2.8)$$

Із (2.7) виходить:

$$u_{\max} \approx \frac{(\rho - \rho_z) d^2 g}{\nu_z 18 + 0,6 d \sqrt{\rho_z (\rho - \rho_z) d g}}. \quad (2.9)$$

Задавши швидкість повітряного потоку, що перевищує поріг початку псевдозрідження згідно з (2.7), але меншу швидкості вільного витання одиночних частинок згідно з (2.9), можна розрахувати реальну товщину рухомого шару, яка збільшується через те, що змінюється пористість шару. Емпірично [14] встановлено, що:

$$\varepsilon \approx \left(\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right)^{0,21}, \quad (2.10)$$

Тоді

$$H = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} H_0 \quad (2.11)$$

Наведені вище формули Годеса (2.7), (2.9) відносяться до однорідної суміші, причому для тієї що знаходиться на горизонтальній поверхні. В той час ЗС, що досліджується, розглянута як полідисперсна (складається з частинок з різними характерними розмірами і щільністю). При цьому суміш розглянута, як рухома по нахиленій поверхні.

Очевидно, розраховані за (2.7), (2.9) швидкості повітряного потоку, що відповідають нижній і верхній границі [18] псевдозрідженого стану, будуть

різними залежно від того, до частинок з якими параметрами, що знаходяться в рухомому шарі, їх застосувати (рис. 2.2).

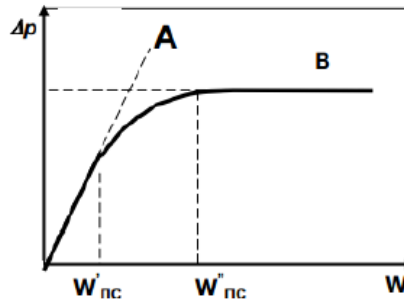


Рисунок 2.2 – Діаграма псевдозрідження полідисперсних матеріалів
 $W'_{пс}$ – псевдозрідження дрібних частинок; $W''_{пс}$ – повне псевдозрідження

Зокрема, для ламінарного режиму течії, характерної для пилоподібних матеріалів, відношення швидкостей початку псевдозрідження для великих і дрібних частинок визначається рівнянням:

$$\frac{u_{\min}}{u_{\max}} = 0,347 \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}} \right)^2, \quad (2.12)$$

для турбулентного режиму [14]

$$\frac{u_{\min}}{u_{\max}} = 0,59 \sqrt{\frac{d_{\min}}{d_{\max}}}. \quad (2.13)$$

Тут $d_{\min}, d_{\max}$ – відповідно еквівалентні діаметри дрібних і великих частинок.

Для полідисперсного шару, який складається з частинок різних діаметрів і різної щільності, усереднений еквівалентний діаметр і усереднену щільність обчислено як середнє гармонійне відповідних величин за рівняннями [14]:

$$d = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{d_i}}, \quad \rho = \frac{1}{\sum \frac{f_i}{\rho_i}}, \quad (2.14)$$

де d_i, ρ_i – еквівалентний діаметр (2.6) і щільність частинок i -ої фракції; f_i – вагова доля фракції в шарі.

Слід врахувати вплив нахилу поверхні, який призводить до зменшення тиску шару на поверхню і, відповідно, зменшує швидкість псевдозрідження.

У підсумку отримаємо рівняння, які узагальнюють відомі формули Тодеса [14] розрахунку швидкості псевдозрідження на випадок руху потоку полідисперсної ЗС по нахиленій поверхні (рис. 2.3, 2.4):

$$\frac{\rho d^2 g \cos \theta}{v_z 1400 + 5,22 d \sqrt{\rho_z \rho d g \cos \theta}} \leq u_n \leq \frac{\rho d^2 g \cos \theta}{v_z 18 + 0,6 d \sqrt{\rho_z \rho d g \cos \theta}}, \quad (2.15)$$

де усереднений еквівалентний діаметр і щільність визначають за (2.14).

Як виходить з (2.15), збільшення кута нахилу поверхні знижує як швидкість початку псевдозрідження (рис. 2.3), так і швидкість витання частинок зерна (рис. 2.4).

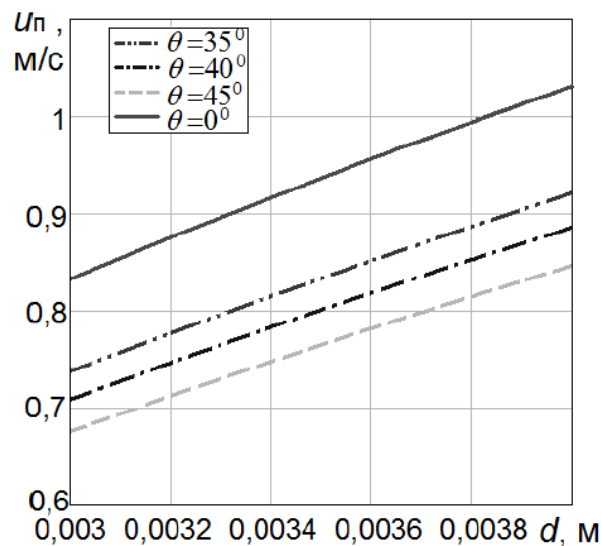


Рисунок 2.3 – Залежності швидкості початку псевдозрідження зернової суміші від еквівалентного діаметра зерна, при різних кутах нахилу лускатої поверхні

Для ефективного псевдозрідження ЗС необхідно забезпечити достатню швидкість повітряного потоку. Остання, якщо враховувати полідисперсний склад ЗС, повинна бути значно вище швидкості початку псевдозрідження. При цьому швидкість потоку повинна бути нижче швидкості витання основного зерна.

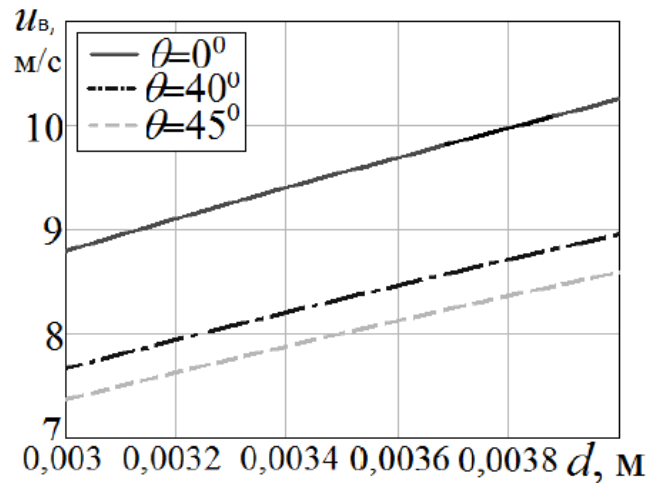


Рисунок 2.4 – Залежності швидкості витання частинок зернової суміші від діаметру зерна, при різних кутах нахилу лускатої поверхні

Таким чином, основний вплив на рух частинок домішок надають гравітаційна сила, спрямована по вертикалі донизу:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p, \quad (2.16)$$

де d_p , ρ_p – еквівалентний радіус та щільність частинок домішок, відповідно; і протилежно їй спрямована сила Архімеда:

$$F_a = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho, \quad (2.17)$$

де ρ – середня щільність зернового шару.

З боку псевдозрідженого середовища на частинки діє сила в'язкого опору Стокса. Так як при русі частинок домішок значення критерію Рейнольдса відповідає ламінарному характеру обтікання частинки псевдозрідженим шаром [9], то опір середовища обумовлено практично тільки силами тертя.

Тоді, сила Стокса визначається за виразом [14]:

$$F_c = 3\pi d_p \mu_0 w, \quad (2.18)$$

де μ_0 – в'язкість псевдозрідженого шару при малих швидкостях зсуву (до прийнятої реологічної моделі при малих швидкостях ЗС поводить як ньютонівська рідина); w – швидкість обтікання частинки ЗС потоком.

Так, як час швидкісної релаксації в псевдозрідженому середовищі незначний, то можна вважати, що частинки домішок «спливають» з практично

постійною швидкістю, яка може бути визначена з умови рівноваги діючих на частинку домішок сил [19]:

$$w = \frac{d_p^2 (\rho - \rho_p)}{18\mu_0} g. \quad (2.19)$$

З (2.19) виходить, що швидкість «спливання» пропорційна квадрату еквівалентного діаметра частинки, різниці її щільності і усередненої щільності всіх частинок шару (рис. 2.5).

Зауважимо, що підвищення швидкості повітряного потоку (рис. 2.6), викликає збільшення товщини зернового шару і зменшення концентрації твердої фази в ньому (тобто збільшення пористості). Це, відповідно до прийнятої реологічної моделі, веде до зменшення в'язкості. У першому наближенні можна вважати, що зі збільшенням швидкості повітряного потоку швидкість «спливання» легких частинок домішок збільшується відповідно до рівняння Стокса-Ейнштейна [9]:

$$w = w_0 \frac{1 + k(1 - \varepsilon_0)}{1 + k(1 - \varepsilon)}, \quad (2.20)$$

де $\varepsilon_0 \approx 0,4$ – пористість шару при мінімальній швидкості псевдозрідження; ε – пористість шару при заданій швидкості повітряного потоку; w_0 , w – відповідні швидкості «спливання» частинок домішок; k – емпіричний коефіцієнт форми: $k \approx 2,5$ для сферичних частинок [14], для витягнутих частинок $k > 2,5$ [16].

Пористість ε псевдозрідженого шару для заданої швидкості псевдозрідження в межах (2.15) визначаємо за (2.8).

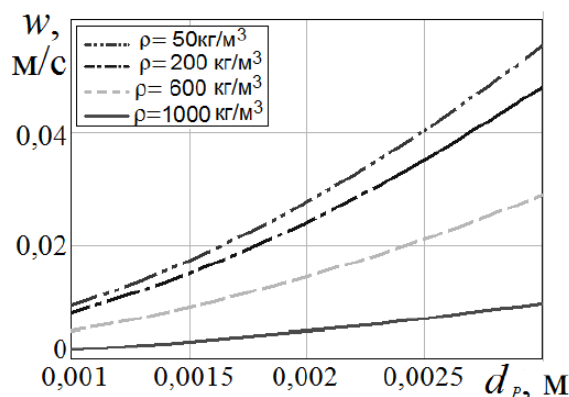


Рисунок 2.5 – Залежності швидкості «спливання» частинок домішок від їх щільності та розмірів, при швидкості повітряного потоку 3 м/с

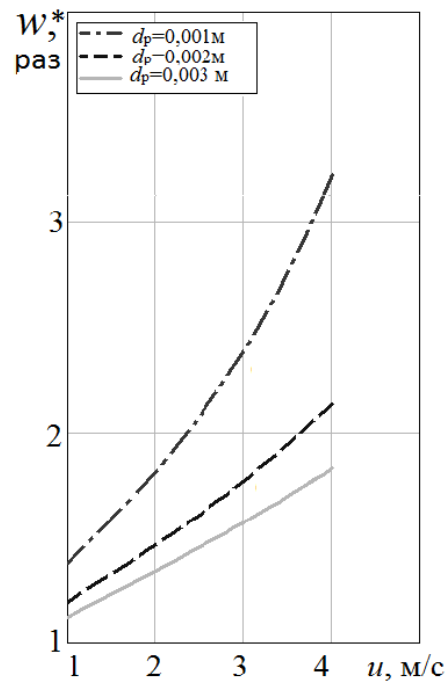


Рисунок 2.6 – Залежності збільшення швидкості «спливання» домішок від їх розмірів та швидкості повітряного потоку

При цьому критерій Архімеда визначаємо з урахуванням нахилу лускатої поверхні:

$$Ar = \frac{d^3(\rho - \rho_z)}{\rho_z v_z^2} g \cos \theta. \quad (2.21)$$

Для досліджень приймаємо лускату поверхню і напрямок подачі повітряного потоку (рис. 2.7). При русі ЗС по наведеній нахилений поверхні шар відчуває вібрацію, що призводить до зменшення його ефективної в'язкості [6].



Рисунок 2.7 – Схема подачі повітряного потоку для псевдозрідження

В'язкість зменшується при збільшенні амплітуди коливань, яка визначається висотою «лусок» і їх частотою розташування. При цьому вона залежить від відстані між «лусками» і швидкості руху зернового шару [2]. Тому

доцільно прагнути до збільшення відношення висоти «лусок» до відстані між ними.

З іншого боку, для виключення появи застійних зон в потоці відстань між «лусками» (крок) не повинна бути занадто великою. Тому близькою до оптимальної буде структура «лускатої» поверхні, у якої співвідношення між висотою «лусочок» і відстанню між ними близько до рівності:

$$\frac{a}{l} \leq \frac{\operatorname{tg} \theta - k_{tr}}{1 + k_{tr} \cdot \operatorname{tg} \theta}, \quad (2.22)$$

де k_{tr} – коефіцієнт тертя ЗС по нахиленій поверхні; a – висота лусочок; l – період розташування лусочок; θ – кут нахилу поверхні.

При русі ЗС по лускатій нахиленій поверхні на шар діє вібрація, яка призводить до зміни його ефективної в'язкості [6]. В'язкість зменшується при збільшенні амплітуди коливань, яка визначається висотою «лусок» та частотою їх розташування, швидкістю руху шару ЗС. У першому наближенні можна вважати, що ефективна в'язкість шару ЗС при малих швидкостях зсуву [2] визначається:

$$\eta \approx \mu_0 - \gamma \frac{\omega a}{1 + \omega a'}, \quad (2.23)$$

де γ – постійна; a' – амплітуда; $\omega = 2\pi f$ – колова частота вібрацій, де f – частота вібрацій.

Враховуючи [10] значення величин коефіцієнту тертя для різних зернових культур отримаємо: для пшениці $a'/l \approx 0,1 \dots 0,15$; для кукурудзи та соняшнику $a'/l \approx 0,3 \dots 0,35$. Для цих культур висота лусок може бути дещо більше, ніж для пшениці. Зауважимо, що в застосованій конструкції це відношення $a'/l \approx 0,08$, що досить близько до оптимального [12].

Приймаємо $f = u/l$, де l – період розташування лусок; u – швидкість руху шару зерна. Тоді ефективна в'язкість зернового шару розраховується за виразом:

$$\eta \approx \mu_0 - \gamma \frac{2\pi u \frac{a}{l}}{1 + 2\pi u \frac{a}{l}}.$$

Швидкість спливання частинок домішок пропорційно підвищується по мірі зменшення в'язкості, але при цьому швидкість руху шару зерна також пропорційно збільшується. Це є характерним за умови відповідності руху шару ЗС з ньютонівською рідиною.

Однак попередній аналіз виявив, що характерна швидкість шару зерна дещо нижче ніж у звичайної ньютонівської рідини. Таким чином, зміна в'язкості ЗС, що спричинена дією лусок, позитивно впливає на її розшарування.

Для визначення раціональних параметрів «лускатості» поверхні визначимося з наступними умовами. При умові збільшення «лускатості», внаслідок зменшення періоду розташування лусок, в'язкість шару ЗС зменшиться. ЗС після лусок опускається на поверхню під дією сил тяжіння, і, якщо їх розташувати близько один до одного амплітуда вібрацій буде менше. Це пояснюється тим, що частинки зерна не встигнуть опуститися на поверхню. Для того, щоб суміш опустилась після переходу луски потрібен час.

Так як середня швидкість руху ЗС в залежності від товщини шару коливається в межах $0,2 \dots 1$ м/с, то період розташування лусок потрібно обирати не менше ніж $0,5\sqrt{a}$.

Зауважимо, що так як кількість частинок домішок відносно незначна (до 5% [14]), то в першому наближенні можна не враховувати змінність щільності змінюється по товщині шару ЗС при її розшаруванні. Це в кінцевому випадку, призводить до деякого уповільнення швидкості «спливання» частинок домішок.

На рис. 2.8 представлені траєкторії частинок домішок у шарі ЗС, який рухається по нахиленій лускатій поверхні.

З рис. 2.8 видно, що рух частинок домішок всередині шару залежить від їх щільності. При щільності $100 - 200$ кг/м³ координати частинок домішок підвищуються на $10 - 15\%$ в порівнянні з частинками щільності 600 кг/м³ з рухом по лускатій поверхні.

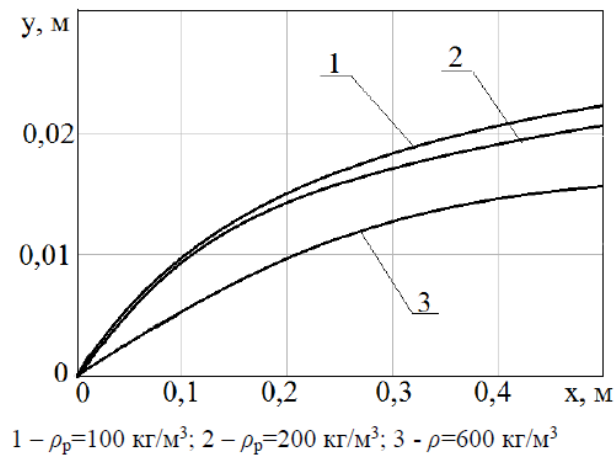


Рисунок 2.8 – Траєкторії руху частинок домішок в шарі суміші на нахиленій повітропроникній лускатій поверхні ($u=3 \text{ м/с}$, $d_p=0,002 \text{ м}$)

Ступінь розшарування псевдозрідженої ЗС на нахиленій лускатій поверхні зручно характеризувати коефіцієнтом розшарування k_1 . Він визначається для кожного виду домішок і дорівнює відношенню товщини шару, вільної від домішок відповідної фракції, до сумарної товщини зернового шару:

$$k_1 \approx \min \left(\frac{w \cos \theta}{H u_{\text{cp}} \left(1 - \frac{w}{u_{\text{cp}}} \sin \theta \right)} L, 1 \right).$$

Цей коефіцієнт, очевидно, зростає по мірі подовження нахиленої поверхні і істотно залежить як від розмірів та щільності часток домішок, параметрів лускатості поверхні і швидкості продування її повітряним потоком (рис. 2.9 – 2.12). Зауважимо, що коефіцієнт розшарування незначно залежить від кута нахилу лускатої поверхні.

В результаті досліджень проаналізовано вплив параметрів лусок на ефективність розшарування ЗС при варіюванні швидкості повітряного потоку (рис. 2.9, 2.10). Встановлено, що наявність лусок підвищує ступінь розшарування ЗС на 5,7...7% у порівнянні з плоскою повітропроникною поверхнею, при значеннях швидкості повітряного потоку що досліджувались. Підвищення швидкості повітряного потоку та «лускатості» поверхні призводить до збільшення ефективності розшарування на 17,4...18,6%. Рациональні значення «лускатості» поверхні, що виражено через відношення висоти лусок

до періоду їх розташування – $a'/l = 0,08 \dots 0,12$ та швидкості повітряного потоку $2 \dots 3$ м/с, при яких отримано коефіцієнт розшарування $k_1 = 0,345 \dots 0,372$. Подальше підвищення даного параметру призводить до створення опору руху ЗС, що призводить до зниження продуктивності.

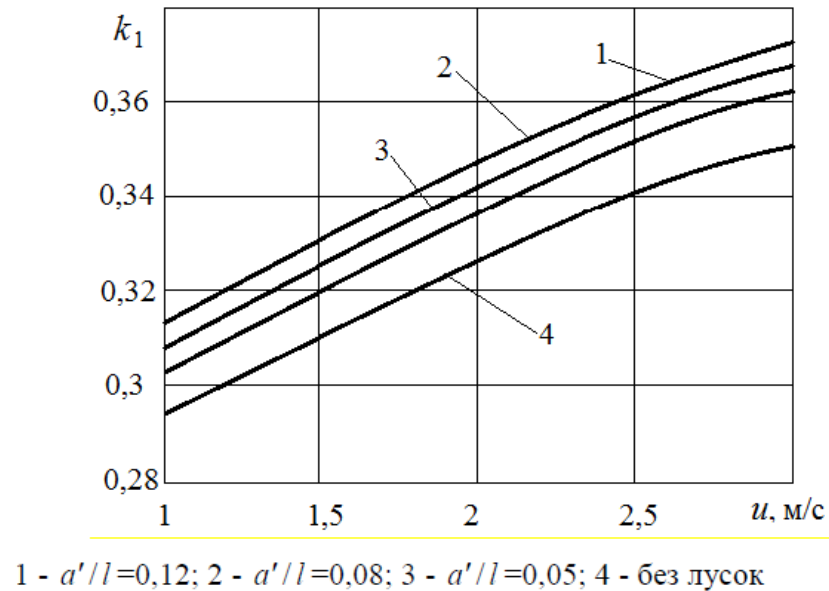


Рисунок 2.9 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від швидкості повітряного потоку ($H=0,05$ м)

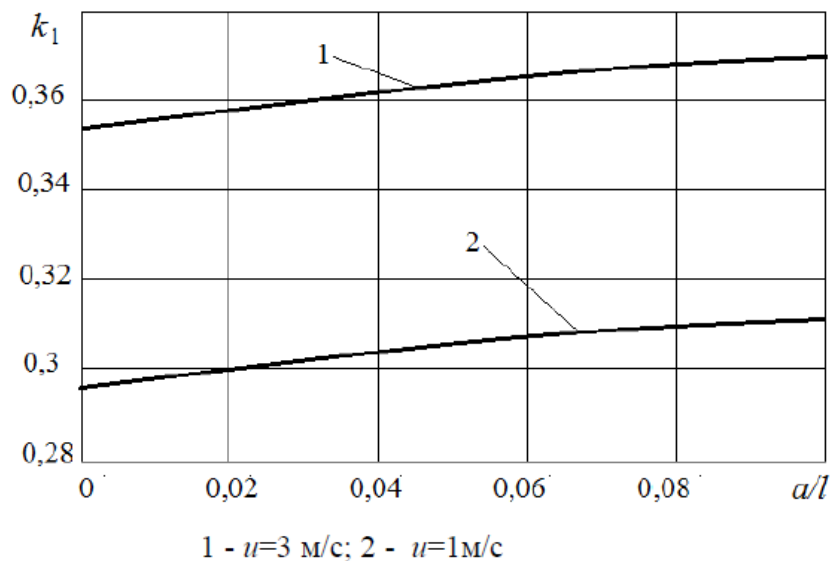


Рисунок 2.10 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від коефіцієнту лускатості поверхні ($H=0,05$ м)

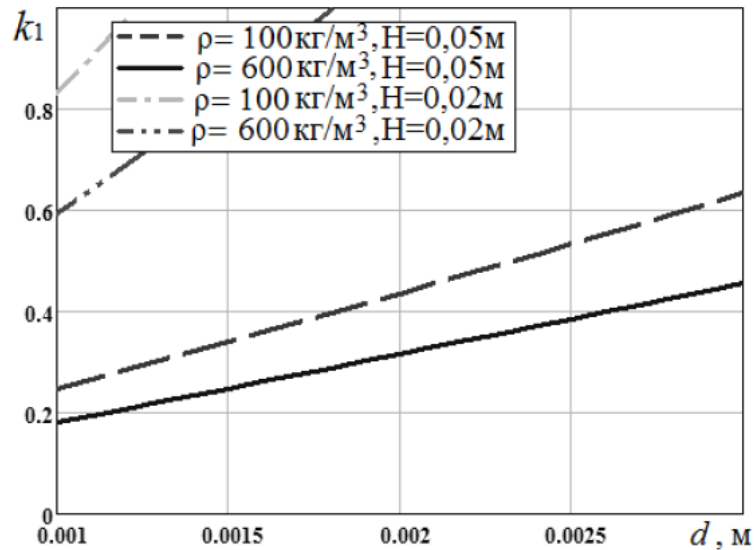


Рисунок 2.11 – Залежності коефіцієнта розшарування зернової суміші від розмірів частинок домішок, при швидкості повітряного потоку 3 м/с

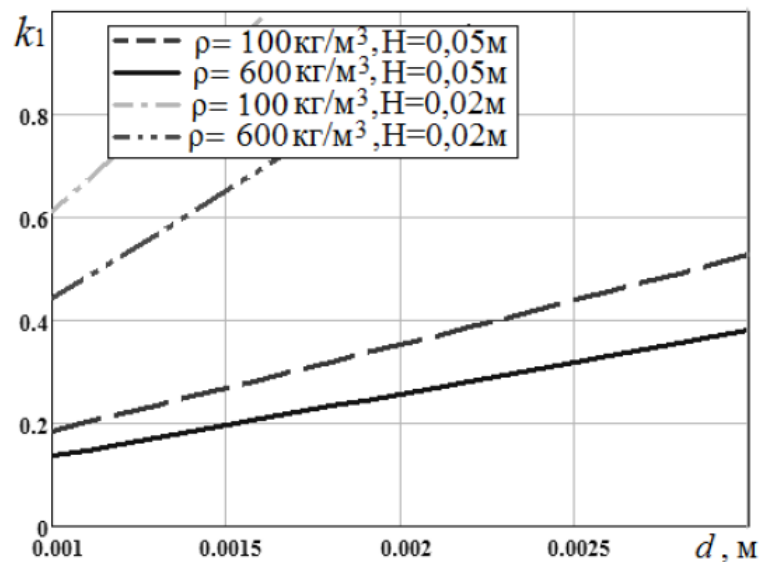


Рисунок 2.12 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від розмірів і щільності частинок домішок, при швидкості повітряного потоку 1 м/с

В результаті моделювання також отримані залежності коефіцієнту розшарування від властивостей компонентів ЗС: розмірів та щільності частинок, товщини їх шару (рис. 2.11, 2.12). Встановлено, що підвищення щільності частинок домішок ЗС в межах характерного діапазону, збільшує розшарування на 30 – 40%. Також встановлено, що зі збільшенням розмірів домішок (до діаметру 0,003 м) коефіцієнт розшарування підвищується в 1,21...2,5 разів в залежності від їх щільності і товщини шару ЗС.

Збільшення товщини шару ЗС негативно впливає на її розшарування, зменшуючи його в 1,5...4,3 рази в залежності від щільності частинок домішок. Встановлені діапазони варіювання коефіцієнту розшарування ЗС, які склали $k_1=0,19...0,63$ при висоті шару 0,05м.

Дослідження проводилися для зернового потоку, насипна щільність якого 750 кг/м^3 , розрахункове значення в'язкості потоку $\mu_0=0,1 \text{ Па с}$, $\mu_\infty=0,1 \text{ Па с}^2$, еквівалентний діаметр домішок $d_p=0,002 \text{ м}$, щільність частинок домішок $\rho_p=100 - 600 \text{ кг/м}^3$, кут нахилу лускатої поверхні $\Theta=40^\circ$ та її довжина $l=0,5 \text{ м}$, висота шару ЗС $H=0,02 \text{ м}$ (0,05м); швидкість повітряного потоку 1 – 3 м/с.

Аналіз рис. 2.11, 2.12 показує, що процес розшарування ЗС присутній в заданих умовах. Коефіцієнт розшарування характеризує процес і залежить від властивостей частинок ЗС, швидкості повітряного потоку. Збільшення швидкості продування поверхні лускатого решета в діапазоні від 1 м/с до 3 м/с підвищує коефіцієнт розшарування на 20 – 25%. Зменшення щільності частинок домішок, в діапазоні що досліджується, також підвищує коефіцієнт розшарування на 25 – 35%. Зменшення висоти шару також позитивно впливає на процес розшарування, коефіцієнт розшарування збільшується на 30 – 35% при зменшенні шару з 0,05 м до 0,02 м.

Висновки по розділу

Проведеним аналізом результатів математичного моделювання розшарування двофазного потоку ЗС «зерно–легкі домішки» на повітропроникній лускатій поверхні ПСК встановлено:

- вплив на рух частинок домішок всередині шару ЗС їх властивостей (щільності та розмірів) та технологічних параметрів процесу (завантаження та швидкості повітряного потоку). Так, при щільності частинок домішок $100...200 \text{ кг/м}^3$ їх координати підвищуються відносно лускатої поверхні розробленого ПСК на 10–15%, порівняно з частинками щільності 600 кг/м^3 ;

- ступінь розшарування псевдозріждженої ЗС на лускатій поверхні охарактеризовано коефіцієнтом розшарування k_1 . Збільшення швидкості

продування поверхні лускатого решета, в діапазоні що досліджується з 1 м/с до 3 м/с, підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 20...25%. Зменшення щільності частинок домішок, в діапазоні що досліджується, також підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 25...35%. Зменшення висоти шару з 0,05 м до 0,02 м також позитивно впливає та збільшує коефіцієнт розшарування ЗС на 30...35%.

У результаті проведених теоретичних досліджень встановлені закономірності керування якістю та продуктивністю, виявлена і доведена реальна можливість істотної інтенсифікації процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим ПСК з розшарувальним пристроєм.

РОЗДІЛ 3.

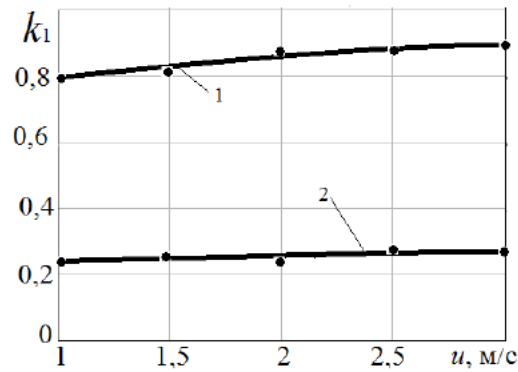
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ

3.1. Ефективність процесу очищення зернової суміші розробленим пневмосепарувальним каналом

Дослідження ефективності роботи розробленого ПСК передбачало визначення коефіцієнту розшарування на повітропроникній лускатій поверхні та встановлення коефіцієнту очищення вертикального каналу.

В результаті дослідження коефіцієнту розшарування ЗС на повітропроникній лускатій поверхні розробленого ПСК отримані відповідні залежності (рис. 3.1 – 3.6). Дослідження проведені для ЗС пшениці (рис. 3.1, 3.4), соняшнику (рис. 3.2, 3.5), кукурудзи (рис. 3.3, 3.6), в залежності від швидкості повітряного потоку на повітропроникній лускатій поверхні та її завантаження.

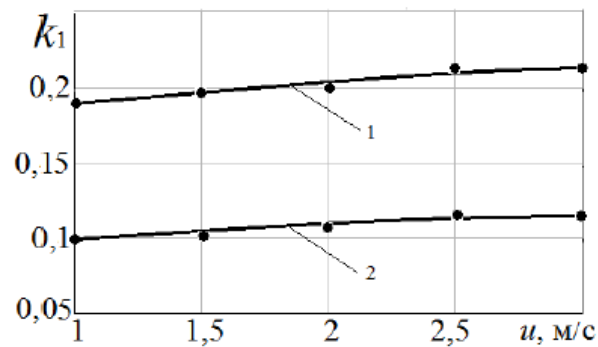
Аналізом залежностей (рис. 3.1 – 3.3) встановлено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування ЗС на 9,3...21 %, зокрема: на 13...21 % до $k_1=0,9$ для ЗС пшениці; на 15-20% до $k_1=0,22$ для ЗС соняшнику; на 9,3...14% до $k_1=0,47$ для ЗС кукурудзи. Діапазони варіювання отриманих коефіцієнтів розшарування, при швидкості повітряного потоку $u=2...3$ м/с, склали для ЗС: пшениці $k_1=0,23...0,9$; соняшнику $k_1=0,12...0,22$; кукурудзи $k_1=0,24...0,48$. Різниця значень ефективності розшарування, для культур що досліджуються, пояснюється відмінністю їх властивостей, зокрема, щільності та розміру частинок ЗС. Останні є значущими з точки зору аеродинамічного розділення ЗС.



1 - $H=0,02$ м; 2 - $H=0,05$ м

Рисунок 3.1 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС пшениці від швидкості повітряного потоку

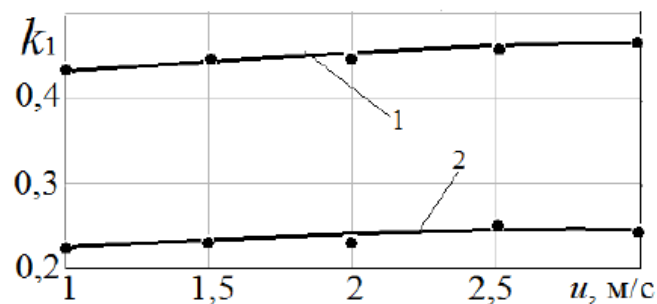
($a/l=0,08$; $d=0,003$ м; $\rho=750$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³)



1 - $H=0,02$ м; 2 - $H=0,05$ м

Рисунок 3.2 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС соняшнику від швидкості повітряного потоку

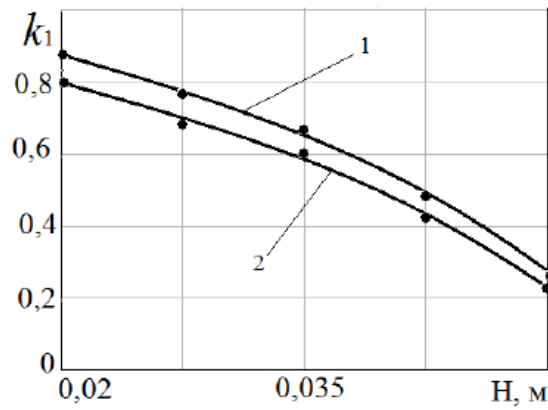
($a/l=0,08$; $d=0,0038$ м; $\rho=350$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³)



1 - $H=0,02$ м; 2 - $H=0,05$ м

Рисунок 3.3 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС кукурудзи від швидкості повітряного потоку

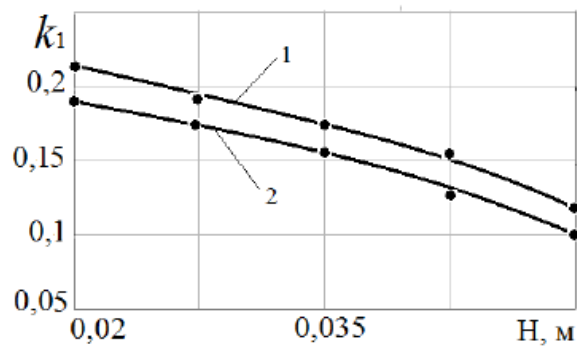
($a/l=0,08$; $d=0,005$ м; $\rho=700$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³)



1 – $u=3$ м/с; 2 – $u=1$ м/с

Рисунок 3.4 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС пшениці від завантаження ПСК

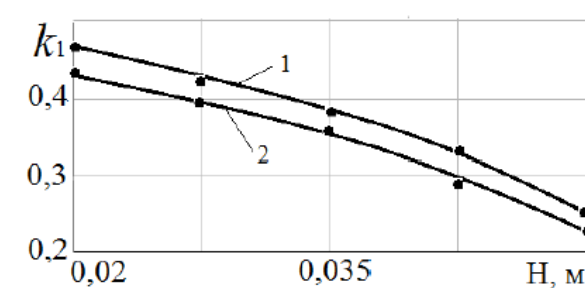
($a/l=0,08$; $d=0,003$ м; $\rho=750$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³)



1 – $u=3$ м/с; 2 – $u=1$ м/с

Рисунок 3.5 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС соняшнику від завантаження ПСК

($a/l=0,08$; $d=0,0038$ м; $\rho=350$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³)



1 – $u=3$ м/с; 2 – $u=1$ м/с;

Рисунок 3.6 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗС кукурудзи від завантаження ПСК

($a/l=0,08$; $d=0,005$ м; $\rho=700$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)

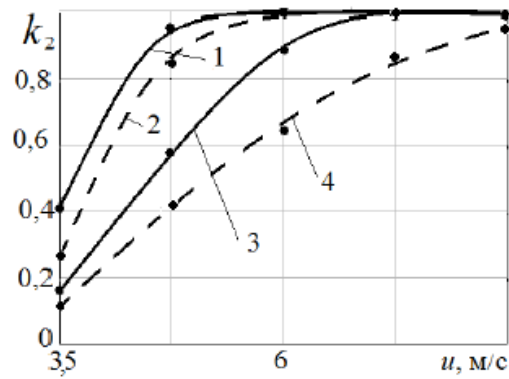
Другим значущим параметром та його впливом на ефективність розшарування ЗС досліджено завантаження ПСК на прикладі отриманих залежностей (рис. 3.4 – 3.6).

Отримані залежності коефіцієнту розшарування, для ЗС що досліджувалися, від завантаження повітропроникної лускатої поверхні, а відповідно, і розробленого ПСК. Аналізом даних залежностей встановлено, що підвищення висоти шару ЗС знижує коефіцієнт розшарування на 40...72,5%, зокрема: на 69...72,5% до $k_1=0,22$ для ЗС пшениці; на 40...44% до $k_1=0,1$ для ЗС соняшнику; на 46,8...49% до $k_1=0,22$ для ЗС кукурудзи. Зменшення товщини шару ЗС сприяє зменшенню його опору, що викликає збільшення простору між зернами (пористість підвищується). Це сприяє інтенсивному перерозподілу частинок ЗС та збільшує ефективність розшарування.

Встановлені раціональні діапазони коефіцієнтів розшарування склали для ЗС: пшениці 0,22...0,68; соняшника 0,1...0,18; кукурудзи 0,23...0,4. Слід відмітити що дані отримані за умови максимальної висоти шару 0,035...0,05 м, яка забезпечує найбільше питоме завантаження, а отже, і продуктивність ПСК. Рекомендований діапазон варіювання швидкості повітряного потоку на лускатій повітропроникній поверхні складає 2...3 м/с.

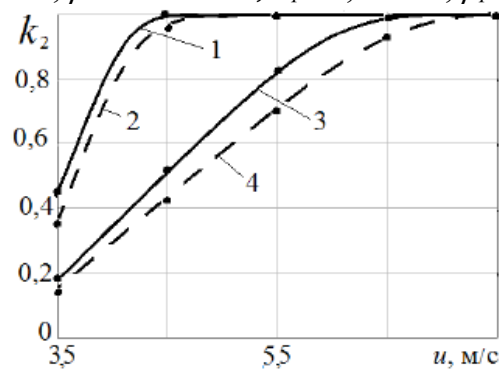
Наступним етапом експериментальних досліджень ефективності роботи розробленого ПСК було визначення коефіцієнту очищення основного вертикального каналу. Дослідження також проведені на ЗС пшениці, соняшнику, кукурудзи при варіюванні технологічних параметрів: швидкість повітряного потоку та завантаження ПСК (рис. 3.7 – 3.9). При цьому вперше враховано попереднє розшарування ЗС та його вплив на ефективність очищення розробленого ПСК.

Експериментальні дослідження проведені на вертикальному каналі, у якому варіювали швидкість повітряного потоку та подавали задану ЗС відповідно до програми досліджень. При цьому результати порівнювали з очищенням (пневмосепарацією) не розшарованої ЗС, яке характерно для базових ПСК.



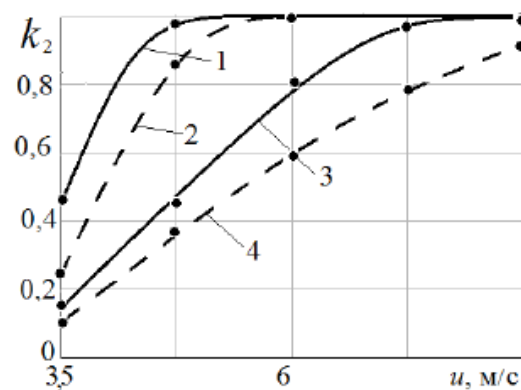
1 – $H=0,02$ м; $k_1=0,9$; 2 – $H=0,02$ м; 3 – $H=0,05$ м; $k_1=0,25$; 4 – $H=0,05$ м;
 - - - базова конструкція ПСК; ----- розроблений ПСК

Рисунок 3.7 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС пшениці від швидкості повітряного потоку
 ($a/l=0,08$; $d=0,003$ м; $\rho=750$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)



1 – $H=0,02$ м; $k_1=0,22$; 2 – $H=0,02$ м; 3 – $H=0,05$ м; $k_1=0,12$; 4 – $H=0,05$ м;
 - - - базова конструкція ПСК; ----- розроблений ПСК

Рисунок 3.8 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС соняшнику від швидкості повітряного потоку
 ($a/l=0,08$; $d=0,0038$ м; $\rho=350$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)



1 – $H=0,02$ м; $k_1=0,48$; 2 – $H=0,02$ м; 3 – $H=0,05$ м; $k_1=0,25$; 4 – $H=0,05$ м;
 - - - базова конструкція ПСК; ----- розроблений ПСК

Рисунок 3.9 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС кукурудзи від швидкості повітряного потоку
 ($a/l=0,08$; $d=0,005$ м; $\rho=700$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)

В результаті дослідів та їх аналізу отримані залежності ефективності роботи вертикального каналу від швидкості повітряного потоку при очищенні від легких домішок ЗС пшениці (рис. 3.7), соняшнику (рис. 3.8) та кукурудзи (рис. 3.9). Аналізом залежностей встановлено, що підвищення швидкості повітряного потоку, в діапазоні що досліджується, збільшує коефіцієнт очищення вертикального каналу в 5...9,5 разів. Встановлено, що ефективність роботи вертикального каналу залежить від товщини шару (завантаження) ЗС, а також від ступеня його розшарування (коефіцієнту розшарування). Проведеними попередніми експериментами (рис. 3.1 – 3.3) встановлені характерні значення коефіцієнтів розшарування для різних ЗС за певних умов. Тому забезпечивши відповідне розшарування (наприклад, $k_1=0,9$ для шару ЗС пшениці товщиною $H=0,02$ м і т.п.) фіксували кількість відділених легких домішок при заданій швидкості повітряного потоку та визначали коефіцієнт очищення вертикального каналу (рис. 3.7). При цьому проводили порівняння з очищенням нерозшарованої ЗС. Встановлено, що ефективність роботи вертикального каналу при очищенні розшарованої на розробленому ПСК ЗС пшениці підвищується на 12...42% у порівнянні з базовою конструкцією. Підвищення питомого завантаження (товщини шару ЗС), а значить і продуктивності, потребує на розробленому ПСК швидкості повітряного потоку у вертикальному каналі від 7,2 м/с для забезпечення максимальної ефективності (коефіцієнтом очищення $k_2=1$). Це підтверджує інтенсифікацію процесу очищення пшениці у вертикальному каналі за рахунок попереднього розшарування ЗС.

Аналогічно отримані залежності ефективності роботи вертикального каналу від швидкості повітряного потоку при очищенні ЗС соняшнику (рис. 3.8) та кукурудзи (рис. 3.9). Аналізом залежностей встановлено, що ефективність розробленого ПСК збільшується: на 3...17% при очищенні ЗС соняшнику (рис. 3.8) та на 16...33% при очищенні ЗС кукурудзи (рис. 3.9). Максимальна ефективність вертикального каналу ($k_2=1$), за умови підвищеного завантаження

($H=0,05$ м), потребує швидкість повітряного потоку: від 6,4 м/с при очищенні ЗС соняшнику (рис. 3.8) та 7,5 м/с при очищенні ЗС кукурудзи (рис. 3.9).

Для повного розуміння фізики процесу очищення ЗС різного ступеню розшарування експериментально отримані відповідні залежності (рис. 3.10 – 3.12). Для цього перед проведенням дослідів заздалегідь штучно готувалась ЗС з заданим ступенем розшарування. Інші конструктивно-технологічні параметри варіювались відповідно до програми дослідів.

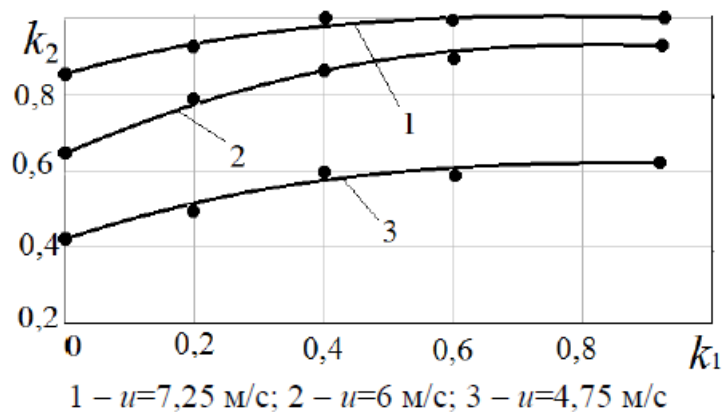


Рисунок 3.10 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС пшениці від коефіцієнту розшарування ($H=0,05$ м; $a/l=0,08$; $d=0,003$ м; $\rho=750$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)

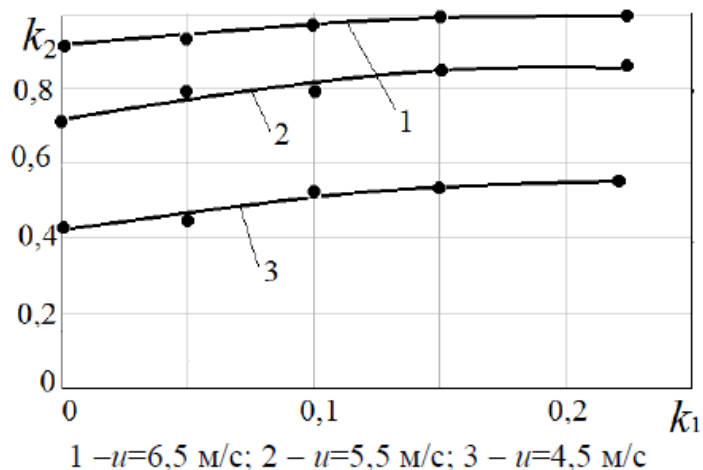
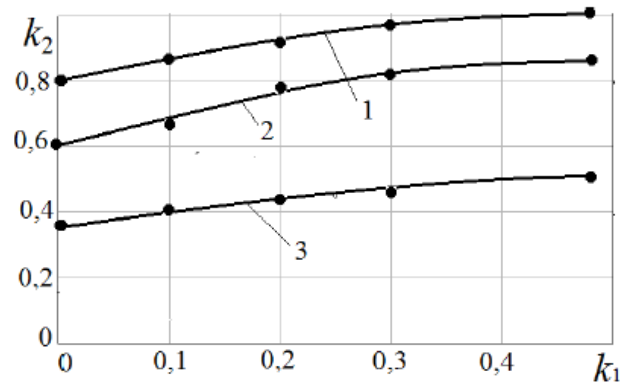


Рисунок 3.11 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС соняшнику від коефіцієнту розшарування ($H=0,05$ м; $a/l=0,08$; $d=0,0038$ м; $\rho=350$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)



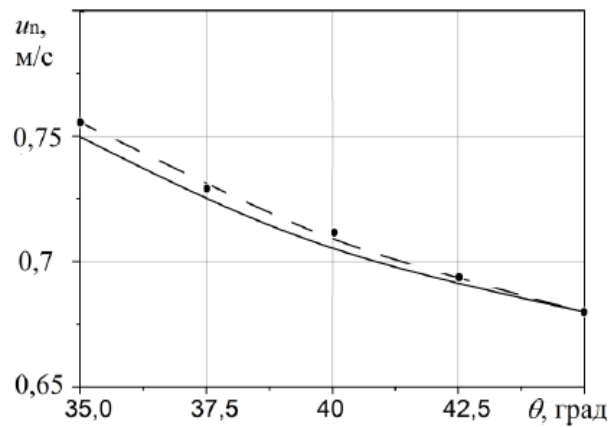
1 – швидкість повітряного потоку $u=6,25$ м/с; 2 – $u=6$ м/с; 3 – $u=4,75$ м/с
 Рисунок 3.12 – Залежності ефективності роботи вертикального каналу при очищенні ЗС кукурудзи від коефіцієнту розшарування
 ($H=0,05$ м; $a/l=0,08$; $d=0,005$ м; $\rho=700$ кг/м³; $d_p=0,002$ м; $\rho_p=300$ кг/м³; $\theta=45^\circ$)

Це також підтверджує можливість інтенсифікації процесу очищення ЗС шляхом її попереднього розшарування на розробленому ПСК.

3.2. Закономірності руху компонентів зернових сумішей

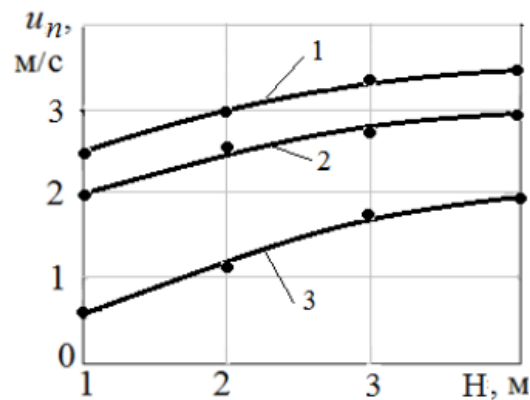
Динаміка частинок зернових сумішей на розшарувальному пристрої розробленого пневмосепарувального каналу. Теоретичними дослідженнями встановлено, що відділення легких домішок в основному горизонтальному каналі розробленого ПСК залежить від ефективності розшарування ЗС. Обробкою результатів математичного моделювання встановлено, що значущими факторами процесу розшарування є конструктивні параметри повітропроникної лускатої поверхні, швидкість повітряного потоку, властивості компонентів ЗС.

Для керування динамічними процесами розшарування ЗС перш за все необхідно мати уявлення про діапазон варіювання швидкості повітряного потоку, яка на неї діє. Теоретично встановлено, що такий діапазон починається зі швидкості початку псевдорозрідження ЗС і лімітується швидкістю витання основного зерна. В результаті проведення експериментів та обробки їх результатів отримано залежності швидкості початку псевдорозрідження та швидкості витання частинок від параметрів нахиленої поверхні та властивостей ЗС (рис. 3.13, 3.14).



---- – експериментальні дослідження; – теоретичні

Рисунок 3.13 – Залежності швидкості початку псевдозрідження зернової суміші соняшнику від кута нахилу повітропроникної поверхні розробленого ПСК
($H=15$ мм; $a/l=0,08$)



1 – кукурудзи; 2 – пшениці; 3 – соняшнику

Рисунок 3.14 – Залежності швидкості початку псевдозрідження зернової суміші від завантаження повітропроникної поверхні розробленого ПСК
($a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

Для підтвердження розробленого математичного моделювання проведена експериментальна ідентифікація швидкості псевдозрідження, на прикладі зернової суміші соняшнику, за різних кутах нахилу повітропроникної поверхні. Аналізом встановлено, що збільшення кута нахилу повітропроникної поверхні, в діапазоні що досліджується, зменшує швидкість початку псевдозрідження на 9,3% до 0,68м/с. Розбіжність результатів теоретичних досліджень та експериментальних не перевищує 3,5%, що підтверджує адекватність розробленого математичного моделювання.

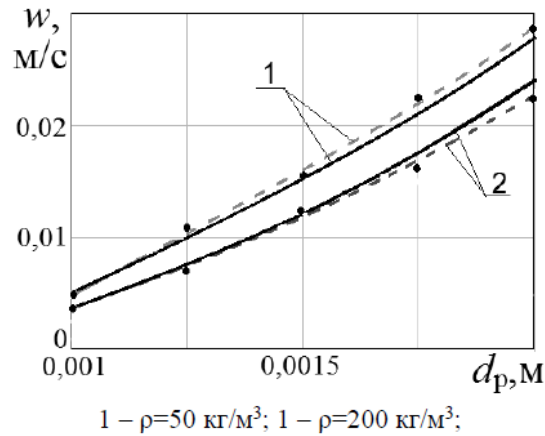
В результаті проведення експериментів встановлено (рис. 3.14), що для псевдозрідження ЗС необхідний діапазон швидкості повітряного потоку складає: кукурудза – 2,5...3,5 м/с; пшениці – 2...3 м/с; соняшника – 0,6...2 м/с. В зв'язку з поставленими завданнями, які направлені на підвищення технологічних показників продуктивності та якості, орієнтуємося на максимальне завантаження, що складає більше 0,003 м. Тоді швидкість початку псевдозрідження, яка задовільнить ЗС що досліджуються, складатиме 2,8...3,5 м/с.

Слід відмітити, що подальше підвищення кута нахилу поверхні (більше 45°) неможливе внаслідок перевищення кута тертя ЗС по залізній повітропроникній поверхні. З урахуванням вищенаведеного, рекомендований діапазон варіювання куту нахилу повітропроникної поверхні складає $\theta=40...45^\circ$.

Визначення параметрів повітропроникної поверхні також напряму пов'язано з встановленням швидкості «спливання» (перерозподіл частинок домішок з нижніх підшарів до верхніх) частинок легких домішок. При цьому визначаючими є властивості легких домішок (щільність та розміри) та швидкість повітряного потоку.

В результаті проведення експериментальних досліджень одержано залежності швидкості спливання легких домішок від їх властивостей (рис. 3.15, 3.16) та швидкості повітряного потоку (рис. 3.17). Для дослідів використано ЗС які підготовлені шляхом змішування заданих фракцій домішок та зерна. Встановлено, що збільшення розмірів та зменшення щільності частинок легких домішок, в діапазонах що досліджуються, підвищує швидкість їх спливання в шарі в 2,8...5,6 разів та на 9...20%, відповідно.

Це пояснюється тим, що легкі ($\rho=50...100 \text{ кг/м}^3$) та великі ($d_p=0,0015...0,003 \text{ м}$) частинки домішок активніше перерозподіляються в шарі ЗС під дією повітряного потоку.



---- – експериментальні дослідження; – теоретичні дослідження
Рисунок 3.15 – Залежності швидкості «спливання» частинок домішок від їх еквівалентного діаметру ($u=3 \text{ м/с}$; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

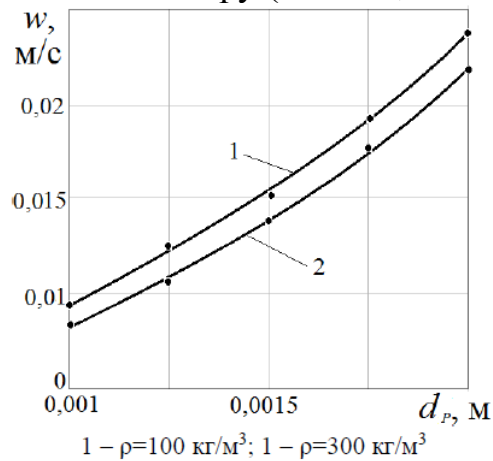
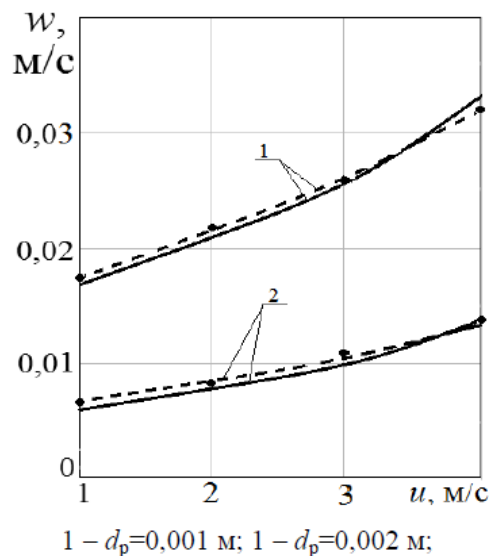


Рисунок 3.16 – Залежності швидкості «спливання» частинок домішок від їх еквівалентного діаметру ($u=3 \text{ м/с}$; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

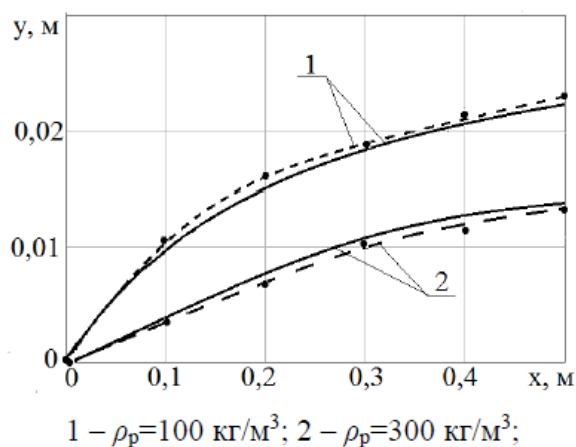


---- – експериментальні дослідження; – теоретичні дослідження
Рисунок 3.17 – Залежності швидкості «спливання» домішок ЗС пшениці від швидкості повітряного потоку ($\rho_p=300 \text{ кг/м}^3$; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

Також встановлено (рис. 3.17), що при збільшенні швидкості повітряного потоку на повітропроникній поверхні, в діапазоні що досліджується, швидкість спливання частинок домішок підвищується на 62,5...77% до 0,013...0,032 м/с. Визначено, що з урахуванням одержаних залежностей швидкості початку псевдозрідження, мінімізації енергетичних витрат, діапазонів варіювання швидкостей витання основного зерна, встановлено раціональний діапазон варіювання швидкості повітряного потоку 2...3 м/с. Даний діапазон дозволить забезпечити перерозподіл частинок в шарі – розшарування ЗС, за різних їх властивостях. Діапазони варіювання швидкості спливання легких домішок, що досліджувались, склали 0,006...0,028 м/с.

Результати експериментів (рис. 3.15, 3.17) також узгоджуються з результатами теоретичних досліджень з розбіжністю до 3%.

За результатами експериментальних досліджень побудовані траєкторії руху компонентів ЗС по нахиленій повітропроникній поверхні (рис. 3.18).



---- – експериментальні дослідження; – теоретичні дослідження

Рисунок 3.18 – Траєкторії руху частинок домішок у шарі ЗС пшениці по повітропроникній лускатій поверхні: ($u=3 \text{ м/с}$, $d=0,002 \text{ м}$; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

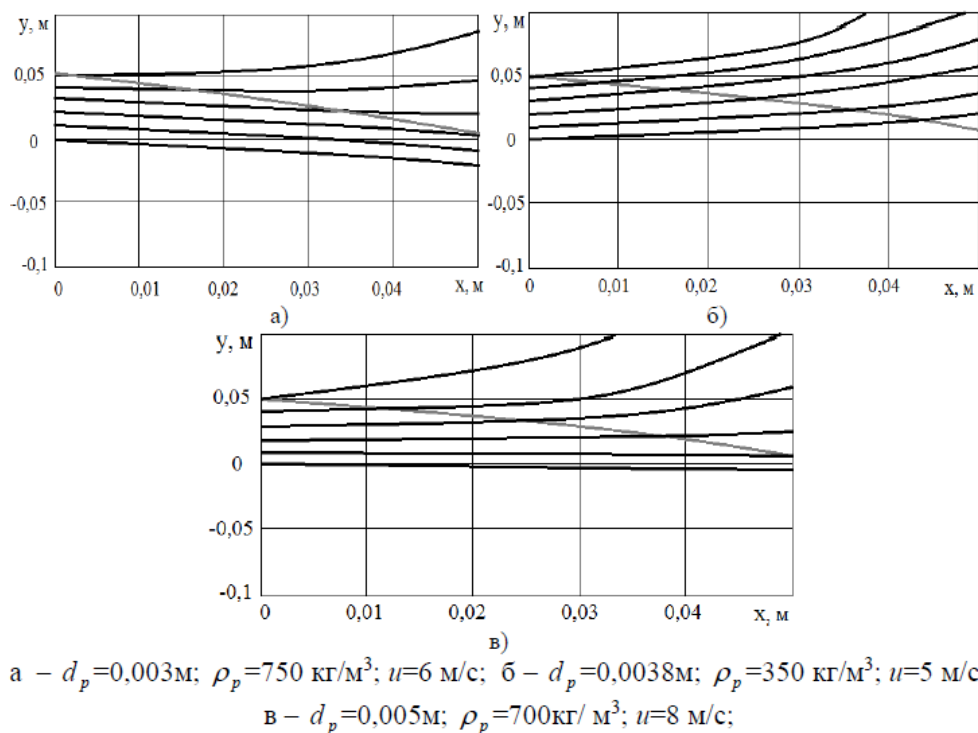
При дослідженнях розглянуто, аналогічно з теоретичним завданням, найгірший варіант, коли частинка домішок знаходиться на нижній точці по висоті шару ЗС ($y=0 \text{ м}$). Встановлено, що по мірі руху по лускатій поверхні частинки ЗС перерозподіляються в шарі під дією повітряного потоку та лусок. Легкі домішки зі щільністю 100...300 кг/м³ та діаметром $d_p=0,002 \text{ м}$, що відповідає максимальному їх розміру, при русі по поверхні довжиною

0,4...0,5 м перерозподіляються у верхній підшар $y=0,14...0,23$ м. При інших початкових точках траєкторій частинок домішок, які знаходяться вище заданих (рис. 3.18), маємо залежності які змінюються за аналогічним характером і які на 100 % забезпечують розшарування ЗС.

Як відмічено раніше, швидкість спливання, а значить і траєкторії частинок домішок в основному залежать від їх діаметру та щільності. Досліди проведені на інших ЗС (кукурудза та соняшник) підтвердили результати досліджень траєкторій домішок ЗС пшениці (рис. 3.18), з розбіжністю до 2,5%.

Таким чином, рекомендований діапазон довжини повітропроникної поверхні, який забезпечить максимальне розшарування ЗС, складає 0,4...0,5 м.

Траєкторії частинок зернової суміші у вертикальному каналі.
Визначені траєкторії частинок ЗС в робочій зоні вертикального каналу (рис. 3.19) з урахуванням попереднього розшарування.

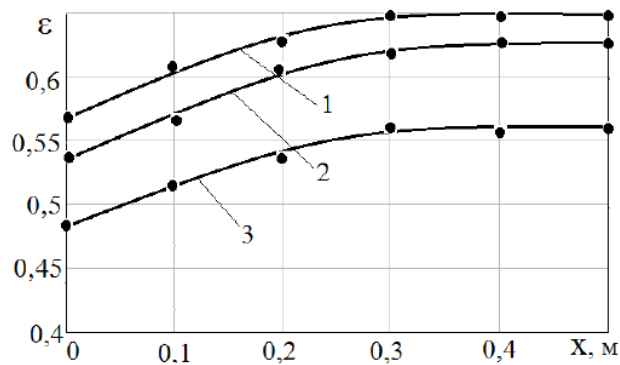


— — верхня границя зернового шару; — — траєкторії домішок
Рисунок 3.19 – Траєкторії частинок домішок у вертикальному каналі ($H=0,05$ м)

Аналізом траєкторій встановлено, що попереднє розшарування ЗС позитивно впливає на її очищення, сприяє перерозподілу частинок домішок у вертикальному ПСК.

3.3. Закономірності зміни пористості зернових сумішей

В результаті експериментів отримані закономірності зміни пористості ЗС по повітропроникній лускатій поверхні (рис. 3.20 – 3.21).

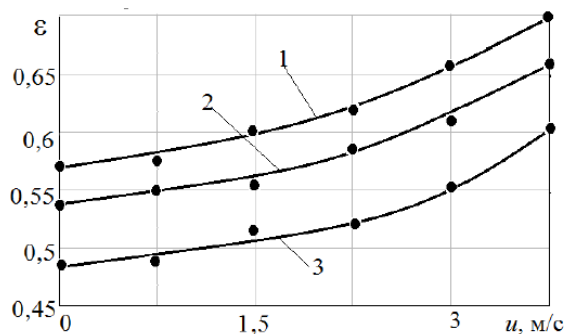


1 – шар соняшнику; 2 – кукурудзи; 3 – пшениці

Рисунок 3.20 – Залежності пористості ЗС по довжині повітропроникної лускатої поверхні ($H=0,05$ м; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$; $u=3$ м/с)

Аналізом даних залежностей встановлено, що по мірі руху ЗС по повітропроникній поверхні її пористість збільшується на 14...17%: соняшнику на 14%, кукурудзи на 17%, пшениці на 14,3%, по відношенню до вихідної (ε_0). Це пояснюється дією на ЗС, як повітряного потоку так і лусок. Інтенсивність розпушування ЗС та збільшення пористості зменшується на повітропроникній поверхні після 0,3 м її довжини. Рекомендовані діапазони пористості ЗС склали: пшениці 0,48...0,56; кукурудзи 0,54...0,63; соняшник 0,57...0,65.

Для визначення впливу швидкості повітряного потоку, яка діє на лускатій поверхні, на пористість ЗС проведені експериментальні дослідження та отримані відповідні залежності (рис. 3.21).



1 – шар соняшнику; 2 – кукурудзи; 3 – пшениці

Рисунок 3.21 – Залежності пористості ЗС від швидкості повітряного потоку на повітропроникній лускатій поверхні ($H=0,05$ м; $a/l=0,08$; $\theta=45^\circ$)

Аналізом залежностей встановлено, що збільшення швидкості повітряного потоку на лускаті поверхні, в діапазоні що досліджується, підвищує середню пористість ЗС (за довжиною поверхні) на 12,2-15%, у т.ч.: пшениці на 12,2%; кукурудзи на 14,8%; соняшнику на 14%.

3.4. Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів пневмосепарувального каналу

Для визначення раціональних параметрів процесу очищення ЗС на розробленому ПСК проведено факторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна [11]. На підставі проведених попередніх експериментів визначені значущі фактори, які впливають на критерії оптимізації – коефіцієнти розшарування та очищення ЗС.

В розкодованому вигляді модель розшарування ЗС на ПСК має вигляд:

$$k_1 = -1009,7 + 40,842 \theta + 676,654 L + 28,797 u + 1,25 \theta L + 0,3167 \theta u - 3,668 L u - 0,503 \theta^2 - 812,76 L^2 - 8,32 u^2, \quad (3.1)$$

В розкодованому вигляді модель ефективності очищення ЗС на ПСК має вигляд:

$$k_2 = -313,14 + 1450,587 k_1 + 38,139 U + 445,513 B - 8,61 k_1 U - 841,67 k_1 B - 8,33 U B - 2071 k_1^2 - 2,16 U^2 - 195,35 B^2. \quad (3.2)$$

Аналіз моделей і визначення оптимальних значень факторів проводили методом двовірних перетинів поверхні відгука, які описуються (3.1), (3.2). Для спрощення розрахунків аналіз проводили з закодованими значеннями.

Плануванням багатфакторного експерименту з критеріями оптимізації – коефіцієнтами розшарування та очищення, встановлені оптимальні конструктивно-технологічні параметри 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; швидкості повітряного потоку у вертикальному каналі $U=6,1...6,7$ м/с; ширині вертикального каналу $B=0,21...0,3$ м.

За вказаними параметрами коефіцієнт розшарування ЗС пшениці складає $k_1=30,53...31,75\%$, а ефективність її очищення розробленим ПСК $k_2=92,15...99,29\%$.

Висновки по розділу

Результатами експериментальних досліджень встановлені залежності швидкості «спливання» та траєкторії частинок домішок підтвердили їх перерозподіл до верхніх підшарів ЗС під дією повітряного потоку та лусок розробленого ПСК. При збільшенні швидкості повітряного потоку на повітропроникній поверхні швидкість спливання частинок домішок підвищується на $62,5...77\%$. 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 $\theta=40...45^\circ$.

Також аналізом встановлених експериментально залежностей 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 $k_1=0,24...0,48$. Встановлено, що ефективність вертикального каналу при очищенні попередньо розшарованої ЗС на розробленому ПСК підвищується на $3...42\%$ у порівнянні з базовою конструкцією. Це підтверджує інтенсифікацію процесу очищення ЗС у вертикальному каналі за рахунок їх попереднього розшарування.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Організація умов та заходів з охорони праці на підприємстві

Майже перед кожним підприємством, що проводить господарську діяльність, постає питання організації охорони праці. Роботодавець у будь-якому разі зобов'язаний створити безпечні умови праці на кожному робочому місці, ужити заходів щодо усунення причин нещасних випадків і професійних захворювань на виробництві. А працівники мають бути поінформовані та проінструктовані стосовно дій, які потрібно виконувати за умови виникнення на підприємстві аварійних ситуацій, пов'язаних із безпосередньою загрозою для їх життя і здоров'я, а також про запобіжні та захисні заходи, що мають бути вжиті.

Закон «Про охорону праці» вимагає від роботодавця одночасно з прийманням працівника на роботу забезпечити йому належні умови праці.

Згідно із ч.2 ст. 5 Закону «Про охорону праці» під час укладання трудових договорів (крім трудового договору про дистанційну роботу, про роботу вдома) роботодавець повинен поінформувати працівника під розписку про умови праці та наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунено, можливі наслідки їх впливу на здоров'я та про права працівника на пільги й компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства й колективного договору.

Водночас працівникові не можна пропонувати роботу, яка за медичним висновком протипоказана йому за станом здоров'я. А до виконання робіт підвищеної небезпеки й тих, що потребують професійного добору, допускаються особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи (ч.3 ст. 5 Закону «Про охорону праці»).

Вимоги до роботодавців щодо охорони праці визначено Вимогами № 67, які включають:

- організацію та дотримання безпеки на робочих місцях;

- облаштування робочих зон;
- облаштування невиробничих приміщень;
- вибір безпечних засобів праці;
- безпечне проведення робіт із застосуванням засобів праці.

З урахуванням технологічних особливостей та умов роботи розроблено окремі галузеві Правила з охорони праці та Правила безпеки виконання окремих робіт, які мають статус нормативних документів, якими мають керуватися кожне підприємство.

4.2. Моделювання процесів виникнення травм при роботі із зерновими сепараторами

При використанні методів логічного моделювання виникнення небезпечних станів можна передбачити протікання будь-якої травматичної ситуації та потім вжити заходів до її попередження. В першу чергу це завдання покладається на керівників виробничих підрозділів або спеціалістів. Тому що, проведення заходів попередження виробничого травматизму дозволить керівникам уникнути відповідальності за нещасні випадки, що можуть статися з їхніми підлеглими.

Проте, основним при застереженні травм залишається сам працівник, так як саме він є безпосереднім учасником процесу формування небезпечної ситуації і йому найлегше їй запобігти. Згідно статистичних даних близько половини всіх нещасних випадків відбуваються з вини самих потерпілих через нехтування правилами безпеки праці. Керівник повинен, окрім забезпечення безпечних умов праці, виховувати у підлеглих розуміння необхідності уникати допущення небезпечних ситуацій [13].

Моделювання процесу, формування і виникнення аварії та травми в процесі роботи очищення зернових сумішей на зернових сепараторах буде мати вигляд:

$$H_{У1} - H_{У2} - H_{У3} - \dots - H_C - (A;T)$$

Пояснення наведеної моделі може бути наступне:

Внаслідок конструктивного недоліку невідбалансований ротор двигуна (НУ1) може викликати появу вібрації (НУ2), яка може призвести до підвищеного спрацювання підшипників (НУ3) і так далі до руйнування підшипників (НС) з викидом частин ротора (А) та можливістю травмування (Т).

Отже, використовуючи побудову моделей впливу небезпечних та шкідливих виробничих чинників на працівників, можна розробити систему, що базується на оперативному пошуку виробничих небезпек, їх поглибленому логічному аналізу та швидкому прийнятті заходів для усунення потенційних небезпек ще до виникнення небезпечних ситуацій.

Висновки по розділу

Таким чином, із вище зазначеного можна сказати, що організація заходів з охорони праці та їх виконання на підприємстві є обов'язковою умовою при прийнятті на роботу працівників. А моделювання виробничих небезпек при роботі з різними машинами та обладнанням забезпечить попередження виникнення травмонебезпечних ситуацій та швидке їх усунення.

РОЗДІЛ 5.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНОГО КАНАЛУ

Розрахунок економічної ефективності від впровадження розробленого ПСК в серійне виробництво проведено за формулою [5]:

$$E_m = \left[E_1 \frac{Q_2}{Q_1} \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(J'_1 - J'_2) - E_H (K'_2 - K'_1)}{P_2 + E_H} - E_2 \right] A_p, \quad (5.1)$$

де $E_{1,2} = C + E_H K_y$ – приведені витрати на виготовлення сепаратора, відповідно, серійного і модернізованого; C – балансова вартість сепаратора; $E_H = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності; $K_y = C/A_p K$ – питомі капіталовкладення на виготовлення сепаратора; A_p – річний об'єм виробництва сепараторів; Q_2/Q_1 – коефіцієнт урахування росту виробництва; $(P_1 + E_H)/(P_2 + E_H)$ – коефіцієнт урахування зміни строку служби; P_1, P_2 – долі відрахувань від балансової вартості на повне відновлення; K'_1, K'_2 – питомі капіталовкладення за варіантами; J'_1, J'_2 – експлуатаційні витрати:

$$J' = Z_p + Z_e + Z_A + Z_r, \quad (5.2)$$

де Z_p – заробітна плата робочого-оператора:

$$Z_p = \frac{z K_p}{Q K}, \quad (5.3)$$

де z – тарифна година ставка; $K_p = 1$ – кількість робітників; Q – продуктивність сепаратора; K – коефіцієнт використання змінного часу; Z_e – витрати на електроенергію:

$$Z_e = \frac{N_e C_e}{Q_{cm} k_1 k_2}, \quad (5.4)$$

де N_e – встановлена потужність електроприводу, кВт; $C_e = 0,15$ грн – вартість 1 кВт/година електроенергії; Q_{cm} – зміна продуктивність, т/зм; $k_1 = 0,86$; $k_2 = 0,97$ – ккд, відповідно, електродвигунів і мережі; Z_A – витрати на амортизацію:

$$Z_A = \frac{C A}{100 Q K \Gamma_z}, \quad (5.5)$$

де $A=15\%$ - норма амортизаційних відрахувань на реновацію; Γ_z – річне завантаження, годин; Z_r – витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування:

$$Z_r = \frac{CB}{100 Q K \Gamma_z}, \quad (5.6)$$

де $B=7\%$ - норма річних відрахувань на ремонт і обслуговування.

Строк окупності додаткових капіталовкладень визначали за формулою:

$$\tau = \frac{C_2 - C_1}{(J'_1 - J'_2) Q \Gamma_s}, \quad (5.7)$$

де $C_{1,2}$ – балансові вартості, відповідно, модернізованого і серійного сепараторів.

Техніко-економічні показники впровадження розроблених ПСК в серійне виробництво представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники використання пневмосепарувальних каналів на сепараторі КБС-1270.4.00

Найменування показників	базовий ПСК			розроблений ПСК		
	пшениця	соняшник	кукурудза	пшениця	соняшник	кукурудза
Капіталовкладення, тис. грн	240			249,6		
Строк служби сепаратора, років	8			8		
Встановлена потужність двигунів, кВт	12			12		
Витрати на електроенергію, грн/т	0,316	0,96	0,71	0,256	0,77	0,59
Витрати на заробітну платню, грн/т	0,307	0,932	0,69	0,249	0,75	0,53
Витрати на амортизацію, грн/т	87,79	3,17	6,55	73,91	2,64	5,28
Витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування, грн/т	47,45	1,71	3,54	39,95	1,43	2,85
Експлуатаційні витрати, грн/т	135,87	6,78	11,48	114,37	5,58	9,21
Питомі капіталовкладення, грн/т	564,71	20,41	42,11	475,43	16,98	33,96
Строк окупності додаткових капіталовкладень	-	-	-	0,54	0,02	0,03
Річний економічний ефект на один сепаратор, тис.грн:	-	-	-	19,7	27,12	24,43

Отриманий річний економічний ефект та термін окупності підтверджує доцільність використання розробки і виготовлення, як серійного виробництва.

Висновки по розділу

Таким чином, після проведення оцінки ефективності ПСК можна зробити висновки про доцільність використання розробки з терміном окупності до 1 року та річним економічним ефектом на один сепаратор для очистки пшениці – 19,7 тис. грн., соняшнику – 27,12 тис. грн. і кукурудзи 24,43 тис. грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі 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.

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. Проведення теоретичних та експериментальних методів, обґрунтування параметрів розробленого ПСК дозволить інтенсифікувати процес очищення ЗС та підвищити продуктивність барабанних сепараторів.

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%.

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.

В результаті проведення багатфакторного 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 – $k_2=92,15...99,29$ %.

Оцінка ефективності ПСК свідчить про доцільність використання розробки. Так, як термін окупності становить близько 1 року, а річний економічний ефект на один сепаратор для очистки пшениці дорівнює 19,7 тис. грн., соняшнику – 27,12 тис. грн. і кукурудзи 24,43 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдуєв М.М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Харків, 2007. 296 с.
2. Бурков А.И., Андреев В.Л. Технология очистки семян зерновых культур с фракционированием на решетках и раздельной обработкой воздушным потоком. Науч. тр. ВИМ. 2002. Т. 141, ч. 2. С. 103 – 111.
3. Гиевский А.М., Чибисов А.Н. Пневмоинерционный сепаратор вороха семенников трав. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 5. С. 5–8.
4. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
5. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Національний стандарт України. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 23 с.
6. Зерноочистительные машины Buhler. веб-сайт. URL: https://www.buhlergroup.com/europe/ru/downloads/Cleaning_machines.pdf.
7. Костюк В.Є., Кирилаш О.І. Математичне моделювання течії повітря в камері аспіраційній БСХ-100.20 модифікованої конструкції. Звіт про розробку НТП. Хорол, 2015. 19 с.
8. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. Машгиз, 1962. 176 с.
9. Матвеев В.Н., Кирсанов Е.А. Вязкость и структура дисперсных систем. Химия. Т.52, №4. 2011. С.243 – 275.
10. Машины для послеуборочной поточной обработки семян. Теория и расчет машин, технология и автоматизация процессов / З.Л. Тиц, В.И. Анискин и др. Машиностроение, 1967. 446 с.

11. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко и др. Харків: Міськдрук, 2010. 360 с.
12. Нилов В.П. Обоснование условий протекания процесса пневмоинерционной сепарации мелкого зернового вороха. Совершенствование уборки и послеуборочной обработки зерна. 1981. Вип. 168. С. 63 – 80.
13. Прокопенко Е.В., Лісовий І.О., Лісова Т.С. Моделювання виробничих небезпек та зменшення їх шкідливого впливу під час проведення механізованих робіт. Зб. наук. праць УНУС. Умань, 2015. С. 79-86.
14. Разумов И.М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов. Химия, 1972. 240 с.
15. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова : Химия, 1986. 352 с. 11
16. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Альянс, 2004. 464 с.
17. Шушляков О.В. Підвищення ефективності сухої очистки газів за допомогою інерційних апаратів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.23.03/ Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. Харків, 2004. 37 с.
18. Astarita G., Marrucci G. Principles of non-Newtonian fluid mechanics London - New York: McGraw-Hill, 1974. 289 p.
19. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press. 1967. 615 p.