

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно – технологічний факультет  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Допущений до захисту:  
т.в.о. завідувача кафедри  
к.т.н., доцент Швець Л.В.

---

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

“ \_\_\_\_\_ ” листопада 2020 р.

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ  
ЗАСОБІВ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»  
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

Виконав: студент групи 62-АІ  
Шумигора Василь Васильович

---

Керівник: к.т.н., доцент  
Труханська Олена Олександрівна

---

Вінниця - 2020р.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	
ВСТУП .....	
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	
1.1. Характеристики і технологічні показники післязбиральної обробки зернового вороху .....	
1.2. Аналіз теоретичних досліджень процесів, способів очищення зернових сумішей від домішок і конструкцій пневмосепарувальних каналів .....	
1.3. Висновки до розділу, мета і задачі досліджень.....	
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ.....	
2.1. Моделювання руху зернової суміші по нахиленій поверхні пневмосепарувального каналу .....	
2.2. Моделювання розшарування зернової суміші на повітропроникній поверхні пневмосепарувального каналу .....	
2.3. Моделювання процесу очищення зернової суміші у вертикальному пневмосепарувальному каналі .....	
2.4. Висновки до розділу .....	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
3.1. Методика проведення досліджень.....	
3.2. Результати досліджень.....	
3.3. Висновки до розділу.....	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	
ДОДАТКИ	

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему: «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів післязбиральної обробки зерна» складається із вступу, 3 розділів розрахунково-пояснювальної записки, загальних висновків, списку використаних джерел і 9 аркушів графічної частини. Основний зміст роботи викладений на сторінках машинописного тексту, містить рисунки і таблиці.

Магістерська робота присвячена підвищенню ефективності процесу очищення зернових сумішей за допомогою технічних засобів, які входять до складу зернових сепараторів та визначають їх продуктивність.

В першому розділі розглянуто біологічні особливості зернового вороху і технологічні показники процесу його очищення, проведено аналіз існуючих технологій і способів післязбиральної обробки зернової суміші від домішок.

У другому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесу очистки зерна, обґрунтовано доцільність застосування запропонованого пневмосепарувального каналу з розшарувальним пристроєм.

В третьому розділі наведено методику проведення та результати досліджень.

Використання розшарувального пристрою розробленого пневмосепарувального каналу призведе до збільшення пористості зернових сумішей на 12,2...17%, що підтверджує можливість інтенсифікації процесу їх очищення.

Ключові слова: зерно, зернові суміші, очищення, пневмосепарувальний канал, домішки, продуктивність, ефективність.

## ANNOTATION

Master's thesis on the topic: "Substantiation of structural and technological parameters of technical means of post-harvest processing of grain" consists of an introduction, 3 sections of the calculation and explanatory note, general conclusions, a list of sources used and 9 sheets of graphics.

The main content of the work is set out on the pages of typewritten text, contains figures and tables.

The master's thesis is devoted to increasing the efficiency of the process of cleaning grain mixtures with the help of technical means that are part of grain separators and determine their productivity.

In the first section the biological features of the grain heap and technological indicators of the process of its soybean purification are considered, the analysis of the existing technologies and methods of post-harvest processing of the grain mixture from impurities is carried out.

The second section presents the results of theoretical studies of the grain cleaning process, substantiates the feasibility of using the proposed pneumatic separation channel with a delaminating device.

The third section presents the methodology and results of research.

The use of a delaminating device of the developed pneumatic separation channel will increase the porosity of grain mixtures by 12.2... 17%, which confirms the possibility of intensifying the process of their purification.

Key words: grain, grain mixtures, cleaning, pneumatic separating channel, impurities, productivity, efficiency.

## ВСТУП

Сільське господарство України є пріоритетною галуззю, що обумовлено необхідністю забезпечення продовольчої безпеки держави та нарощування її експортного потенціалу на світовому ринку продовольства. Збільшення врожайності зернових культур є важливим питанням. Це забезпечення населення високоякісними і екологічно безпечними продуктами харчування, промисловість – сировиною, а також формування експортного потенціалу [1].

Україна, завдяки сприятливим природно-кліматичним умовам, є потужним світовим виробником основних зернових культур: пшениця, кукурудза, соняшник, ячмінь та ін. Сьогодні, в умовах ринкової економіки, переробка і

зберігання - одна із найважливіших ланок у системі формування зерна як товару, підготовки його до продажу та очікування часу найвигіднішої реалізації [2].

Післязбиральна переробка зерна і насіння сприяє підвищенню їхньої якості і тим самим зменшенню втрат урожаю. Ефективне вирішення цього завдання можливе насамперед завдяки застосуванню новітніх досконалих індустріальних технологій первинної переробки зерна, в основі яких - високотехнологічні зерноочисні лінії та комплекси [3].

Первинне очищення зерна, а так само його подальше зберігання - це найбільш важливі процеси у всій виробничій галузі. Первинне очищення зерна не можна проводити не в свій час і без дотримання ряду технологічних тонкощів виробництва, так як втрати зерна в такому випадку можуть досягати 20% врожаю. Весь процес первинного очищення зерна краще всього проводити після сушіння зерна, а попереднє очищення перед безпосереднім закладанням у сховище на спеціальних зерноочисних підприємствах (комплексах). Процес очистки зерна можна розділити на три етапи обробки: попереднє очищення, сушіння, первинна очистка і весь період закінчується вторинним очищенням і далі – на зберігання [4].

Відомо багато різних науково-обґрунтованих методів збільшення врожайності зерна. Одним із способів є використання для сівби найбільш продуктивного насіння, яке отримується шляхом сепарування та має покращені насінневі властивості. Вченими доведено, що відбір із загальної маси найбільш продуктивного насіння із найбільшим запасом поживних речовин дозволяє отримати більшу врожайність [5].

Дані випробувань повітряних каналів серійних машин показують, що і очищення та сортування насіння здійснюється в них з недостатньо високою якістю. Це вказує на те, що можливості повітряного потоку використовуються далеко не повністю. Тому необхідні створення принципово нових конструкцій повітряних каналів і способів поділу, які дають можливість підвищити якість розділення насінневого матеріалу [6].

Процес очищення зернової суміші здійснюється за різними ознаками розділення: аеродинамічні властивості, розмірні характеристики, щільність, стан поверхні, форма та ін. Найпоширенішими є машини універсального призначення з повітряно-решітними робочими органами [7].

Підвищення обсягів виробництва зерна, засміченість зернової суміші ведуть до того, що сепарувальні канали сучасних зерноочисних машин мають недостатню пропускну здатність, а стислі агростроки виконання зерноочисних робіт (внаслідок засміченості та вологості вороху) призводять до багаторазових пропусків зернової суміші через робочі органи. Наслідком є втрати зерна, його травмування, збільшення експлуатаційних витрат та собівартості виконання робіт [8]. Перспективним напрямком підвищення ефективності процесів очищення зернової суміші від легких домішок є їх інтенсифікація шляхом застосування попереднього розшарування за допомогою комплексних барабанних сепараторів, а обґрунтування параметрів і розробка конструкції пневмосепарувального каналу є актуальним завданням для розвитку агропромислового комплексу України.

Мета роботи - підвищення ефективності очищення зернової суміші барабанним сепаратором шляхом обґрунтування параметрів пневмосепарувального каналу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих технологій, способів і засобів післязбиральної обробки зернової суміші;
- побудувати математичну модель руху зернової суміші в пневмосепарувальному каналі;
- обґрунтувати залежність швидкості зернової суміші від конструктивно-технологічних параметрів пневмосепарувального каналу;
- визначити раціональні параметри пневмосепарувального каналу барабанного зернового сепаратора.

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес очищення зернової суміші від домішок.

*Предмет дослідження:* вплив параметрів пневмосепарувального каналу на рух зернової суміші в робочих зонах розшарувального пристрою.

Теоретичні дослідження виконані із застосуванням основних положень механіки суцільних та гетерогенних середовищ, аеродинаміки, математичного моделювання і планування багатофакторного експерименту із застосуванням статистичних методів оцінки отриманих даних. Обробка результатів досліджень виконана із застосуванням положень теорії ймовірності та математичної статистики з використанням комп'ютерних програм.

Наукова новизна в наступному:

- визначено критерії ефективності процесу очищення зернової суміші в пневмосепарувальному каналі;

- встановлені закономірності руху компонентів зернової суміші в робочих зонах розшарувального пристрою;

- обґрунтовані параметри пневмосепарувального каналу з врахуванням ефективності попереднього розшарування, технологічних показників і фізико-механічних властивостей домішок.

Використання запропонованої конструкції пневмосепарувального каналу з розшарувальним пристроєм підвищить ефективність роботи зернових барабанних сепараторів у порівнянні з існуючими.

## РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Характеристики і технологічні показники післязбиральної обробки зернового вороху

Зерновий ворох, що надходить з бункерів комбайнів чи молотарок складається із зерна основної культури та домішок. Відповідно до [9] домішки поділяють на зернові та сміттєві. До зернової домішки відносять пошкоджені, недорозвинуті, биті, плюсклі зерна основної культури та зерна інших культурних рослин. Сміттєва домішка - органічні речовини (частки рослинних стебел, солома), насіння дикорослих рослин та мінеральні речовини (пісок, земля, каміння). У зерновій масі можуть бути і металеві домішки, які потрапляють у збіжжя під час збирання врожаю, перевезення та зберігання. Різні домішки у надають зерновій масі небажаних властивостей: підвищують її вологість (оскільки вологість рослинно-органічних домішок вища, ніж вологість зерна), ускладнюють зберігання і переробку зерна [10, 11].

В зерні після збирання врожаю продовжують відбуватися біохімічні і фізіологічні процеси. Це викликає підвищення температури зернової маси, активує життєдіяльність мікроорганізмів і як наслідок - зниження якості зерна. Ці процеси особливо активно проходять у зерновій масі, яка має підвищену вологість, тому її слід піддавати спеціальній обробці для доведення до потрібних кондицій, які регламентуються відповідними стандартами на продовольче і фуражне зерно, а також на насіннєвий матеріал [3].

Відповідно до [9] для очищення та сортування зернових матеріалів використовують наступні типи зерноочисних машин: повітряно-решітні, трієрні, повітряно-решітні-трієрні.

Подальше підвищення продуктивності повітряно-решітних зернових сепараторів на пряму пов'язане з необхідністю інтенсифікації процесу очищення зернових сумішей від легких домішок шляхом удосконалення пневмосепарувальних каналів. Розділення компонентів зернової суміші повітряним потоком ґрунтується на відмінностях аеродинамічних властивостей компонентів насіннєвої суміші (парусності, розмірів, маси, стану і формі поверхні та ін.). відділення легких домішок на початковому етапі розвантажує решітні блоки та підвищує ефективність сепараторів.

Дослідженнями взаємодій сипучих середовищ з робочими органами зерноочисних машин, інтенсифікацією їх технологічних процесів займалися багато видатних науковців [6, 7, 8, 12-17, 28, 32] та інші.

Проведення дослідження з встановлення способів підвищення ефективності очищення зернової суміші від легких домішок та розробка конструкції пневмосепарувальних каналів зернових сепараторів є актуальним та перспективним завданням, вирішення якого дозволить створити конкурентоздатну вітчизняну зерноочисну техніку.

Для дослідження процесу очищення зернової суміші від легких домішок необхідно провести аналіз його характеристик.

Зернова суміш, що надходить у пневмосепарувальний канал, представляє гетерогенну систему, яка складається з газоподібної (повітряної), зернової та



домішкової фаз. Домішки - 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. Важливішою фізико-механічною характеристикою домішок, з точки зору пневмосепарації, є дисперсність – інтервальний розподіл частинок за крупністю.

Засміченість зернового вороху домішками залежить від природно-кліматичних умов, рівня агротехніки, стиглості хлібів, а також від якості роботи зернозбиральних комбайнів, та складає від 1 до 25%, причому вміст легких домішок – до 5%. Така кількість легких домішок потребує використання ефективного пневмосепарувального каналу [18].

Проведений аналіз відділених повітряним потоком легких домішок (для певної зернової суміші) 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% [19]. При цьому авторами одержано аеродинамічні характеристики компонентів легких домішок (табл.1.1).

Таблиця 1.1 Аеродинамічні характеристики компонентів легких домішок

Фракція	Швидкість повітряного потоку								
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
бите зерно	-	-	5	50	30	15	-	-	-
щупле зерно	2,9	-	3,6	51	39,6	2,9	-	-	-
насіння сорних рослин	4,9	0,9	4,9	51,3	31,4	0,9	0,9	2,9	1,9
сорні домішки органічні	5	5	65	20	5	-	-	-	-

Сортування та очищення зернової суміші засноване на здатності частинок чинити різну протидію повітряному потоку в залежності від їх властивостей. Ці фізичні властивості називають аеродинамічними властивостями частинок

зернової суміші, а відповідна реакція зі сторони повітряного потоку – опір середовища [20].

Силу опору  $R$  середовища в визначають за [21]:

$$(1.1)$$

де  $\rho$  – щільність середовища;  $F$  – міделевий перетин тіла (площа проекції тіла на площину, яка перпендикулярна до швидкості руху);  $v$  – відносна швидкість;  $k$  – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Коефіцієнт опору залежить від форми частинки, стану її поверхні та режиму руху потоку. Режим руху повітряного потоку є ламінарним або турбулентним, та для потоку з групою частинок характеризується критерієм Рейнольдса [21]:

$$(1.2)$$

де  $v_c$  – середня швидкість потоку;  $d_{екв}$  – еквівалентний діаметр частинки;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості;  $\varphi$  – коефіцієнт форми частинки;  $\beta$  – коефіцієнт пористості.

Окрім сили опору, яка направлена в сторону протилежну вектору відносної швидкості, у потоці на тіло діє сила тяжіння  $G$ , яка направлена донизу.

При дослідженнях динаміки дисперсних частинок у повітряному потоці використовують показник – швидкість витання (критична швидкість). Швидкість витання – це відносна швидкість, при якій частинка знаходиться у повітряному потоці у зваженому стані ( $R / G = 1$ ) та визначається за [21]:

$$(1.3)$$

Швидкість витання частинок є визначаючим показником процесу очищення зернової суміші у повітряному потоці пневмосепарувального каналу. швидкості витання компонентів зернової суміші визначають у парусних класифікаторах з вертикальним повітряним потоком РПК-30, ППК-ВИМ, РПК-30 та ін. Швидкості витання частинок зернової суміші у повітряному потоці змінюються в залежності від їх форми та стану поверхні [22].

Для досліджень процесу очищення зернової суміші застосовують спрощення форми частинок до сферичної, що призводить до похибки результатів. Значення поправочних коефіцієнтів, що враховують форму частинок, в літературних джерелах різноманітні. Для досліджень та обґрунтування параметрів процесу очищення зернової суміші необхідно встановити коефіцієнти форми компонентів зернової суміші.

Ефективність процесу очищення зернової суміші у повітряному потоці визначається коефіцієнтом очищення  $\eta$  та чіткістю сепарації  $z$  [19-22]:

$$(1.5)$$

де  $A$  – вага легкої фракції, що виділена повітряним потоком;  $B$  – вага легкої фракції в вихідній зернової суміші ;  $B$  – вага зерна основної культури у легкій фракції, що виділена повітряним потоком. Для роботи пневмосепарувального каналу потрібен повітряний потік, який створюється вентилятором. Виконання технологічного процесу вимагає енергію на приведення в дію вентилятора, на подолання гідравлічного опору системи.

Пневмосепарувальний канал 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 пневмосепарувального каналу використовують показники питомої ваги та об'єму по відношенню до продуктивності.

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

Підвищення продуктивності сепараторів з дотриманням відповідної якості очищення зернової суміші, обумовлено інноваційними способами та конструкціями пневмосепарувального каналу.

Дослідження процесу очищення зерна повітряним потоком, практика експлуатації зернових сепараторів, визначили технологічні фактори, що впливають на ефективність процесу [22]:

- питома завантаження та початкова швидкість частинок зернового вороху;

- швидкість та рівномірність повітряного потоку.

Встановлено, що початкова швидкість вводу зернової суміші у пневмосепарувальний канал, направлення руху впливає на ефективність розділення.

Визначено способи подачі зернової суміші [22]:

- за допомогою направляючої, що встановлена з нахилом;
- вібруючим лотком;
- рифленим живильником-валком.

Визначено, що оптимальна швидкість вводу зернової суміші складає 0,3...0,4 м/с. При цьому кут нахилу направляючої поверхні приймають до кута тертя зерна по металу, а саме 25...35° [22].

Одним із технологічних параметрів роботи пневмосепарувального каналу є швидкість та рівномірність повітряного потоку в робочій зоні.

Якість розділення компонентів зернової суміші перш за все залежить від різниці швидкості витання зерна та домішок, забезпечення певної швидкості повітряного потоку.

Досліджено, що для забезпечення швидкості та рівномірності використано системи жалюзі, які дозволяють регламентувати величину швидкості у заданій точці робочої зони [6, 23].

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

Проведений огляд існуючих конструкцій пневмосепарувальних каналів виявив різницю в їх класифікації. У роботі пневмосепарувальні канали поділяють на машини з розімкненим та замкненим циклами повітряного потоку.

В практиці конструювання повітроочисних систем комбінованих зерноочисних машин набули розвитку три основні конструктивні схеми: одноканальні, секційні та безканалні [6, 14, 18, 19-23].

Спеціальні зерноочисні сепаратори для очищення зернової суміші 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 [6, 14, 18, 19-23].

Дослідженнями [6,7,8,16,18,21-23] науковців було проведено наступні класифікації пневмосепарувальних каналів:

- в залежності від руху повітряного потоку: горизонтальний, нахилений, вертикальний, протитік у нагнітальному або всмоктувальному потоці з сепарацією у затопленому струмені, в камерах та каналах, з сепарувальною поверхнею та багатократною дією;

- 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 пневмосепарувальних каналів (рис.1.2):

- від наявності каналів: безканалні (рис. 1.2, а), каналні (рис.1.2, б-л);
- за принципом дії: пасивні (рис.1.2, а-к), активні (обертальні) (рис.1.2, л);
- за розташуванням: одноканальні (рис.1.2, б-ж, і-л), секційні (рис.1.2, з);
- за формою перетину каналів: прямокутні (рис.1.2, в, д, з, к), круглі (рис.1.2, д, е), кільцеві (рис.1.2, і);
- за направленням каналів: вертикальні (рис.1.2, б-е, з-к), горизонтальні (рис.1.2, а), похилі (рис.1.2, ж);
- за типом руху повітряного потоку: нагнітальні (рис.1.2, а, б, ж), всмоктувальні (рис.1.2, в, д, е, з-л), всмоктувально-нагнітальні (рис.1.2, г);
- за типом пневмосистеми: машини з розімкненим (рис.1.2, а-в, д-л) та замкненим циклами повітряного потоку (рис.1.2, г).

Недостатньо ефективним є використання безканалних сепараторів внаслідок: відсутності рівномірності повітряного потоку, значними габаритними розмірами, низькою якістю очищення та високою енергоємністю.

Розрізняють безканалні пневмосепаратори: нагнітальні, наприклад, віялки-сортувалки або нагнітальні Триумф – 100 фірми Leino (Фінляндія); всмоктувальні (канали сепаратора фірми Miag (Німеччина). Відсутність повітроочисників у більшості безканалних сепараторів не дозволяє використовувати їх у приміщеннях.

Канальні пневмосепаратори внаслідок концентрування дії повітряного потоку на шар зернової суміші мають більш якісне очищення у порівнянні з безканалними. До однієї із перехідних моделей можна віднести сепаратори з горизонтальним каналом «САД» (рис.1.2, 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.

Дослідження ефективності роботи пневмосепараторів різної форми (прямокутної, квадратної, круглої, кільцевої) проводились за різного складу зернової суміші та питомого завантаження. Встановлено, що рівномірність поля швидкості повітряного потоку найвища в каналах круглої та кільцевої форм, далі – прямокутної та квадратної. Аналогічно відбувається з ефективністю очищення зернової суміші, відповідно, до форми каналу та його завантаження [24].

Прямокутні пневмосепаратори є поширеними на зернових сепараторах (рис. 1.3 – 1.5).

Рисунок 1.2 – Схеми пневмосепарувальних пристроїв: а – нагнітальний безканалний; б, в – нагнітальний та всмоктувальний каналний вертикальний; г – каналний з замкнутою системою; д – всмоктувальний вертикальний з похилою сіткою; е – всмоктувальний вертикальний з подачею за периметром; ж – нагнітальний похилий; з – всмоктувальний секційний; і – всмоктувальний кільцевий; к – всмоктувальний зі змінним робочим перетином; л – всмоктувальний дисковий ротаційний.

Рисунок 1.3 – Схема зернових сепараторів: а – ОВС-25; б – ВП-20А; 1 – приймальна камера; 2 – розподільний шнек; 3 – живильні валики; 4 – повітряні канали; 5, 6 – верхня і нижня нахилені дошки; 7 – транспортер; 8, 9 – нижній і верхній решітні стани

Рисунок 1.4 – Схема технологічного процесу сепараторів: а – PETHUS K 523; б – аспіраційна система зерноочисника PETHUS U12/U15; в – Cimbria Delta Combi Cleaner 157; г – насінне-сортувальна машина K 541 Gigant фірми PETHUS

Рисунок 1.5 – Технологічні схеми роботи сепараторів: а – МПО-50М [86]; б – ЗАВ -20.30 000; в – СВУ-10А; г – насінне-очисна універсальна машина СУ-01; д – МВО-10 (МЗУ-25/15); е – ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ М-10 (ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ М-20); ж – пневмосепарувальний пристрій сепаратора ПДП-10

Подібні канали є елементом сепараторів ОВС-25 та ОВП-20А (рис.1.3), PETHUS K 541 (Німеччина), Cimbria Delta Combi Cleaner 157 [173] (Данія) (рис.1.4), МПО-50, СВУ-10А, МВО-10, зернової суміші М-10 (рис.1.5) та інших. Одноканальні повітряноочисні системи у сепараторах, як правило, включають приймальну камеру, пневмосепарувальний каналі (переважно вертикальний), пилоосаджувальну камеру, вентилятор. Використання таких пристроїв передбачає відділення домішок на початковому етапі, що розвантажує решета та підвищує продуктивність сепараторів.

За рахунок встановленого після пневмосепарувального каналу подільника зернової суміші подається двома потоками, які поступають на верхній та нижній решітні стани (рис.1.3, рис.1.5, б-е). Ефективність відокремлення легких домішок в таких пневмосепарувальних каналах низька, особливо при збільшенні продуктивності.

При підготовці насінневого матеріалу або роботи в приміщеннях використовують пневмосепарувальні канали з секційними каналами (колонка БКА) (рис.1.2, з) та багатократним очищенням (рис.1.2, г, 1.5, а). 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. пневмосепарувальні канали з розімкнутим циклом потребують

ефективних пиловловлювачів, які забезпечують нормовану запиленість робочої зони [27]. Для підвищення якості очищення зернової суміші від легких домішок використовують багатократне очищення (рис. 1.6, 1.7). Подібне очищення забезпечується за рахунок замкнутої системи (рис.1.6) або використанням двох каналів (основного та каналу другої аспірації). Подвійні пневмосепарувальні канали є елементами в двократній аспіраційній системі з замкнуто–розімкнутим циклом повітрообміну конструкції А.І. Буркова, сепараторі Denis NSD-3 та сепараторі TAS 152A-2. Таке розташування каналів збільшує ефективність очищення зернової суміші від домішок але потребує незалежного регулювання кожного та потребує підвищення витрати повітря та ускладнює конструкцію.

Рисунок 1.6 – Схеми пневмосепарувальних пристроїв з замкнутою системою циркуляції повітря: а – ЗД-2,5; б – машина МОЗ-50 (Агротек); в – сепаратор БСХ-100 [25]

а – сепаратора Denis NSD-3; б – сепаратор TAS 152A-2

Рисунок 1.7 – Пневмосепарувальні пристрої з багатократним очищенням

Використання кільцевих пневмосепарувальних каналів у більшості випадків має вигляд (рис.1.8), наприклад, машина ПЗА-40, агрегат ЗА-40, ворохоочисник ВО-40 (ВО-50), сепаратори зернової суміші ОВВ -10, ОВВ-20. За відсутності зон завихрення та наявної рівномірності поля швидкості повітряного потоку кільцеві канали ефективніші за круглу та прямокутну форму перетинів.

Більш удосконалену конструкцію кільцевого пневмосепарувального каналу впроваджено у вібровідцентрових сепараторах (СВС-5, СВС-15, СВС-25, Р8-БЦСМ-25, Р8-БЦСМ-50, А1-БЦСМ-100), де використано активний обертальний розкидач (рис.1.8, в). Для рівномірності подачі зернового матеріалу в кільцевий канал тарілчастий розкидач виконано в формі пологого усіченого конусу, з встановленими лопатками.

Таким чином, з аналізу пневмосепарувальних каналів серійних сепараторів видно, що потенціал більшості конструкцій не вичерпано та потребує подальшого удосконалення.



Одним з факторів, що впливає на ефективність розділення зернової суміші у повітряному потоку, є питома завантаження каналу. попередня підготовка матеріалу (рис.1.9), а саме розшарування суміші з перерозподілом частинок легких домішок, дозволяє значно підвищити якість розділення.

Для підвищення ефективності очищення зернової суміші було запропоновано використати пристрій (рис.1.9,а) [28]. Сопла пристрою діють на зернову суміш та виділяють на початковому етапі легкі домішки. Це забезпечує підвищення якості очищення зернової суміші на 9...12% та продуктивності на 15%. Одним зі способів підвищення ефективності процесу очищення зернової суміші є використання живильних пристроїв в пневмосепарувальному каналі

В пневмосепаратор (рис.1.9, б) встановлено живильник з решітчастою поверхнею та активаторами [30], який забезпечує попереднє виділення соломистих домішок та перенос їх у верхні підшари зернової суміші . це дозволяє рівномірно розподілити шар в робочій зоні пневмосепарувального каналу, підвищити якість очищення зернової суміші.

а) б)

Рисунок 1.8 – Схеми сепараторів з кільцевим пневмосепарувальним пристроєм: а – кільцевий ПС канал; б – ПСК сепараторів СВС та БЦС

а) б) в)

Рисунок 1.9 – Схема пневмосепараторів з попередньою підготовкою сипких матеріалів: а – з соплом: 1 – вертикальний канал; 2 – стінки вертикального каналу; 3 – патрубок для важкої фракції зернової суміші ; 4 – патрубок для легкої фракції зернової суміші ; 5 – сопло; 6 – вентилятор; б – з решітчастим барабаном живильником: 1 – канал; 2 – вікно для введення вороху; 3 – вал; 4 – живильник; 5 – пола центральна частина; 6 – активатори; в – з вібраційним лотком

Для підвищення ефективності процесу очищення зернової суміші на (рис.1.9,в) живильний пристрій виконано у вигляді віброуючого лотка. За рахунок цього зерно перерозподіляється в шарі перед пневмосепарувальним каналом та

забезпечується необхідна рівномірність подачі. Це дозволяє підвищити якість процесу очищення зернової суміші .

Таким чином, попередня підготовка зернової суміші , повітряного потоку дозволяє поліпшити якість та збільшити продуктивність пневмосепарувального каналу.

Способом підвищення ефективності пневмосепарувального каналу є розділення або повторення їх робочої зони (рис.1.10-1.16), забезпечивши при цьому етапність процесу очищення зернової суміші . Так, у класифікаторі (рис.1.10) пропонується використовувати пристрій, що дозволяє рівномірно розподілити зерновий матеріал в робочій зоні [16]. Пристрій має вигляд жалюзійної решітки, яка складається з пластин розташованих ступінчасто. Продуктивність модернізованого класифікатора збільшується в 2-3 рази, при цьому якість розділення підвищується до 15%.

Оптимальні параметри подібних перегородок досліджені авторами в [21-23], де визначені довжина каналу, зазор між перегородкою і скатною, відстань від передньої стінки до перегородки і між сусідніми перегородками.

Дослідження роботи таких каналів довели залежність швидкості повітряного потоку від товщини шару зернової суміші , визначили витрати зерна з легкими домішками [23].

Відомі пневмосепаратори (рис.1.18, г), в яких для підвищення продуктивності та якості розділення встановлені перфоровані повітропроникні поверхні. Збільшення площі контакту «повітряний потік – зернової суміші » та попередня підготовка за рахунок повітропроникних полиць призводить до підвищення ефективності процесу пневмосепарації. Недоліком даного класифікатора є ефективність у пристінному просторі, що в свою чергу дає неповне використання робочого об'єму апарату.

Для підвищення якості та продуктивності процесу очищення у робочій зоні повітряного сепаратору встановили пристрій зі ступінчастими решітками (рис.1.18, д). При русі по решітках частинки зернової суміші перерозподіляються в шарі, при цьому його висота збільшується. Решітні

поверхні виконано вібраційними та з регульованим повітряним потоком в робочій зоні. Подібний метод підвищення ефективності пневмосепарувального каналу також використано у повітряно-решітному сепараторі зерна [26].

Розміри отворів решіт збільшуються дискретно по каскадах у напрямі руху матеріалу. Недоліком конструкції є складність і низька ефективність внаслідок перемішування фракцій. Підвищити ефективність процесу очищення можна встановленням додаткових елементів в робочу зону, які збільшують час знаходження зернової суміші в робочій зоні та попередньо розподіляють їх частинки [26] (рис.1.18, е). Недоліком є низька ефективність розділення матеріалу на фракції внаслідок зіткнення неоднорідних частинок, які набувають швидкість під дією пневмопотуку, а також за причиною неоднорідності динамічних параметрів у поперечному перетині.

З метою інтенсифікувати процес розділення в [29] запропоновано змінити спосіб введення зернової суміші в пневмосепарувальний канал та запровадити їх попереднє розшарування з допоміжного повітряного каналу. Швидкість виходу струменів повітряного потоку в 1,5 рази вища швидкості витання компонентів зернової суміші, що дозволяє більш ефективно винести в верхній підшар легкі домішки.

Відомий ворохоочисник (рис.1.19, а), в якому встановлено аеролоток у вигляді повітропроникного решета з круглими отворами та циліндричного решета. Дія повітряного потоку на решеті з круглими отворами викликає перерозподіл до верхніх підшарів зернової суміші частинок легких домішок, які в подальшому відділяються на циліндричних решетах [23].

Для попередньої підготовки зернової суміші перед циліндричним решетом (рис.1.19, б) використано аероживильник з повітророзподільчою решіткою, що забезпечило питому продуктивність 5...6 т/год дм.

а)

б)

Рисунок 1.19 – Схеми ворохоочисників з попередньою підготовкою суміші  
а – аеролоток з решетом; б - аероживильник з повітророзподільчою решіткою.

Таким чином, підвищення ефективності процесу пневмосепарації залежить від умов введення та розподілу зернової суміші в робочих зонах пневмосепарувального каналу.

Для підвищення продуктивності пневмосепарувального каналу деякі дослідники використовують збільшення ширини каналу. Це в свою чергу веде до збільшення габаритів сепараторів та до нерівномірності завантаження за шириною каналу, що викликає втрату якості сепарування зернової суміші та не призводить до оптимального результату.

Враховуючи аналіз існуючих та перспективних конструкцій пневмосепарувального каналу, їх повна класифікація має вигляд (рис.1.20, 1.21).

Аналізом досліджень процесу очищення зернової суміші у повітряному потоці та конструкцій пневмосепарувального каналу встановлені способи підвищення ефективності: оптимізацією технологічних параметрів; попередньою підготовкою зернової суміші та повітряного потоку; інтенсифікацією розподілення компонентів; використанням багатократного очищення; комбінуванням пристроїв різного типу дії.

Об'єктом дослідження обрано пневмосепарувальний канал комплексного барабанного сепаратору типу КБС (рис.1.22).

Сепаратор призначено для попереднього очищення зернової суміші, який складається з пневмосепарувального каналу з аспіраційною системою та решітного блоку. пневмосепарувальний канал сепаратора є типовим для більшості зернових сепараторів, тому що має вертикальний прямокутний канал, де відбувається розділення зернової суміші за аеродинамічними властивостями. Одержані результати досліджень по аналогії можна використати для всіх зернових сепараторів, що мають вертикальний пневмосепарувальний канал.

Зернова суміш подається до пневмосепарувального каналу 3 (рис.1.23), 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.

Рисунок 1.20 – Класифікація конструкцій пневмосепарувальних каналів

Рисунок 1.21 – Класифікація способів підвищення ефективності процесу очищення зернових сумішей

Рисунок 1.22 – 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

Рисунок 1.23 – 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

Зерно потрапивши до барабану 1 розділяється за розмірами на решетах 2 та направляється до відповідних приймачів 8. Потрапивши до накопичувального бункера пневмосепарувального каналу зернової суміші рухається шаром до основного вертикального каналу. Подальше збільшення товщини шару веде до того, що легкі домішки з нижніх підшарів не мають змоги виділитися з зернової суміші. Легкі домішки потрапляють з зерном до решітного блоку, що спричиняє втрату продуктивності та якості очищення зернової суміші. Це вимагає зменшення висоти шару зернової суміші, а відповідно і завантаження пневмосепарувального каналу, і, як наслідок, викликає втрату продуктивності зернового сепаратора в цілому.

Для підвищення ефективності процесу очищення зернової суміші пропонується використати перспективний спосіб попередньої підготовки зернової суміші шляхом використання розшарувального повітропроникного пристрою (рис.1.22, б). Для цього в пневмосепарувальний канал серійного сепаратора КБС встановлено нахилену поверхню 6 та повітропроникну поверхню 7.

Накопичувальна камера має нахилені поверхні 6, 7, що розташовані з нахилом. Поверхня 6 призначена для направлення зернової суміші на поверхню

7. Поверхня 7 формує висоту шару зернової суміші, що надходить у вертикальний канал сепаратора. Для здійснення перерозподілу частинок в зернової суміші поверхню 7 виконано повітропроникною. При проходженні повітряного потоку через зернову суміш, яка рухається по поверхні 7, частинки легких домішок перерозподіляються у верхні підшари. Таким чином, у вертикальний канал надходить двошарова зернової суміші, в якій зверху знаходяться легкі домішки. При розділенні у сепарувальному каналі легкі домішки виносяться з зернової суміші та осаджуються у пиловловлювачі.

Для поліпшення перерозподілу легких домішок у зернової суміші повітропроникна поверхня виконана лускатою з розпушувачами 8. Це дозволяє збільшити кількість пор у зернової суміші, що сприяє перерозподілу частинок легких домішок в шарі та збільшує ефективність очищення.

Запропонована конструкція пневмосепарувального каналу за рахунок попередньої підготовки зернової суміші на повітропроникній поверхні з лусками збільшує продуктивність та якість процесу очищення. Розроблена конструкція пневмосепарувального каналу не змінює габаритні розміри сепаратора. Таким чином, обґрунтування параметрів процесу очищення зернової суміші від легких домішок розробленим каналом підвищує ефективність очищення і веде до створення конкурентоздатних зернових сепараторів, що є актуальним завданням для розвитку АПК України.

Аналіз математичних моделей процесу очищення зернових сумішей від легких домішок.

Одним з ефективних способів математичного моделювання руху повітряних потоків є використання рівнянь гідродинаміки: рівняння нерозривності руху і динамічне рівняння руху нестискаємої рідини (рівняння Нав'є - Стокса). Рівняння Нав'є - Стокса визначає систему сил, яка діє в газі (рідині) у напрямку осей координат [37]. Це рівняння ураховує дію чотирьох сил: тяжіння, тиску, внутрішнього тертя (в'язкості) і інерції. Сила тяжіння ( $\rho g$ ) 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. В [38, 40] математичні моделі руху середовищ побудовано на підставі основного рівняння Нав'є - Стокса.

Залежності для руху зернівки у вертикальному каналі:

(1.6)

Математична модель для тонкошарової пневмоінерційної сепарації, в основу якої покладена швидкісна подача вороху [39]: (1.7)

Основні значущі параметри процесу:  $k_n$  – аеродинамічні властивості;  $\alpha$  – кут введення; відношення  $\varepsilon$  швидкості повітряного потоку до швидкості введення;  $\beta$  – кут нахилу повітряного потоку. В результаті рішення системи рівнянь отримано траєкторії руху частинки зернової суміші 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.

### 1.3. Висновки за розділом, постановка мети та завдання дослідження

На підставі аналізу результатів досліджень підвищення ефективності процесу очищення обґрунтовано актуальність проблеми підвищення продуктивності зерноочисних машин внаслідок недостатньої ефективності роботи їх пневмосепарувальних пристроїв при розділенні відмінних за властивостями зернової суміші сільськогосподарських культур.

Аналіз стану проблеми підвищення продуктивності зерноочисних машин та огляд їх існуючих конструкцій пневмосепарувальних пристроїв виявили наступні недоліки: обмеження технологічних показників роботи (товщини шару зернової суміші при їх завантаженні, ширини пневмосепарувального каналу); більшість досліджень проведена для окремих параметрів сепараційних каналів, які підлягали оптимізації; експериментальна апробація приводиться частково або відсутня зовсім; отримані математичні вирази ускладнені або не мають

подальшого практичного використання; відсутність додаткової обробки зернової суміші. Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу очищення зернової суміші від легких домішок є створення пневмосепарувального каналу з розшарувальним пристроєм, який дозволяє не змінивши габарити серійних сепараторів типу КБС підвищити ефективність очищення зернової суміші.

В літературі не знайдено теоретичних досліджень процесу очищення зернової суміші від частинок легких домішок за допомогою рівнянь багатофазних середовищ, закономірностей зміни ефективності розшарування та очищення зернової суміші, швидкостей їх компонентів та пористості.

Метою роботи є підвищення ефективності очищення зернової суміші барабанним сепаратором шляхом обґрунтування параметрів пневмосепарувального каналу.

– Відповідно до поставленої мети для вирішення проблеми намічені завдання:

– провести аналіз існуючих технологій, способів і засобів післязбиральної обробки зернової суміші;

– побудувати математичну модель руху зернової суміші в пневмосепарувальному каналі;

– обґрунтувати залежність швидкості зернової суміші від конструктивно-технологічних параметрів пневмосепарувального каналу;

– визначити раціональні параметри пневмосепарувального каналу барабанного зернового сепаратора.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ПНЕВМОСЕПАРУВАЛЬНИХ КАНАЛАХ

2.1. Моделювання руху псевдозрідженої зернової суміші по нахиленій лускатій поверхні розробленого пневмосепарувального каналу

Рух сипких середовищ, до яких відноситься зернової суміші можна умовно поділити на два ідеалізованих режими. В першому (квазістатичному) режимі частинки рухаються і знаходяться у безперервному ковзаючому контакті один з одним і внутрішнє напруження в середовищі виникає внаслідок дії сухого



кулонівського тертя. Це призводить до незалежної від швидкості деформації пластичній поведінці середовища. У другому режимі частинки рухаються хаотично і внутрішня напруга в середовищі виникає внаслідок перенесення імпульсу (між частинками завжди є ті або інші проміжки, і їх взаємодія обумовлена непружними зіткненнями) аналогічно тому, як це відбувається в рідині або газі [31]. Такий механізм виникнення напруження призводить до їх істотної залежності від швидкості зрушення. Зокрема, він спостерігається в режимах псевдозрідження і русі досить тонких шарів сипких матеріалів з вільною поверхнею по робочих органах змішувачів і іншого устаткування [32].

Саме цей режим реалізується при даному русі псевдозрідженої повітряним потоком зернової суміші. Зручними і досить точними виявляються гідродинамічні моделі, ґрунтовані на аналогії руху в'язких рідин і сипких середовищ [33].

В цьому випадку для опису руху можна використати рівняння динаміки суцільних середовищ з напруженнями [23], які в декартовій системі координат мають вигляд:

$$(2.1)$$

сумісно з рівнянням нерозривності

$$(2.2)$$

яке для нестискаючого середовища запишеться у вигляді

$$(2.3)$$

Рівняння (2.1) справедливі при будь-якому довільному співвідношенні між тензором напружень і тензором швидкостей деформації, а визначення зв'язку між тензорами дозволяє замкнути систему диференціальних рівнянь.

Зв'язок між компонентами тензора напружень  $\sigma_{ij}$  і тензора швидкостей деформацій визначається рівнянням [36]:

$$(2.4)$$

де  $p$  – внутрішній (надлишковий) тиск;  $\mu$  - динамічна в'язкість середовища.

Як відомо, для ньютонівської рідини в'язкі напруження лінійно залежать від градієнта швидкості зсуву (градієнта швидкості). Однак, дослідження показали, що коефіцієнт в'язкості рухомої зернової суміші змінюється по товщині шару. Він збільшується за переміщенням від вільної поверхні шару, де швидкість руху максимальна, в глибину [37]. Таким чином, псевдозріджена потоком повітря зернової суміші відноситься до неньютонівських рідин, тобто рідин, при перебігу яких в'язкість залежить від градієнта швидкості [37].

Такі рідини класифікують за залежністю в'язких напружень від швидкості зернової суміші зсуву. Для так званих ділатантних рідин в'язкість зростає при збільшенні швидкості (рис. 2.1.а), а для псевдопластичних рідин при повільному русі в'язкість збільшена, а потім зменшується (рис. 2.1.а).

Рисунок 2.1 – Криві в'язкості (а) і течії (б): 1 – ньютонівське середовище; 2 – ділатантне середовище; 3 – псевдопластичне середовище; 4 і 5 – лінійні і нелінійні в'язкопластичні середовища; I і II – перша і друга ньютонівські області

При дуже низьких і дуже високих швидкостях зернової суміші зсуву псевдопластичні рідини поведуться подібно ньютонівським рідинам з в'язкістю, яка, як правило, відрізняється на кілька порядків величини, в першій і другій областях (рис. 2.1.а) відповідно.

Для опису течій таких середовищ можна використовувати емпірично встановлену ступеневу залежність напруження від швидкості зернової суміші зсуву. Існують різні модифікації цього ступеневого закону [37], які дозволяють розширити її рамки, наприклад, відома модель Кросса. Залежно від опису напружень в текучій фазі лінійним або нелінійним законом такі середовища розділяють на лінійні і нелінійні в'язкопластичні.

За останні роки були висунуті численні концепції для опису течій дисперсних середовищ [38-44]. Зокрема, дослідники використовують модель Бінгама, Кессона, Балклі–Гершеля [40].

Досить універсальною, узагальнюючою основні реологічні моделі нелінійних в'язкопластичних середовищ, є узагальнена модель, в якій зв'язок тензорів в'язких напружень і швидкостей деформацій визначається виразом [40]:

(2.5)

де  $\sigma_{ij}$ ,  $e_{ij}$  - тензор в'язких напружень і швидкостей деформацій, відповідно;  $\mu$  – здвигова в'язкість;  $\tau$  – границя текучості;  $k, m$  - реологічні параметри;  $J$  – інтенсивність швидкостей деформацій в декартовій системі координат:

(2.6)

При  $\tau_0 = 0$   $m=k$  отримуємо модель Ньютона, при  $\tau_0 = 0$  – ступеневу модель, при  $m=k=1$  - модель Бінгама, при  $k=1$  - Балклі–Гершеля, при  $m=k=1$  - Кессона [37].

Континуальні теорії припускають наявність частини тензора напружень, незалежної від швидкості зернової суміші зсуву, яка є певною функцією концентрації частинок.

У той час як тензор напружень, отриманий відповідно до мікроструктурної теорії, містить тільки частину, яка залежить від швидкості. Тому при високій концентрації частинок у потоці і відносно низьких швидкостях зсуву тензор в'язких напружень мало залежить від швидкості зернової суміші зсуву, а при більш низьких концентраціях і високих швидкостях зернової суміші зсуву переважає «в'язкісна» складова.

При низьких швидкостях зернової суміші зсуву потік сипучих матеріалів, до яких відноситься і псевдозріджена зернова суміш, поводить як звичайна ньютонівська рідина. При більш високих швидкостях напруження зернової суміші зсуву пропорційні квадрату швидкості зернової суміші зсуву.

Це пояснюється одночасним, пропорційним зростанням величини ударних імпульсів і їх числа в одиницю часу зі збільшенням швидкості зернової суміші зсуву. При цьому частинки крім поступальної швидкості руху в напрямку зернової суміші зсуву набувають розподілену в просторі компоненту швидкості хаотичних переміщень (швидкості флуктуації), модуль якої має той же порядок, що й модуль відносної швидкості поступального переміщення частинок [42].

Тобто має місце реологічний закон [42]:

(2.7)

де перший доданок враховує в'язку (неньютонівську) частину тензора напруження, а друге – відхилення від нього.

При постановці граничних умов при русі сипких середовищ потрібно забезпечити рівність нулю на вільній поверхні дотичних напружень

$$\sigma_{\tau} = 0 \quad (2.8)$$

і рівність нулю внутрішнього надлишкового тиску:

$$p = 0 \quad (2.9)$$

На твердій поверхні необхідно врахувати ефект "ковзання" [42]:

$$(2.10)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей сипкого середовища і поверхні ковзання (при  $\beta = 0$  виконується класична умова прилипання).

Таким чином, при побудові моделі руху зернової суміші будемо використовувати гідродинамічні аналогії з рухом нестискаючої неньютонівської рідини, яка описується рівняннями руху (2.1) та нерозривності (2.3), реологічним законом (2.7), умовами (2.8), (2.9) на вільній поверхні і (2.10) на твердій поверхні [42].

На (рис.2.2) показана схема руху псевдозрідженої зернової суміші по поверхні, яка продувається повітряним потоком та нахилена під кутом до горизонту.

Рисунок 2.2 – Схема руху псевдозрідженої зернової суміші по нахиленій поверхні.

Напишемо рівняння руху зернової суміші в прямокутній системі координат  $xoy$  (нехтуємо зміною параметрів суміші через її розшарування і не враховуємо ефекти, які пов'язані з нерівномірністю її руху, як несуттєві):

$$(2.11)$$

Тут координата  $x$  спрямована вздовж нахиленої площини,  $y$  – перпендикулярно до неї, а зовнішня сила є суперпозицією гравітаційних сил і сил, які викликані проходженням повітря через зерновий шар.

Таким чином, вектор зовнішніх об'ємних сил має вигляд:

$$F_x = g \sin \theta, \quad F_y = g \cos \theta - \Delta p \quad (2.12)$$

де  $\theta$  – кут нахилу поверхні, за якою рухається зерновий потік до горизонту;  $\Delta p$  – перепад тиску на шарі;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Зернова суміш відноситься до полідисперсних сипких матеріалів, для яких перехід в псевдозріджений стан відбувається поступово в інтервалі швидкостей. У таких шарах відбувається обмін кількістю руху між частинками різного розміру і маси. Тому критична швидкість псевдозрідження полідисперсного шару нижче, ніж для монодисперсного, складеного з найбільш великих і важких частинок, і вище швидкості псевдозрідження шару, складеного з найбільш дрібних і легких частинок [43].

Далі, очевидно, в усталеному русі псевдозрідженої зернової суміші першому наближенні можна вважати, що поперечна складова швидкості дорівнює нулю, а поздовжня зберігає постійне значення уздовж шару:

$$u_x = u_x(y), u_y = 0, p = p(y) \quad (2.13)$$

Представимо напруження через проекції швидкості за допомогою співвідношень узагальненого закону Ньютона [32]:

$$(2.14)$$

де - прийнятий для опису псевдозрідженої зернової суміші реологічний закон (2.7).

Підставивши в (2.11) вирази для тензора швидкостей деформацій (2.14) і враховуючи вирази для вектора зовнішніх сил (2.12) отримаємо рівняння для визначення профілю швидкості рухомого шару і величини внутрішнього тиску:

$$(2.15)$$

Рівняння руху (2.15) повинні бути доповнені граничними умовами. На вільній поверхні шару при  $y = H$ , де  $H$  – товщина шару, відсутні дотичні напруження і дорівнює нулю надлишковий тиск, тобто:

$$(2.16)$$

а на внутрішній поверхні шару при  $y = 0$  в площині контакту виконана узагальнююча умова ковзання (2.10).

З другого рівняння системи (2.15) та умови (2.16) виходить, що внутрішній тиск в шарі визначається виразом:

$$p = (g \cos \theta - \Delta p)(H - y). \quad (2.17)$$

З умови (2.10) виходить:

$$(2.18)$$

де похідні знаходимо з рівняння:

$$(2.19)$$

отриманого інтегруванням (2.15) з урахуванням умови (2.16).

Отримане (2.19) представляє собою нелінійне рівняння відносно похідної:

$$(2.20)$$

Рівняння (2.15) при реологічному законі (2.7) допускає аналітичне рішення:

$$(2.21)$$

Звідки інтегруванням отримаємо профіль швидкості:

$$(2.22)$$

де  $u_0$  – швидкість проковзування зернової суміші по нахиленій поверхні.

Як відомо, при малих кутах нахилу поверхні зернова суміш "прилипає" до неї. Зі збільшенням кута нахилу починається ковзання суміші і швидкість проковзування визначається за умови динамічної рівноваги зернової суміші на площині контакту [36]. Однак, так як нахилена поверхня має структуру "лускатого" решета (рис. 2.3), то зерновий шар буде затримуватися на виступах та гальмуватися.

Тоді можна з достатньою точністю використовувати в площині контакту традиційну умову "прилипання":

$$u_0 = 0. \quad (2.23)$$

Рисунок 2.3 – Структурна схема нахиленої лускатої поверхні Тоді (2.22) буде:

(2.24)

З (2.24) виходить, що швидкість руху зростає з наближенням до вільної поверхні шару, а максимальна швидкість дорівнює:

(2.25) У той час градієнт швидкості, який дорівнює нулю на поверхні шару, збільшується з рухом вглиб, максимальний градієнт на поверхні дорівнює:

(2.26)

При  $\mu_{\infty} \rightarrow 0$  (2.24) для профілю швидкості ньютонівської рідини маємо:

( 2.27)

(2.28) Зауважимо, що максимальна і середня швидкості руху ньютонівської рідини визначається наступними з (2.24) рівняннями:

(2.29)

(2.30)

Тоді для зернової суміші маємо:

(2.31)

(2.32)

З (2.30), (2.32) виходить, що при рівних швидкостях на поверхні шару відхилення закону руху псевдозрідженої зернової суміші від ньютонівської призводить до того, що в глибині швидкість руху зернового шару виявляється дещо нижча, ніж у звичайної ньютонівської рідини.

Ця обставина впливає на процес поділу шару на якісне зерно і легкі домішки під дією потоку повітря. Очевидно, це необхідно враховувати при моделюванні розшарування зернової суміші в процесі динаміки по нахиленій поверхні для правильного розрахунку траєкторій руху домішок.

Для моделювання приймали зернову суміш з насипною щільністю  $750 \text{ кг/м}^3$ .

У результаті досліджень проведено аналіз впливу кута нахилу лускатої поверхні і товщини зернового шару на питому продуктивність, тобто на кількість зернової суміші, що проходить в одиницю часу по ширині нахиленої поверхні (рис.2.4, 2.5). Встановлено, що основний вплив на підвищення продуктивності

має товщина зернового шару. Її збільшення призводить до інтенсивного підвищення продуктивності. В той час як збільшення кута нахилу лускатої поверхні призводить до незначного підвищення продуктивності.

Так збільшення товщини шару зернової суміші з 2 см до 5 см призводить практично до десятиразового збільшення продуктивності, в той час як збільшення кута нахилу лускатої поверхні з  $35^{\circ}$  до  $45^{\circ}$  дозволяє збільшити продуктивність всього на 10%. Тому слід прагнути, насамперед, до збільшення товщини шару зернової суміші, що рухається по нахиленій поверхні.

Однак, збільшення товщини шару зернової суміші, як відомо, призводить до погіршення ступеня очищення в пневмосепараційному каналі. Це відбувається через те, що частинки легких домішок не встигають пройти через товстий шар зернової суміші і підхоплюються ним.

Тому особливої важливості набуває попереднє розшарування зернового потоку на нахиленій поверхні, в результаті чого легкі домішки переміщуються у верхню частину шару зернової суміші.

Рисунок 2.4 – Залежності питомої продуктивності від кута нахилу лускатої поверхні

Рисунок 2.5 – Залежність питомої продуктивності від товщини зернового шару

Для аналізу процесу переміщення легких домішок по товщині рухомого псевдозрідженого зернового шару важливе значення має характер зміни його швидкості руху за товщиною і величина градієнта швидкості. У нижній зоні шару зернової суміші швидкість його руху швидко наростає, але з наближенням до верхньої зони зростання швидкості сповільнюється – практично уповільнення починає позначатися приблизно з половини товщини шару (рис.2.6). Тому найбільш важливими є процеси розшарування зернової суміші саме в нижній зоні шару, де горизонтальні швидкості потоку ще відносно невеликі.



Рисунок 2.6 – Залежності профілю швидкості зернового шару від його товщини

Однак, як видно, вертикальний градієнт швидкості на нахиленій поверхні дорівнює нулю (рис.2.7). Це означає, що поблизу цієї поверхні процес розшарування зернової суміші на якісне зерно і легкі домішки утруднений і для його інтенсифікації, очевидно, необхідно забезпечити додаткове розпушення шару зернової суміші. При цьому, оскільки градієнт швидкості наростає вельми швидко (рис.2.7), то достатньо забезпечити розпушення зернового шару тільки в безпосередній близькості від нахиленої поверхні. Це розпушення забезпечується "лускатою" структурою застосованої нахиленої поверхні (рис.2.3).

Рисунок 2.7 – Залежності градієнта швидкості зернового шару від його товщини

Зауважимо, що «луската» структура нахиленої поверхні практично виключає проковзування зернового потоку, а відносно високі швидкості зернової суміші уву дозволяють для розрахунку профілю швидкості з достатньою точністю використовувати рівняння (2.28).

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

Зернова суміш відноситься до полідисперсних сипучих матеріалів, для яких перехід в псевдозріджений стан відбувається поступово в деякому інтервалі швидкостей [41]. 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 результаті досліджень встановлено, що раціонально моделювати динаміку псевдозріджених зернової суміші за гідродинамічними аналогіями з рухом нестискаємої неньютонівської рідини, з урахуванням реологічного закону, умов на вільній та на нахиленій поверхнях [36, 41].

У момент початку псевдозрідження вага зернової суміші урівноважується силою гідравлічного опору шару [44]:

$$\Delta p = (\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon_0)h_0g, \quad (2.33)$$

– де  $h_0$  - висота нерухомого шару;  $\rho$ ,  $\rho_0$  - щільність твердих частинок і густина псевдозрідженого повітря;  $\Delta p$  - перепад тиску на шарі;  $\varepsilon_0$  – пористість нерухомого шару:

$$(2.34)$$

де  $V_0$ ,  $V$  – об'єм нерухомого шару і частинок зернової суміші, відповідно.

Зауважимо, що зі швидкості початку псевдозрідження і вище перепад тиску на шарі зберігає практично постійні значення (рис.2.8).

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

Рисунок 2.8 – Залежність тиску від швидкості повітряного потоку

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 полуміричних і теоретичних залежностей, зокрема, відома формула Годеса [41,44]:

(2.35)

де  $Ar$  - критерій Архімеда;  $Re$  - критерій Рейнольдса, що визначає початок псевдозрідження;  $u$  – швидкість початку псевдозрідження;  $d$  – еквівалентний діаметр частинок;  $\nu_2$  – 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:

(2.36)

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

Із (2.35) отримаємо:

(2.37)

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

(2.38)

Із (2.37) виходить:

(2.39)

Задавши швидкість повітряного потоку, що перевищує поріг початку псевдозрідження згідно з (2.37), але меншу швидкості вільного витання одиночних частинок згідно з (2.39), можна розрахувати реальну товщину рухомого шару, яка збільшується через те, що змінюється пористість шару. Встановлено, що:

(2.40)

тоді (2.41)

Наведені вище формули Тодеса (2.37), (2.39) відносяться до однорідної суміші, причому для тієї що знаходиться на горизонтальній поверхні. В той час зернова суміш, 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 (2.37), (2.39) швидкості повітряного потоку, що відповідають нижній і верхній границі [39] псевдозрідженого стану, будуть різними залежно від того, до частинок з якими параметрами, що знаходяться в рухомому шарі, їх застосувати (рис.2.9).

$W'_{\text{ПС}}$  – псевдозрідження дрібних частинок;  $W''_{\text{ПС}}$  – повне псевдозрідження

Рисунок 2.9 – Діаграма псевдозрідження полідисперсних матеріалів

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

$$(2.42)$$

для турбулентного режиму [39]

$$(2.43)$$

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 [40-44]:

$$(2.44)$$

де  $d_i$ ,  $\rho_i$  – еквівалентний діаметр (2.36) 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 розрахунку швидкості псевдозрідження на випадок руху потоку полідисперсної зернової суміші по нахиленій поверхні (рис.2.10, 2.11):

$$(2.45)$$

де усереднений еквівалентний діаметр і щільність визначають за (2.44).

Як виходить з (2.45), збільшення кута нахилу поверхні знижує як швидкість початку псевдозрідження (рис.2.10), так і швидкість витання частинок зерна (рис.2.11).

Рисунок 2.10 – Залежності швидкості початку псевдозрідження зернової суміші від еквівалентного діаметра зерна, при різних кутах нахилу лускатої поверхні

Рисунок 2.11 – Залежності швидкості витання частинок зернової суміші від діаметру зерна, при різних кутах нахилу лускатої поверхні

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

На легкі частинки домішок, які знаходяться в псевдозрідженому середовищі діють сили Стокса, Архімеда, приєднаних мас [45] пропорційні поверхні частинки, але незначні для дрібних частинок. Як відомо, ці сили виникають тільки при прискореному русі частинок, а так як час швидкісної релаксації в псевдозрідженому середовищі невеликий, то ці сили не враховуються.

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

$$(2.46)$$

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

$$(2.47)$$

де  $\rho$  – 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, то опір середовища обумовлено практично тільки силами тертя.

Тоді, сила Стокса визначається за [39]:

$$F = 3\pi d_p \mu_0 w, \quad (2.48)$$

де  $\mu_0$  в'язкість псевдозрідженого шару при малих швидкостях зсуву (до прийнятої реологічної моделі при малих швидкостях зернової суміші поводитья як ньютонівська рідина);  $w$  – швидкість обтікання частинки зернової суміші 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 [40]:

$$(2.49)$$

З (2.49) виходить, що швидкість «спливання» пропорційна квадрату еквівалентного діаметра частинки, різниці її щільності і усередненої щільності всіх частинок шару (рис.2.12).

Зауважимо, що підвищення швидкості повітряного потоку (рис.2.13), 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:

$$(2.50)$$

де  $\varepsilon_0$  - пористість шару при мінімальній швидкості псевдозрідження;

$\varepsilon$  – 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 [42], для витягнутих частинок  $k > 2,5$  [34].

Пористість  $\varepsilon$  псевдозрідженого шару для заданої швидкості псевдозрідження в межах (2.45) визначаємо за (2.40).

Рисунок 2.12 – Залежності швидкості «спливання» частинок домішок від їх щільності та розмірів, при швидкості повітряного потоку 3 м/с

Рисунок 2.13 – Залежності збільшення швидкості «спливання» домішок від їх розмірів та швидкості повітряного потоку

При цьому критерій Архімеда визначаємо з урахуванням нахилу лускатої поверхні:

$$(2.51)$$

Для досліджень приймаємо лускату поверхню і напрямок подачі повітряного потоку (рис.2.14). При русі зернової суміші по наведеній нахилений поверхні шар відчуває вібрацію, що призводить до зменшення його ефективної в'язкості [46].

Рисунок 2.14 – 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 [42]. 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:

$$(2.52)$$

де  $k_{tr}$  - коефіцієнт тертя зернової суміші по нахилений поверхні;  $a$  – висота лусочок;  $l$  – період розташування лусочок;  $\theta$  – кут нахилу поверхні.

При русі зернової суміші по лускатій нахилений поверхні на шар діє вібрація, яка призводить до зміни його ефективної в'язкості [46]. В'язкість зменшується при збільшенні амплітуди коливань, яка визначається висотою

«лусок» та частотою їх розташування, швидкістю руху шару зернової суміші. У першому наближенні можна вважати, що ефективна в'язкість шару зернової суміші при малих швидкостях зернової суміші зсуву [42] визначається:

$$(2.53)$$

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

Враховуючи [46] 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  $a'/l \approx 0,08$  досить близько до оптимального [42].

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

$$(2.54)$$

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 зернової суміші з ньютонівською рідиною.

Однак попередній аналіз виявив, що характерна швидкість шару зерна дещо нижче ніж у звичайної ньютонівської рідини. Таким чином, зміна в'язкості зернової суміші, 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 зернової суміші зменшиться. зернової суміші 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.

Так як довжина швидкісної релаксації частинок домішок мала, то можна вважати, що вони рухаються з середньою швидкістю, яка визначається з умови балансу діючих на частинку сил. Тобто «легкі» частинки домішок «спливають», рухаючись по вертикалі, і при цьому зміщуються за рахунок захоплення їх рухомим псевдозрідженим зерновим шаром.

Рівняння траєкторій руху частинок домішок у зерновому шарі:

(2.59)

Підставивши в (2.59) отримані раніше вирази для швидкості зернового потоку (2.24) запишемо (2.59) у вигляді:

(2.60)

Зауважимо, що так як кількість частинок домішок відносно незначна (до 5% [48]), то в першому наближенні можна не враховувати змінність щільності змінюється по товщині шару зернової суміші при її розшаруванні. Це в кінцевому випадку, призводить до деякого уповільнення швидкості «спливання» частинок домішок.

Після спрощення:

(2.61)З (2.61) маємо, що частка домішок, які знаходилися в початковий момент часу в нижній зоні шару зернової суміші, в кінці руху по нахиленій поверхні підніметься на  $h$ .

Дану висоту можна знайти з рівняння:

(2.62)

Рівняння (2.62) нелінійне і визначення величини  $h$  може бути проведено чисельними методами, зокрема – методом ітерацій. Для отримання наближеного аналітичного виразу обмежимося усередненою швидкістю руху зернового шару.

На рис. 2.15 представлені траєкторії частинок домішок у шарі зернової суміші, який рухається по нахиленій лускатій поверхні.

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

Рисунок 2.15 – Траєкторії руху частинок домішок в шарі суміші на нахиленій повітропроникній лускатій поверхні ( $u=3 \text{ м/с}$ ,  $d_p=0,002 \text{ м}$ )

З (рис.2.15) видно, що рух частинок домішок всередині шару залежить від їх щільності. При щільності  $100 - 200 \text{ кг/м}^3$  координати частинок домішок підвищуються на  $10 - 15\%$  в порівнянні з частинками щільності  $600 \text{ кг/м}^3$  з рухом по лускатій поверхні.

Ступінь розшарування псевдозрідженої зернової суміші 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:

$$(2.62)$$

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.2.16 – 2.19). Зауважимо, що коефіцієнт розшарування незначно залежить від кута нахилу лускатої поверхні. 1 -  $a'/l = 0,12$ ; 2 -  $a'/l = 0,08$ ; 3 -  $a'/l = 0,05$ ; 4 - без лусок

Рисунок 2.16 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від швидкості повітряного потоку ( $H=0,05\text{м}$ )

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

Рисунок 2.17 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від коефіцієнту лускатості поверхні ( $H=0,05\text{м}$ )

Рисунок 2.18 – Залежності коефіцієнта розшарування зернової суміші від розмірів частинок домішок, при швидкості повітряного потоку  $3\text{м/с}$

Рисунок 2.19 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від розмірів і щільності частинок домішок, при швидкості повітряного потоку  $1 \text{ м/с}$

В результаті моделювання також отримані залежності коефіцієнту розшарування від властивостей компонентів зернової суміші : розмірів та щільності частинок, товщини їх шару (рис.2.18, 2.19). Встановлено, що підвищення щільності частинок домішок зернової суміші 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 зернової суміші .

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

Дослідження проводилися для зернового потоку, насипна щільність якого  $750 \text{ кг/м}^3$ , 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 зернової суміші  $H = 0,02 \text{ м}$  (0,05м); швидкість повітряного потоку  $1 - 3 \text{ м/с}$ .

Аналізом рис.2.18, 2.19 встановлено, що процес розшарування зернової суміші присутній в заданих умовах. Коефіцієнт розшарування характеризує процес і залежить від властивостей частинок зернової суміші , 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.

### 2.3 Моделювання процесу очищення зернової суміші в вертикальному пневмосепарувальному каналі

У пневмосепарувальному каналі на частинки зернової суміші діють сила тяжіння і протилежно спрямована сила від взаємодії частинки з повітряним потоком. Залежно від співвідношення цих сил частинка може рухатися як вниз, так і вгору. Таким чином, відбувається розподіл частинок зернової суміші: легші частинки домішок виносяться вгору, більш важке зерно основної культури – падає вниз [40]. Повітряний потік в каналі, як правило нерівномірний, зернова суміш надходить до каналу з деякою швидкістю та під кутом. Домішки, перш ніж відокремитися від основного зерна, повинні перейти у верхні підшари зернової суміші.

При ламінарному режимі обтікання повітряним потоком дисперсних частинок сила, що діє на частинку зернової суміші, визначається формулою Стокса і залежить від в'язкості середовища, їх діаметра та швидкості. Проте такий режим не характерний для ПСК, де реалізується турбулентний режим обтікання.

При збільшенні швидкості руху частинок зернової суміші в опорі середовища починають переважати сили тиску. При цьому в'язкість середовища відіграє все меншу роль, а головною стає її щільність і швидкість [46]:

$$(2.64)$$

де  $\zeta$  – деякий емпіричний коефіцієнт (при достатньо високих швидкостях  $\zeta \approx 0,4 \div 0,5$  [47]),  $\rho_e$  – густина повітря;  $U'$  – швидкість, що відповідає швидкості повітряного потоку у сепараторі;  $d$  – еквівалентний діаметр частинки зернової суміші.

Взаємодія частинок зернового шару один з одним в каналі буде приводити до вирівнювання швидкостей руху частинок. Тому можна вважати, що в основному частинки зернового шару мають близькі швидкості руху (рис.2.20).

Рисунок 2.20 – Схема вертикального пневмосепарувального каналу  
Рівняння руху частинки, що надходить до ПСК, під дією сил тяжіння і опору, має вигляд:

$$(2.65)$$

де  $m$  – вага частинки зернової суміші ;  $F$  – сила, що діє на частинку зернової суміші з боку повітряного потоку;  $F \cos \gamma$  – вертикальна складова сили, що діє на частку зернової суміші,  $F \sin \gamma$  – горизонтальна складова сили,  $\gamma$  – кут між напрямком сили  $F$  та вертикальною віссю системи координат.

Система рівнянь (2.65) повинна бути доповнена початковими умовами. А саме в початковий момент  $x = U_0 \cos \theta$ ,  $y = U_0 \sin \theta$ , де  $U_0$  - швидкість, з якою частинка зернової суміші надходить до каналу,  $\theta$  – кут входу частинок до каналу. Відносна швидкість частинки зернової суміші :

$$(2.66)$$

де  $U$  – швидкість повітряного потоку у основному каналі сепаратора.

Аналіз виразу при практичних режимах сепарування та швидкостей переміщення частинок показує, що  $k_p \approx 1,02 \dots 1,12$  [47]. Для частинок домішок коефіцієнт  $k_p$  змінюється в більш широких межах, проте в середньому  $k_p \approx 1,06$ . Для практичного використання приймаємо  $U_e = k_p U$ ,  $k_p \approx 1,06$ .

Тоді система (2.65) має вигляд:

$$(2.67)$$

$$(2.68)$$

де  $y_0$  - відстань частинки зернової суміші від нахиленої поверхні в початковий момент часу.

Типові траєкторії частинок зернової суміші показані на (рис.2.21).

$$1 - \rho_p = 150 \text{ кг/м}^3; 2 - \rho_p = 200 \text{ кг/м}^3; 3 - \rho_p = 600 \text{ кг/м}^3; 4 - \rho_p = 700 \text{ кг/м}^3;$$

Рисунок 2.21 – Траєкторія руху частинок зернової суміші у вертикальному каналі від їх щільності ( $U=7$  м/с;  $d=0,0015$ м;  $\theta=40^\circ$ )

Спочатку частинки зернової суміші під дією сили тяжіння рухаються вниз.

Домішки, швидкість витання яких менше швидкості повітряного потоку змінюють напрямок руху і починають рухатися вгору.

Для таких частинок  $F/m > g$ . Решта частинок зернової суміші, більш важкі, рухаються вниз. Для них  $F/m < g$ .

Взаємодія частинок шару зернової суміші один з одним в каналі призводить до вирівнювання швидкостей їх руху. Тому приймаємо, що у більшості, частинки шару зернової суміші мають аналогічні за значенням швидкості руху.

Тоді рівняння верхньої межі шару зернової суміші, яке виходить з (2.68) при урахуванням усереднення швидкості, має вигляд (2.69):

Час впливу повітряного потоку на частинку зернової суміші визначається шириною каналу. Очевидно, ширина каналу повинна бути достатньою, щоб частинка домішки «встигла» змінити напрямок руху. Але крім ширини каналу на ефективність каналу впливає також кут входу частинки зернової суміші та її початкова швидкість. Тут важливо, щоб частинка домішок не досягла стінки каналу на «низькохідній» ділянці траєкторії руху. У цьому випадку вона відіб'ється донизу і умови для зміни її напрямку руху вгору погіршаться [48].

Однак потрібно врахувати, що в канал надходять не окремі частки, а потік зернової суміші. У такому потоці частинки домішок при своєму русі вгору будуть стикатися з частинками основного зерна, що рухаються донизу. Це погіршить процес сепарації зернової суміші. Тільки після виходу частинки домішок з зернової суміші вона починає рухатися прискорено вгору під дією струменя повітряного потоку.

Запишемо рівняння для траєкторії руху частинок домішок з урахуванням її взаємодії з іншими частинками зернового потоку.

Взаємодія частинок домішок з частинками зернової суміші в каналі буде призводити до вирівнювання горизонтальних швидкостей руху частинок.

Тому при розгляді траєкторії частинок домішок в межах шару зернової суміші можна вважати, що траєкторія визначається виразом з (2.69):

$$(2.70)$$

де  $y_0$  - відстань частинки домішок від лускатої поверхні в момент входу до каналу;  $W$  – швидкість руху частинок домішок вгору (через малий час релаксації ця швидкість близька до постійної).

Швидкість визначається з рівноваги діючих на частинку домішок сил. Основними з них є сила опору руху, сила від впливу на частинку домішки повітряного потоку, які визначаються за (2.66), і гравітаційна сила.

Таким чином, швидкість руху частинок домішки вгору дорівнює:

$$(2.71)$$

де  $d_p, \rho_p$  - діаметр і щільність частинки домішок, відповідно;  $\rho_o$  - насипна щільність зерна;  $\varepsilon$  - пористість шару в момент входу до каналу.

Координати виходу частинки домішок із зернової суміші будуть визначатися за умови перетину траєкторії руху частинки домішки (2.70) з верхньою межею зернового потоку (2.69):

$$(2.72)$$

Рух домішок по траєкторії:

$$(2.73)$$

Очевидно, що для того, щоб частинка домішки була відібрана, вона повинна вийти з зернового шару до того, як вона досягне краю пневмосепарувального каналу.

З (2.72) отримаємо, що частинки домішок, для яких відстань від нахиленої поверхні в момент входу в канал більше, ніж будуть відібрані:

$$(2.74)$$

де  $L$  – ширина пневмосепарувального каналу.

Інші частинки домішок будуть захоплені падаючими донизу основним очищеним зерном.

Ступінь очищення зернової суміші в каналі характеризували коефіцієнтом ефективності  $k_2$ . Коефіцієнт ефективності дорівнює відношенню товщини верхньої частини шару, з якої частинки домішки відповідної фракції будуть відібрані, до сумарної товщини зернового шару. Цей коефіцієнт зростає зі збільшенням ширини каналу і істотно залежить, як від розмірів і щільності частинок домішок, так і від швидкості продування шару зернової суміші повітряним потоком.

Після проходження зернової суміші по нахиленій поверхні відбувається розшарування зернового потоку [38, 40]: частинки домішок перерозподіляються у верхню частину зернового шару. При цьому нижня частина шару, товщиною  $Hk_2$ , де  $k_2$  – коефіцієнт розшарування зернової суміші на нахиленій лускатій поверхні, буде вільна від частинок домішок.

Коефіцієнт ефективності очищення зернової суміші розробленим сепарувальним каналом розраховується за:

$$(2.75)$$

Результати моделювання динаміки компонентів зернової суміші у вертикальному каналі у вигляді траєкторій частинок домішок представлено на (рис.2.22, 2.23). Аналізом траєкторій встановлено, що при розташуванні частинок домішок в середині та вище за товщиною шару при мінімальній швидкості повітряного потоку їх відділення не викликає сумнівів.

а –  $d_p=0,001\text{м}$ ;  $\rho_p=600\text{ кг/м}^3$ ; б –  $d_p=0,002\text{м}$ ;  $\rho_p=600\text{ кг/м}^3$ ;  
 в –  $d_p=0,002\text{м}$ ;  $\rho_p=200\text{кг/ м}^3$ ;  
 - - - траєкторії домішок; ——— верхня границя зернового шару;  
 ——— траєкторії домішок без урахування впливу зернового шару

Рисунок 2.22 – Траєкторії частинок домішок у вертикальному каналі

а)

а –  $d_p=0,003\text{м}$ ;  $\rho_p=750\text{ кг/м}^3$ ;  $u=6\text{ м/с}$ ; б –  $d_p=0,0038\text{м}$ ;  $\rho_p=350\text{ кг/м}^3$ ;  $u=5\text{ м/с}$ ;  
 в –  $d_p=0,005\text{м}$ ;  $\rho_p=700\text{кг/ м}^3$ ;  $u=8\text{ м/с}$ ;



—— верхня границя зернового шару; — траєкторії домішок ( $H=0,05\text{м}$ )

Рисунок 2.23 – Траєкторії частинок домішок у вертикальному каналі

Таким чином, розшарування на повітропроникній лускатій поверхні забезпечує перерозподіл домішок у верхній підшар зернової суміші та дозволяє істотно збільшити ефективність її очищення.

За результатами досліджень (рис.2.24, 2.25), які характеризують залежність коефіцієнта розшарування зернової суміші на нахиленій повітропроникній поверхні, коефіцієнту ефективності сепарувального каналу від властивостей частинок домішок. Дослідження проводилися для зернової суміші пшениці: насипна щільність  $750 \text{ кг/м}^3$ , розрахункове значення в'язкості потоку  $\mu_0 = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , еквівалентний діаметр домішок  $d_p=0,002 \text{ м}$ , щільність  $\rho_p=400 \text{ кг/м}^3$ .

Конструктивно-технологічні параметри розробленого ПСК: кут нахилу лускатої поверхні  $\theta = 40^\circ$ , її довжина  $l = 0,5 \text{ м}$ , швидкість повітряного потоку на лускатій поверхні  $v = 3 \text{ м/с}$ , швидкість повітряного потоку у вертикальному каналі  $V = 6 \text{ м/с}$ , ширина каналу  $L = 0,05 \text{ м}$ .

$$1 - d_p=0,002 \text{ м}; 2 - d_p=0,001 \text{ м}$$

Рисунок 2.24 – Залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші від діаметру частинок домішок а) та їх щільності б)

а)

б)

Рисунок 2.25 – Залежності коефіцієнту ефективності вертикального каналу ( $d_p=0,002 \text{ м}$ ): а – від щільності і діаметру частинок домішок; б – від коефіцієнту розшарування зернової суміші.

Максимальна ефективність вертикального каналу, коли зернова суміш нерозшарувана, складає  $k_2=0,62\dots0,66$  і спостерігається при діаметрах частинок домішок  $0,001\dots0,0016 \text{ м}$  і їх щільності  $200\dots330 \text{ кг/м}^3$ .

Встановлено, що для каналу шириною  $0,06 \text{ м}$  при швидкості повітряного потоку повітря  $6 \text{ м/с}$  коефіцієнт ефективності вертикального каналу

розробленого ПСК для зазначених домішок склав 0,68...1. Збільшення розшарування, у межах встановленого діапазону, підвищує ефективність очищення розробленого пневмосепараційного каналу на 18,3...47%. Також встановлено, що збільшення щільності та розмірів частинок домішок, зменшує на 18...44% та підвищує на 4...16% коефіцієнт ефективності каналу.

Враховуючи вхідні параметри процесу максимальна ефективність отримана при діапазонах коефіцієнту розшарування  $k_1=0,14...0,37$  та коефіцієнту ефективності каналу  $k_2=0,68...1$ .

Таким чином, використання розшарувального пристрою у пневмосепараційному каналі дозволяє інтенсифікувати процес очищення зернової суміші та підвищити ефективність роботи сепараторів.

#### 2.4. Висновки за розділом

Теоретичні дослідження динамічних процесів зернової суміші проведено ґрунтуючись на аналогії руху в'язких рідин і сипких псевдозріджених середовищ.

Аналізом результатів математичного моделювання руху зернової суміші по нахиленій лускатій поверхні каналу встановлено, що основний вплив на підвищення продуктивності мають фактори: товщина зернового шару і кут нахилу лускатої повітропроникної поверхні.

За визначеними закономірностями зміни продуктивності сепараційного каналу встановлена інтенсивність її зростання (до 10 разів) при збільшенні товщини шару зернової суміші з 2 см до 5 см. Також встановлено вплив зміни кута нахилу лускатої поверхні (з  $35^0$  до  $45^0$ ) на підвищення продуктивності каналу (до 10%).

Проведеним аналізом результатів математичного моделювання розшарування двофазного потоку зернової суміші «зерно - легкі домішки» на повітропроникній лускатій поверхні сепараційного каналу встановлено:

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

- ступінь розшарування псевдозрідженої зернової суміші 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 зернової суміші на 20...25%. Зменшення щільності частинок домішок, в діапазоні що досліджується, також підвищує коефіцієнт розшарування зернової суміші на 25...35%. Зменшення висоти шару з 0,05 м до 0,02 м також позитивно впливає та збільшує коефіцієнт розшарування зернової суміші на 30...35%.

Проведеним аналізом математичного моделювання процесу очищення зернової суміші у основному вертикальному каналі встановлено:

- можливість збільшення ефективності очищення зернової суміші за рахунок попереднього розшарування зернової суміші на лускатій поверхні розробленого каналу. Для каналу шириною 0,06 м при швидкості повітряного потоку повітря 6 м/с ефективність ПСК для зазначених фракцій домішок не перевищувала 0,66, а для найбільш великих і важких домішок дорівнювала 0,4. Попереднє розшарування зернової суміші дозволило підвищити ефективність очищення зернової суміші з  $k_2=0,4$  до  $k_2=0,57$  – для великих і важких домішок; і з  $k_2=0,66$  до  $k_2=0,80$  – для легких домішок зернової суміші ;

- встановлено, що максимальне розшарування зернової суміші ( $k_1=0,31 \dots 0,37$ ) спостерігається зі збільшенням діаметру частинок домішок у діапазоні  $d=0,0017 \dots 0,002$  м і зменшенні їх щільності у межах  $\rho_0=200 \dots 500 \text{ кг/м}^3$

- максимальна ефективність вертикального каналу ( $k_2=0,62\dots0,98$ ) спостерігається при поширених діаметрах частинок домішок  $0,001\dots0,0016$  м і їх щільності  $200\dots330$  кг/м<sup>3</sup> при діапазонах коефіцієнту розшарування  $k_1=0,26\dots0,37$ .

В результаті проведених теоретичних досліджень встановлені закономірності керування якістю та продуктивністю, доведена можливість інтенсифікації процесу очищення зернової суміші від легких домішок розробленим каналом з розшарувальним пристроєм.

### РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Методика проведення досліджень

В результаті проведених теоретичних досліджень створені математичні моделі нелінійної динаміки частинок зернової суміші по повітропроникній поверхні, та у вертикальному каналі, отримані залежності ефективності процесу очищення від конструктивно-технологічних параметрів розробленого пневмосепараційного каналу.

Визначення характеристик зернової суміші. Ефективність перерозподілу легких домішок в шарі зернової суміші залежить від її властивостей. Максимальний ефект досягається при псевдозрідженні (закипанні) суміші, яке залежить від параметрів зернової суміші та швидкості повітряного потоку.

Головними критеріями ефективності роботи пневмосепараційного каналу є коефіцієнт розшарування, та коефіцієнт очищення вертикального каналу.

1. Визначення раціональних конструктивних параметрів розробленого ПСК зернових сепараторів.

2. Дослідження впливу конструктивних параметрів ПСК, швидкостей повітряного потоку (витрат повітря), засміченості, фракційного складу і т.п. на ефективність процесу очищення зернової суміші (коефіцієнт розшарування, коефіцієнт очищення вертикального каналу).

3. Встановлення траєкторій і швидкостей повітряного потоку, компонентів

Параметри зернової суміші, які впливають на перерозподіл легких домішок наступні:

- висота та пористість шару;
- щільність, розміри та вологість зерна.

Щільність зернової суміші що досліджувались та їх вологість під час післязбиральної обробки є загальновідомими даними, які визначаються відповідно до [41].

Одними зі значущих параметрів процесу очищення зернової суміші на пневмосепараційному каналі є висота шару зернової суміші та швидкість повітряного потоку на повітропроникній лускатій поверхні.

Висота шару зернової суміші, яка рухається по повітропроникній поверхні, визначає завантаження всього каналу. Швидкість повітряного потоку на поверхні поряд з вистою шару зернової суміші, регламентує його псевдозрідження. Тому ці параметри потрібно досліджувати разом.

Максимум діапазону варіювання швидкості повітряного потоку фіксується за допомогою швидкості витання зерен основної культури.

Рисунок 3.1. Схема установки для визначення параметрів повітропроникної поверхні: 1 – вентилятор; 2 – канал пневмосепарувальний; 3 – бункер завантажувальний; 4 – заслінка регулювальна; 5 – поверхня повітропроникна; 6 – пристрій розшарувальний; 7 – блок приймачів; 8 – регулятор повітряного потоку; 9 – фільтр.

Встановлення оптимальних співвідношень конструктивних параметрів каналу є складним завданням внаслідок складних траєкторій руху компонентів зернової суміші і складності процесу вилучення домішок в цілому. Для спрощення завдання приймаємо рішення про незалежне варіювання значень конструктивних параметрів каналі при проведенні дослідів. Дані про встановлені значення конструктивних параметрів наведені в табл. 3.1.

### Таблиця 3.1 Встановлені значення конструктивних параметрів каналу

Результатом досліджень стали значення швидкості повітряного потоку, при якій зернова суміш псевдозріджувалася (швидкість псевдозріджування), та той при якій починався винос зерен основної культури (швидкість витання).

Для визначення значущого показника пористості шару зернової суміші використана наступна методика. Підготовлену зернової суміші засипали у бункер лабораторної установки та за допомогою заслінки забезпечували необхідну висоту шару (завантаження). Відповідно до умов досліду встановлювали задану швидкість повітряного потоку на повітропроникній лускатій поверхні. Використання даної методики дозволило експериментально ідентифікувати значущий параметр пористість, який є значущим в математичному моделюванні динаміки зернової суміші в робочих зонах сепараційного каналу.

Визначення швидкості повітряного потоку над поверхнею. При дослідженнях поверхонь враховували: відсутність забивання компонентами зернової суміші ; максимальна повітропроникність; наявність розпушувачів.

Таким чином, для досліджено обрано лускату поверхню, яка має задовільну повітропроникність, відсутність забивання частинками зернової суміші та на якій лусочки виконують роль розпушувачів.

Визначення кута встановлення повітропроникної поверхні. Одним з параметрів, що впливають на ефективність розділення зернової суміші у вертикальному повітряному потоку, є початкова швидкість вводу зернової суміші.

Аналізом існуючих конструкцій живильних пристроїв повітряних та повітряно-ситових сепараторів, визначено що кут нахилу нахиленої поверхні обрано  $45^{\circ}$  (сепаратори ПОП-5, ПДП-10 та інші) та  $37^{\circ}$  (зернової суміші -5, за-40 та інші). Збільшення кута нахилу лускатої поверхні веде до збільшення швидкості руху зернової суміші по поверхні. Приймаємо діапазон варіювання кута нахилу  $40...45^{\circ}$ .

Коефіцієнт тертя зернової суміші, що досліджуються, по сталі для різних культур приймаємо  $f=0,4\dots0,6$ .

Максимальна ефективність очищення зернової суміші забезпечується при оптимальному співвідношенні конструктивних параметрів розробленого сепараційного каналу, визначити значення яких можливо за рахунок використання методики математичного планування експерименту.

Методика побудови математичної моделі (рівняння регресії), для опису процесу очищення зернової суміші, наступна [40-44]: попереднє вивчення об'єкта та на підставі апріорної інформації визначення значущих факторів; вибір критеріїв оптимізації; побудова статистичної моделі та оцінка її адекватності; визначення раціональних параметрів процесу.

Узагальненою характеристикою об'єкта досліджень, який пов'язує фактори в моделі, є критерії оптимізації: коефіцієнт розшарування; коефіцієнт очищення вертикального пневмосепараційного каналу.

Встановлено, що розшарування зернової суміші залежить від наступних факторів: кут нахилу поверхні, узагальнений параметр лусок, швидкість повітряного потоку, довжина та ширина поверхні, завантаження сепаратора, вирівненість повітряного потоку, вологість і склад зернової суміші і т.п.

На підставі апріорної інформації встановлено, що на ефективність процесу очищення зернової суміші впливають наступні фактори: швидкість повітряного потоку, довжина та ширина каналу, коефіцієнт розшарування, завантаження каналу, вирівненість повітряного потоку, вологість і склад зернової суміші і т.п.

Попередніми дослідженнями виключені параметри, які неможливо контролювати або зміна яких неможлива внаслідок конструктивних особливостей каналу.

Відповідно до вимог незалежності і керованості [46] виділено три фактори, які визначають розшарування зернової суміші: кут нахилу та довжина повітропроникної поверхні, швидкість повітряного потоку; та ефективність очищення зернової суміші у вертикальному ПСК: швидкість повітряного потоку, коефіцієнт розшарування, ширина вертикального каналу. Значення і

кодування рівнів факторів для очищення зернової суміші пшениці представлені в додатку Б.

Після фіксування значень факторів, що є базовими, на встановлених паспортних рівнях, виділено три, які визначають процес.

### 3.2. Результати досліджень

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

Аналізом залежностей (рис.3.1 – 3.3) встановлено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування зернової суміші на 9,3...21 %, зокрема: на 13...21 % до  $k_1=0,9$  для зернової суміші пшениці; на 15-20% до  $k_1=0,22$  для зернової суміші соняшнику; на 9,3...14% до  $k_1=0,47$  для зернової суміші кукурудзи. діапазони варіювання отриманих коефіцієнтів розшарування, при швидкості повітряного потоку  $u=2...3$  м/с, склали для зернової суміші : 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 зернової суміші . останні є значущими з точки зору аеродинамічного розділення зернової суміші .

1 -  $H=0,02$  м; 2 -  $H=0,05$  м

Рисунок 3.1 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ пшениці від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,003$  м;  $\rho=750$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)



1 -  $H=0,02$  м; 2 -  $H=0,05$  м

Рисунок 3.2 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ соняшнику від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,0038$  м;  $\rho=350$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)

1 -  $H=0,02$  м; 2 -  $H=0,05$  м

Рисунок 3.3 – Залежності коефіцієнту розшарування ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ кукурудзи від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,005$  м;  $\rho=700$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)

1 -  $u=3$  м/с; 2 -  $u=1$  м/с

рисунок 3.4 – залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші пшениці від завантаження пск ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,003$  м;  $\rho=750$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)

1 -  $u=3$  м/с; 2 -  $u=1$  м/с

рисунок 3.5 – залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші соняшнику від завантаження пск ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,0038$  м;  $\rho=350$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>)

1 -  $u=3$  м/с; 2 -  $u=1$  м/с;

рисунок 4.6 – залежності коефіцієнту розшарування зернової суміші кукурудзи від завантаження пск ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,005$  м;  $\rho=700$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta=45^\circ$ ) другим значущим параметром та його впливом на ефективність розшарування зернової суміші досліджено завантаження пск на прикладі отриманих залежностей

отримані залежності коефіцієнту розшарування, для зернової суміші що досліджувалися, від завантаження повітропроникної лускатої поверхні, а відповідно, і розробленого пск. аналізом даних залежностей встановлено, що підвищення висоти шару зернової суміші знижує коефіцієнт розшарування на 40...72,5%, зокрема: на 69...72,5% до  $k_1=0,22$  для зернової суміші пшениці; на 40...44% до  $k_1=0,1$  для зернової суміші соняшнику;

на 46,8...49% до  $k_1=0,22$  для зернової суміші кукурудзи. зменшення товщини шару зернової суміші сприяє зменшенню його опору, що викликає збільшення простору між зернами (пористість підвищується). це сприяє інтенсивному перерозподілу частинок зернової суміші та збільшує ефективність розшарування.

встановлені раціональні діапазони коефіцієнтів розшарування склали для зернової суміші : 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 зернової суміші пшениці, соняшнику, кукурудзи при варіюванні технологічних параметрів: швидкість повітряного потоку та завантаження пск (рис.3.7 – 3.9). при цьому вперше враховано попереднє розшарування зернової суміші та його вплив на ефективність очищення розробленого пск.

експериментальні дослідження проведені на вертикальному каналі, у якому варіювали швидкість повітряного потоку та подавали задану зернової суміші відповідно до програми досліджень. при цьому результати порівнювали з очищенням (пневмосепарацією) не розшарованої зернової суміші, 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 зернової суміші пшениці від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,003$  м;  $\rho=750$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta=45^\circ$ )

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 зернової суміші соняшнику від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,0038$  м;  $\rho=350$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta=45^\circ$ )

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 зернової суміші кукурудзи від швидкості повітряного потоку ( $a/l=0,08$ ;  $d=0,005$  м;  $\rho=700$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_p=0,002$  м;  $\rho_p=300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\theta=45^\circ$ )

В результаті дослідів та їх аналізу отримані залежності ефективності роботи вертикального каналу від швидкості повітряного потоку при очищенні від легких домішок зернової суміші 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) зернової суміші, а також від ступеня його розшарування (коефіцієнту розшарування). проведеними попередніми експериментами встановлені характерні значення коефіцієнтів розшарування для різних зернової суміші за певних умов. тому забезпечивши відповідне розшарування (наприклад,  $k_1=0,9$  для шару зернової

суміші 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 при цьому проводили порівняння з очищенням нерозширеної зернової суміші . встановлено, що ефективність роботи вертикального каналу при очищенні розширеної на розробленому пск зернової суміші пшениці підвищується на 12...42% у порівнянні з базовою конструкцією. Підвищення питомого завантаження (товщини шару зернової суміші ), а значить і продуктивності, потребує 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 розширення зернової суміші .

Аналогічно отримані залежності ефективності роботи вертикального каналу від швидкості повітряного потоку при очищенні зернової суміші соняшнику та кукурудзи Аналізом залежностей встановлено, що ефективність розробленого ПСК збільшується: на 3...17% при очищенні зернової суміші соняшнику та на 16...33% при очищенні зернової суміші кукурудзи. 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 зернової суміші соняшнику та 7,5 м/с при очищенні зернової суміші кукурудзи .

В результаті проведення експериментів за розробленою методикою та обробки їх результатів отримано залежності швидкості початку псевдрозрідження та швидкості витання частинок від параметрів нахиленої поверхні та властивостей зернової суміші (рис.3.13, 3.14).

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 куту нахилу повітропроникної поверхні, в діапазоні що досліджується, зменшує швидкість початку псевдозрідження на 9,3 % до 0,68 м/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 зернової суміші 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 зернової суміші що досліджуються, складатиме 2,8...3,5 м/с.

Слід відмітити, що подальше підвищення кута нахилу поверхні (більше  $45^{\circ}$ ) неможливе внаслідок перевищення кута тертя зернової суміші 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.

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 ( $a/l=0,08$ ;  $\theta=45^0$ )

В результаті проведення експериментальних досліджень одержано залежності швидкості спливання легких домішок від їх властивостей (рис.4.15, 4.16) та швидкості повітряного потоку (рис.4.17). Для дослідів використано ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ 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.

1 –  $\rho=50$  кг/м<sup>3</sup>; 1 –  $\rho=200$  кг/м<sup>3</sup>;

---- – експериментальні дослідження; — теоретичні дослідження

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

1 –  $\rho=100$  кг/м<sup>3</sup>; 1 –  $\rho=300$  кг/м<sup>3</sup>

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

Аналізом даних залежностей встановлено, що по мірі руху зернової суміші по повітропроникній поверхні її пористість

збільшується на 14...17%: соняшнику на 14%, кукурудзи на 17%, пшениці на 14,3%, по відношенню до вихідної ( $\varepsilon_0$ ). Це пояснюється дією на зернової суміші, як повітряного потоку так і лусок. Інтенсивність розпушування зернової суміші та збільшення пористості зменшується на повітропроникній поверхні після 0,3 м її довжини. Рекомендовані діапазони пористості зернової суміші склали: пшениці 0,48...0,56; кукурудзи 0,54...0,63; соняшник 0,57...0,65.

Для визначення раціональних параметрів процесу очищення визначені значущі фактори, які впливають на критерії оптимізації – коефіцієнти розшарування та очищення зернової суміші. За планом проведені експерименти, оброблені результати (Додаток Б).

В розкодованому вигляді модель має вигляд:

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

Побудова двомірних перетинів функцій відгука виконували у наступній послідовності. В отримані моделі (3.1), 3.2) підставили закодовані значення всіх факторів, окрім двох що досліджували. Далі, в отриманому виразі визначали центр поверхні відгуку, і провели канонічне перетворення моделі другого порядку. Після канонічного перетворення, визначено тип поверхні відгуку в перетині, виконано графоаналітичний аналіз отриманого виразу.

Плануванням багатофакторного експерименту з критеріями оптимізації - коефіцієнтами розшарування та очищення, встановлені оптимальні конструктивно-технологічні параметри: кут нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=41...43^0$ ; 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 зернової суміші пшениці складає  $k_1=30,53...31,75$  %, а ефективність її очищення  $k_2=92,15...99,29\%$ .

### 3.3. Висновки за розділом

1. Встановлені залежності швидкості «спливання» та траєкторії частинок домішок підтвердили їх перерозподіл до верхніх підшарів зернової суміші 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 зернової суміші та її максимального розшарування рекомендовані діапазони варіювання параметрів: довжини повітропроникної поверхні  $0,4...0,5$  м; швидкості повітряного потоку  $2,5...3,5$  м/с; кута нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=40...45^\circ$ . Розбіжність результатів теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує  $3,5\%$ , що підтверджує адекватність розроблених наукових положень.

2. Запропонованими методами з розробленим програмним забезпеченням експериментально ідентифіковані діапазони варіювання значущих параметрів процесу очищення зернової суміші : пористості та розмірів частинок компонентів зернової суміші . встановлено, що використання розшарувального пристрою призводить до збільшення пористості зернової суміші на  $12,2...17$  %, з інтенсивністю до  $0,3$  м довжини повітропроникної поверхні та варіюванням швидкості повітряного потоку в діапазоні що досліджується. визначені діапазони варіювання пористості зернової суміші склали: пшениці  $0,48...0,56$ ; кукурудзи  $0,54...0,63$ ; соняшнику  $0,57...0,65$ ,



дозволяють підвищити точність подальших математичних моделювань динамічних процесів зернової суміші на зерноочисних машинах.

3. аналізом встановлених експериментально залежностей ефективності процесу очищення зернової суміші за умови їх попереднього розшарування на розробленому пск визначено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування зернової суміші на 9,3...21 %. встановлені діапазони варіювання коефіцієнтів розшарування для зернової суміші : 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 зернової суміші на розробленому пск підвищується на 3...42% у порівнянні з базовою конструкцією. це підтверджує інтенсифікацію процесу очищення зернової суміші у вертикальному каналі за рахунок їх попереднього розшарування.

4. в результаті проведення багатофакторного експерименту процесу очищення зернової суміші рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно- технологічних параметрів розробленого пск: кут нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=41...43^0$ ; 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  $v=0,21...0,3$  м. встановлено, що за визначеними параметрами коефіцієнт розшарування зернової суміші пшениці складає  $k_1=30,53...31,75$  %, а коефіцієнт її очищення розробленим пск -  $k_2=92,15...99,29$ %.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу результатів досліджень підвищення ефективності процесу очищення обґрунтовано актуальність проблеми підвищення продуктивності зерноочисних машин внаслідок недостатньої ефективності роботи їх пневмосепарувальних каналів при розділенні відмінних за властивостями зернової суміші сільськогосподарських культур.

2. Запропонований пневмосепараційний канал барабанного сепаратора з розшарувальним пристроєм із нахиленою повітропроникною поверхнею для очистки зернової суміші та проведено моделювання її руху в робочих зонах каналу.

3. Обґрунтовані параметри каналу дозволяють інтенсифікувати процес очищення зернової суміші та підвищити продуктивність барабанних сепараторів.

4. Встановлено, що збільшення швидкості продування зернової суміші повітряним потоком на поверхні розробленого пневмосепараційного каналу, зменшення щільності частинок зернової суміші та висоти її шару, у визначених діапазонах, підвищують коефіцієнти розшарування на 20...35%.

5. Рекомендовані діапазони варіювання параметрів розробленого каналу: довжини повітропроникної поверхні 0,4...0,5м; швидкості повітряного потоку 2,5...3,5м/с; кута нахилу повітропроникної поверхні  $\theta=40...45^\circ$ . Розбіжність результатів теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує 3,5 %, що підтверджує адекватність розроблених наукових положень.

5. Визначено, що збільшення швидкості повітряного потоку, в діапазонах що досліджується, підвищує коефіцієнт розшарування зернової суміші на 9,3...21 %. Встановлені діапазони варіювання коефіцієнтів розшарування для зернової суміші: 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 зернової суміші склало 42%, порівняно з базовою конструкцією сепаратора.

6. В результаті проведення дослідження процесу очищення зернової суміші рекомендовані наступні раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів розробленого пневмосепараційного каналу: кут

нахилу повітропроникної поверхні  $\theta = 41 \dots 43^{\circ}$ ; довжина повітропроникної поверхні  $L = 0,43 \dots 0,47$  м; швидкість повітряного потоку  $u = 2,3 \dots 2,7$  м/с; швидкість повітряного потоку у вертикальному каналі  $U = 6,1 \dots 6,7$  м/с; ширина вертикального каналу  $B = 0,21 \dots 0,3$  м. Встановлено, що за визначеними параметрами коефіцієнт розшарування зернової суміші пшениці складає  $k_1 = 30,53 \dots 31,75$  %, а коефіцієнт її очищення розробленим сепараційним каналом –  $k_2 = 92,15 \dots 99,29$  %.

7. Визначено, що ефективність процесу очищення зернової суміші від легких домішок підвищується на  $30 \dots 42$  %, що забезпечує збільшення продуктивності барабанних сепараторів на  $23,5 \dots 29$  %. Визначено, що інтенсифікація процесу очищення зернової суміші, за рахунок використання розробленого каналу, супроводжується зниженням питомих енерго- та металоємностей на  $13$  % та  $25$  %, відповідно.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калетнік Г. М. Місце і роль продовольчої безпеки / Г.М. Калетнік, Г.О. Пчелянська // Бізнесінформ. 2014. № 2. С. 30-34.
2. Розвиток ринку сільськогосподарської продукції та формування продовольчої безпеки: [монографія] / Г.М. Калетнік, О.В. Дармограй. Вінниця: Меркьюрі-Поділля. 2016. 267 с.
3. Очищення зерна як одна із передумов його якісного і довготривалого зберігання / М. Занько. Журнал Пропозиція. 2015, №4. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://propozitsiya.com/ua/ochishchennya-zerna-yak-odna-iz-peredumov-yogo-yakisnogo-i-dovgotrivalogo-zberigannya>
4. Зберігання та очищення зерна. 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mehzavod.com.ua/ua/catalog/khranenie-i-ochistka-zerna>
5. Інноваційна діяльність в аграрній сфері: інституціональний аспект: монографія / [Саблук П. Т., Шпикуляк О. Г., Курило Л. І. та ін.]. К.: ННЦ ІАЕ, 2010. 706 с.
6. 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.

7. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. Вібрації в техніці та технологіях. 2004. №3 (35). С. 61 – 63.
8. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. доктора техн. наук: 05.20.01 / Борис Иванович Котов. Глеваха, 1994. 440 с.
9. ДСТУ 2422-94 «Зерно заготівельне і постачальне. Терміни та визначення». К.: Держстандарт України, 1995 (чинний від 01.01.95). 8 с.
10. ДСТУ 3768:2004 «Пшениця. Технічні умови», К.: Держспоживстандарт України, 2004, (чинний від 01.07.04). 21 с.
11. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. - К.: Держстандарт України, 1994. 73 с.
12. Булгаков В.М. Пріоритетні напрями наукових досліджень з механізації сільського господарства / Булгаков В.М., Лінник М.К., Гуков Я.С. Збірник наукових праць НАУ «Механізація сільськогосподарського виробництва». 2001, т. X. С. 8–14.
13. Калетнік Г. М. Основні питання розвитку галузі механізації сільського господарства в Україні / Калетнік Г. М., Адамчук В.В., Булгаков В.М., Крючев В.М., Надикто В.Т. // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця, 2016. №3(95). С.6-13с.
14. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур. – Львів: НВФ «Українські технології», 2006. – 730 с.
15. Берник П.С., Ярошенко Л.В. Вибрационные технологические машины с пространственными колебаниями рабочих органов. Винница: ВГСХИ, 1988. 116 с.
16. Наукова школа академіка Василенка Петра Мефодійовича: монографія / Войтюк Д.Г., Вергунов В.А., Мудрук О.С., Деркач О.П. К.: Аграрна освіта, 2005. 72 с.

17. Деркач О.П. Наукова спадщина академіка В.П. Горячіна / О.П. Деркач. Історія науки і бібліографістика. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://inb.dnsgb.com.ua/2007-3/07dopsag.pdf>

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

19. Ловейкин В.С., Кулик В.П. Динамічний аналіз робочих органів зерноочисних машин з рекупераційним приводом. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2009. Вип. 77. С. 316 – 323.

20. Котов Б. І., Деревенько І. А., Степаненко С. П. Дослідження ефективності сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решеті вібровідцентрових машин. Вібрації в техніці та технологіях. В.: ВНАУ. 2017. №2(85). С. 99-102.

21. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна / Л.Н. Тищенко. Харьков: Основа, 2004. 224 с.

22. Ротаметрический порционнo- парусный классификатор РПК-30. Краткое руководство по сборке, эксплуатации и обслуживанию. М.:ВГМ, 1971. 15 с.

23. Теоретичні дослідження характеристик руху частинок у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епюри швидкості повітря по висоті каналу / М.В. Бакум та ін. Вісник ХДТУСГ: Механізація сільського господарства. Харків: ХДТУСГ, 2003. Вип. 21. С. 88 – 94.

24. Пневмосепаратор: пат. України 101068 U Україна: МПК В07В 4/00. № u 2015 01888; заявл. 03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

25. Спосіб визначення розмірів насіння: пат. 101069 U Україна: МПК G01В 11/00, G01В 11/02. № u 2015 01890; заявл.03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16.

26. Пневмосепаратор: пат. 101068 U Україна: МПК В07В 4/00. № u 2015 01888; заявл. 03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл. №16. 4 с.

27. Пневмосепаратор: пат. 2387490 РФ, МПК:В07В4/02, А01F12/44. №2008151800/03; заявл. 25.12.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл.№6.
28. Сепаратор зерновых материалов: пат. 2275254 РФ, МПК: В07В4/08, В07В13/00. №2004106891/03; заявл. 09.03.2004; опубл. 27.04.2006, Бюл.№6.
29. Калетнік Г.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність та жорсткість. Ч.І, ІІ: Підручник / Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк та ін.; за ред. Г.М. Калетніка, М.Г. Чаусова. К.: Хай Тек-Прес, 2011. 616 с.
30. Калетнік Г.М. Технічна механіка [Текст] : підручник для студентів вищих навчальних закладів / Калетнік Г.М., Булгаков В.М.; Черниш, О.М. та ін.К. : Хай-Тек Прес, 2011. 340 с.
31. Калетнік Г.М. Теоретична механіка в прикладах та завданнях: Навч. посібник / В. М. Булгаков, Г. М. Калетнік, І. В. Гриник та ін.; За ред. : В. М. Булгакова. К.: Аграрна наука, 2014. 348 с.
32. Aliev E.V., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, No1. P.95-104.
33. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №3. С. 6-12.
34. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК. Том І. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 647с.
35. Солоня О.В., Купчук І.М. Практикум з Теорії механізмів і машин : навчальний посібник. Вінниця : Друк, 2020. 250 с.
36. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки. Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. 200 с.
37. Булгаков В.М. Основы научных исследований / Бабицкий Л.Ф., Булгаков В.М., Войтюк Д.Г. К. : Издательство НАУ, 1999. 205 с.

38. Ковбаса В.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ // Навч. посібник / В.П. Ковбаса, В.М. Швайко, О.П. Гуцол. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2015. 536 с.

39. Труханська О.О. Динаміка охолодження зерна в аероґравітаційному шарі. / Котов Б.І., Труханська О.О., Курганський О.Д. // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». Вінниця, 2017. №3(98). С. 94-98.

40. Котов Б.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Липунов // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин. Кіровоград, 2012. №42. с. 340 – 346.

41. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

42. Адлер Ю.И. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.И. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1976. 279с.

43. Хайлис Г.А. Механика растительных материалов / Г.А. Хайлис. К.: УААН, 2002. 374 с.

44. Експериментальне визначення параметри зернової суміші при псевдозрідженні на повітропроникних поверхнях пневмосепаруючих пристроїв / Борщ Ю.П. та ін. Вісник ХНТУСГ. 2015. Вип. 157. С.192 – 197.

45. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. К.: УСХА, 1998. 625 с.

46. Канал для сепарации зерна восходящим воздушным потоком для одновременного выделения легких и тяжелых включений: пат. 2448784 РФ, МПК: В07В004/08. № 2010147181/03 ; заявл.19.11.2010; опубл.27.04.2012, Бюл.№6.

47. Increase of seed cleaning efficiency by better use of air stream properties /V. Saitov, P.Savynych, W. Golka, J. Kamionka. *Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 3 (155). P. 89 – 99.

48. Kotov B., Kalinichenko R., Spirin A. Mathematical modeling of heat and mass transfer process under heat treatment of grain materials in dense layer. TEKA. Lublin. 2016. Vol. 16. №4. P. 35 – 42.

49. Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream / Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I.. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 62. P. 56 – 63.

50. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Результати експериментальних досліджень пневмосепарації зерна у пневмовідцентровому сепараторі з удосконаленням експериментальним диском. Зб. Наук. праць Кіровоградського національного технічного університету. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 23. С. 250 – 257.

51. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Колос, 1980. 132 с.

52. Бандура В.М., Курило В.Л., Серета Л.П., Пришляк В.М., Швець Л.В. Методичні рекомендації до написання й оформлення магістерських робіт магістрантами денної та заочної форм навчання інженерно-технологічного факультету спеціальності 208 «Агроінженерія» галузі знань 20 «Аграрні науки та продовольство». Вінниця: ВНАУ, 2019. 39с.

ДОДАТКИ