

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту
імені М.П.Момотенка**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри технічного сервісу
та інженерного менеджменту
імені М.П.Момотенка

_____ **Роговський І.Л.**

“ ___ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
ДВОАСПРАЦІЙНИХ ЗЕРНООЧИСНИХ МАШИН»**

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»

Освітня програма – «Агроінженерія»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, проф. _____
«підпис»

Голуб Г.А.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., професор _____
«підпис»

Михайлович Я.М.

Виконав

«підпис»

Вішковський В.Є.

Київ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту
імені М.П.Момотенка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та
інженерного менеджменту
імені М.П.Момотенка,

_____ **І.Л.Роговський**
“ ___ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Вішковському Владиславу Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність – 208 «Агроінженерія»
Освітня програма – «Агроінженерія»
Орієнтація освітньої програми – освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Дослідження експлуатаційних показників двоаспіраційних зерноочисних машин».

затвержені наказом ректора НУБіП України від «07» грудня 2023 року №2223 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру: 25.05.2025 р.

Вихідні дані до роботи:

1. Особливості виробництва та переробки продукції рослинництва природно-кліматичних зон України, та організації виконання робіт.
2. Існуючі наукові дослідження та технічні засоби для виконання виробничого процесу очистки зернових

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасних повітряно-решітних сепараторів і тенденції їх розвитку
2. Теоретичні передумови вдосконалення зерноочисної машини
3. Методика і програма експериментальних досліджень по вдосконаленню зерноочисної машини
4. Результати експериментальних досліджень зерноочисної машини
5. Оцінка ефективності результатів досліджень удосконалення зерноочисної машини

Дата видачі завдання 18.09.2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Я.М. Михайлович**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ **В.Є. Вішковський**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПОВІТРЯНО-РЕШЕТНИХ СЕПАРАТОРІВ І ТЕНДЕНЦІЇ ЇХ РОЗВИТКУ	6
1.1. Сучасні технології післязбиральної обробки зерна пшениці	6
1.2. Аналіз двоаспіраційних зерноочисних машин.....	18
1.3. Удосконалення процесу очищення в зерноочисних машинах	27
2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ	37
2.1. Підвищення ефективності післярешітної сепарації	37
3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
3.1. Програма експериментальних досліджень	51
3.2. Експериментальна установка та обладнання	51
4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ.....	59
4.1. Властивості досліджуваного матеріалу	59
4.2. Розподіл швидкості повітряного потоку.....	65
4.3. Обґрунтування параметрів живильника	69
4.4. Аналіз розподілу зерна в каналі пневматичної системи	73
5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ	80
ВИСНОВОК	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	83

ВСТУП

Сьогодні головним завданням агропромислового комплексу (АПК) залишається збільшення виробництва зерна. Ключ до досягнення високих врожаїв полягає в ретельній та швидкій обробці зерна після збору врожаю.

Наразі післязбиральна обробка зерна здійснюється за допомогою двоступеневих повітряно-решітних очисних машин. Завдяки своїй універсальності ці машини користуються великою популярністю в Україні. Сепаратори цього типу використовуються для попереднього та основного очищення зерна. За певних умов вони ефективно переробляють товарне зерно та насіння.

Сучасні повітряно-решітні сепаратори мають дві аспірації. Перша аспірація здійснює попереднє очищення вороху від найбільш легких домішок (лушпиння, листя, подрібнена солома тощо), полегшуючи подальшу роботу решітностану та другої аспірації.

Обробка зернового вороху в каналі другої аспірації є завершальною стадією очищення, після якої зерно повинно відповідати стандартам товарної якості. Підвищити ефективність цієї операції можна за рахунок більш рівномірного розподілу очищуваного матеріалу по всьому перерізу аспіраційного каналу, що забезпечує кращий результат порівняно з наявними зерноочисними машинами. У зв'язку з цим, теоретичне обґрунтування та практичне впровадження способу подачі сипкої суміші в аспіраційний канал є важливим етапом удосконалення конструкції зерноочисного обладнання.

Багато вчених зробили значний внесок у розробку та вдосконалення технологій та технічних засобів очищення зерна. Однак продуктивність універсальних зерноочисних машин для очищення зерна все ще залишається відносно низькою, що перешкоджає повноцінному впровадженню технології первинного очищення потоковим фракціонуванням.

Мета дослідження: підвищити ефективність роботи повітряного очищення зерноочисних машин за рахунок рівномірного завантаження каналу післярешітної аспірації.

Завдання дослідження:

- Визначення методів покращення рівномірності завантаження вертикального зовнішнього повітророздільного каналу під час подачі зернового вороху з коливальною поверхнею;
- Теоретично та експериментально визначити раціональні параметри процесу надходження зернового вороху в канал післярешітної аспірації;
- Розробити пристрій для надходження вороху в канал, який забезпечує високий рівень рівномірності розподілу матеріалу по перерізу каналу;
- Дослідити вплив запропонованих рішень на якісні показники роботи зерноочисної машини.

Об'єкти дослідження: Процес повітряної сепарації зернового вороху у вертикальному пневмоканалі післярешітної аспірації.

Предмет дослідження: Робота каналу другої аспірації повітряно-решітної зерноочисної машини при використанні живильника з ступінчастою поверхнею.

1. АНАЛІЗ ПНЕВМОСИСТЕМ СУЧАСНИХ ПОВІТРЯНО-РЕШЕТНИХ СЕПАРАТОРІВ І ТЕНДЕНЦІЇ ЇХ РОЗВИТКУ

1.1. Сучасні технології післязбиральної обробки зерна пшениці

У сучасних умовах світового ринку зерна, де наша країна стала провідним експортером пшениці, постає важливе питання щодо інтенсифікації виробництва зерна в фермерських господарствах.

Головне завдання зерновиробництва – отримати та зберігати якомога більше продукції. Щоб зберегти врожай під час вирощування зерна, його необхідно негайно піддати післязбиральній обробці.

З метою забезпечення своєчасної післязбиральної обробки зерна в Україні на сьогодні застосовують чотири основні технологічні підходи: двоетапну, періодичну, потокову та фракційну технології.

Двоетапна технологія передбачає виконання попередньої обробки зерна в період збирання врожаю з подальшим доведенням його до базисних кондицій. Застосування цього методу дозволяє зменшити потребу в трудових ресурсах і високопродуктивному устаткуванні в пікові періоди, за рахунок використання техніки меншої потужності. Основними недоліками є потреба у додаткових зерноскладах та багаторазовий вплив робочих органів машин на зерно, що може погіршувати його якість.

Періодична технологія потребує наявності у господарствах відкритих або закритих майданчиків, а також складських приміщень. Вона базується на використанні пересувних або стаціонарних машин, що обумовлює підвищене залучення ручної праці, додаткові втрати зерна та зниження його якості.

Поточна технологія полягає у послідовному пропусканні зернового вороху через комплекс машин, кожна з яких виконує певний етап очищення. На кожній стадії видаляються домішки певного типу, а фінальне очищення здійснюється на заключному агрегаті лінії. Така технологія є найбільш поширеною. У ряді випадків зерновий ворох після збирання з комбайнів надходить безпосередньо на обробку для видалення основних домішок. Залежно від конфігурації лінії,

зерно може бути доведене до кондиційних показників із залученням мінімальної кількості машин. Водночас типові потокові лінії не завжди дозволяють передати ворох із звальної ями одразу в сепаратор остаточного очищення, що змушує пропускати його через кілька машин, піддаючи зерно зайвому механічному впливу, який знижує його товарні та посівні якості.

Сучасні технології післязбиральної обробки орієнтовані на зниження енергетичних і матеріальних витрат та на підвищення якості кінцевого продукту. У зв'язку з цим активно впроваджуються та вдосконалюються зерноочисні агрегати, які включають мінімально необхідний набір машин і механізмів для ефективного очищення зернового вороху. Зменшення кількості машин у складі агрегату дозволяє знизити інтенсивність механічного впливу на зерно, зменшуючи його травмування і, як наслідок, сприяючи підвищенню врожайності.

Можливість своєчасної післязбиральної обробки матеріалу, що надходить, може забезпечити фракційна технологія. Вона дозволяє відразу проводити первинну обробку всього матеріалу, що надходить із полів, зберігаючи зібраний урожай. Сенс цієї технології полягає в поділі вороха зерна за однією або декількома значимими ознаками на фракції, які в залежності від призначення направляють або на подальшу обробку, або на зберігання.

Для забезпечення розділу на фракції в даний час широко застосовують двоаспіраційні повітряно-решітні зерноочисні машини, які поділяють зерновий ворох за двома основними ознаками – шириною зернівки та швидкості витання.

Відділення легковагових домішок повітряним потоком із зернового вороху, можливо, є одним із найдавніших способів післязбиральної обробки злаків.

Пневмосепаруючі системи зерноочисних машин в абсолютній більшості складаються з пневмосепаруючих каналів, пристроїв живильника, осадкових камер, вентиляторів і систем очищення повітря.

Зерноочисні машини, які застосовуються в сучасних агрегатах для післязбиральної обробки зернового вороху, відрізняються компануванням і

складом систем повітряного очищення. Пневмосистеми сучасних зерноочисних машин можна класифікувати за кількома ознаками.

Основною ознакою є спосіб руху повітряного потоку, який може бути замкнутим, розімкненим і замкнуто-розімкнутим (комбінованим).

У замкнутих пневматичних системах повітря циркулює по колу, багаторазово використовуючись для відокремлення домішок із зернової суміші. Такий принцип рециркуляції повітряного потоку сприяє енергозбереженню за рахунок зниження витрат на створення та підтримання повітряного потоку. Проте застосування замкнутих аспіраційних систем має низку суттєвих недоліків.

Одним із основних недоліків є накопичення мікроорганізмів у повітряному середовищі, яке неодноразово контактує з біологічно активною масою зернового вороху. Через відсутність ефективного механічного очищення ці мікроорганізми не вилучаються повітроочисними пристроями, що створює ризик перенесення інфекцій із заражених зерен на здорові, знижуючи при цьому товарні та посівні якості продукції.

Крім того, для ефективної роботи замкненої пневмосепаруючої системи обов'язковою умовою є наявність вискоефективної системи очищення повітря та герметизуючих пристроїв (затворів) на вході й виході оброблюваного матеріалу. Такі технічні рішення суттєво ускладнюють конструкцію системи, що в підсумку призводить до зростання вартості сепараторів. Аспіраційні системи замкнутого типу, як правило, застосовуються в обладнанні, яке входить до складу зерноочисних і переробних комплексів, таких як ЗАВ або КЗЗ.

В аспіраційних системах з розімкненим повітряним контуром повітря однократно взаємодіє із сипучим матеріалом, після чого видаляється в атмосферу. Такі системи забезпечують ефективніше очищення зернової суміші від домішок завдяки використанню чистого атмосферного повітря.

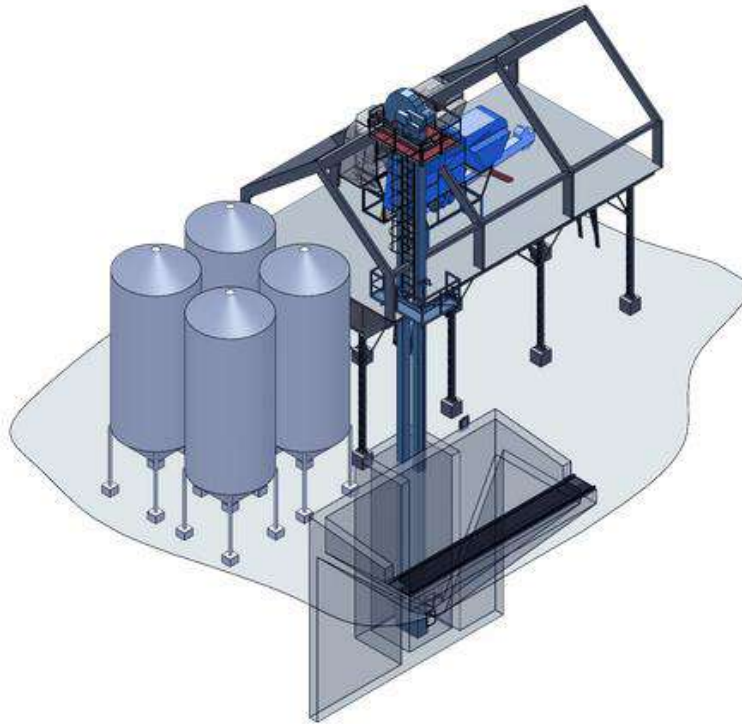


Рис. 1.1. Переробний комплекс типу ЗАВ

До недоліків пневмосистем розімкнутого типу належить те, що в процесі їх роботи відбувається значний повітрообмін, що потребує організації ефективної припливної вентиляції у приміщенні. Крім того, після обробки зерна забруднене повітря скидається в навколишнє середовище, що з екологічної точки зору вимагає застосування спеціальних очисних установок для запобігання забрудненню.

Повітряні системи розімкнутого типу реалізовано в більшості зерноочисних машин як вітчизняного, так і іноземного виробництва. Найперспективнішим напрямом у цій класифікації є комбіновані, або замкнуто-розімкнуті системи, які поєднують переваги обох типів – замкнутого й розімкненого. Однак, попри свої технічні переваги, вони не набули широкого впровадження через високу металоємність і складність виготовлення.

Ключовим фактором ефективності пневмосистем є спосіб організації руху повітряних потоків у пневмоканалах. За цією ознакою аспіраційні системи зерноочисних машин поділяються на: всмоктувальні, нагнітальні та суміщені.

Найбільшого поширення набули всмоктувальні системи, які активно використовуються у великій кількості зерноочисних установок. Системи з

нагнітальним повітряним потоком застосовуються значно рідше. Основним їхнім недоліком є створення надлишкового тиску в пневмосистемі сепаратора, що призводить до викиду пилу та домішок у повітря, погіршуючи екологічну ситуацію.

Для створення повітряного потоку в пневмосистемах зерноочисного обладнання та централізованих повітророзподільчих мереж застосовуються вентилятори різних типів. За конструктивною ознакою їх поділяють на відцентрові, діаметральні та осьові. Найбільше поширення у складі зерноочисних машин отримали вентилятори відцентрового та діаметрального типів, у той час як осьові вентилятори використовуються значно рідше.

Основним недоліком вентиляторів осьового типу є сходження повітря в паралельному напрямку осі лопатки, через що повітряний потік не має основного напрямку. До того ж, тиск, створений такими вентиляторами, не досить високий для забезпечення якісної пневмосепарації.

Аспіраційні системи зерноочисних машин можна класифікувати за кількістю пневмосепарируючих каналів в аспіраційній системі. Вони діляться на пневмосистеми з одним, двома та більше пневмоканалами.

Повітряно-решітні зерноочисні машини з одним пневмосепаруючим каналом в основному використовують для попереднього та первинного очищення комбайнового зернового вороху. Більшість сепараторів, що застосовуються при первинному очищенні, часто мають похилі пневмосепаруючі канали, рідше вертикальні.

Пневмосистеми повітряно-решітних зерноочисних машин, призначених для вторинного та кінцевого очищення зернового вороху, зазвичай мають два або більше аспіраційних каналів. Наявність двох стадій повітряного очищення – дорешітного та післярешітного – забезпечує досягнення необхідної якості кінцевого продукту. Зокрема, система післярешітної аспірації дозволяє додатково виділяти легковагові домішки, які не були усунуті на попередньому етапі очищення, а також частково вилучати фуражну фракцію, не відсепаровану решітним блоком.

У більшості зерноочисних машин із подвійною аспірацією друга стадія повітряного очищення реалізована у вигляді вертикального пневмосепаруючого

каналу. Після очищення на решетах зерно збирається в єдиний потік і самопливом, під дією сили тяжіння, подається до каналу післярешітної аспірації. Висхідний повітряний потік, проходячи крізь зернову масу, ефективно видаляє легкі домішки. За таким принципом побудовані машини серії МВР-4 (МВУ-1500), які широко використовуються для остаточного очищення насіння різних культур. Оскільки ці сепаратори не призначені для первинної очистки, до них повинен подаватися попередньо очищений матеріал. Вони інтегруються у склад потокових насіннеочисних ліній.

У конструкції МВР-4 (МВУ-1500) реалізовано два пневмосепаруючих канали – для дорешітного та післярешітного повітряного очищення – і відповідно дві окремі осадові камери.

Перша аспірація виконана у вигляді похилого пневмоканалу, в який насінневий матеріал подається за допомогою живильного валика.

Друга, післярешітна аспірація реалізована через вертикальний пневмоканал прямокутного перерізу. У верхній його частині передбачено розширення, що забезпечує ефективне видалення фуражних домішок, які виводяться із системи шнеком. На вході до осадової камери цього каналу встановлено регулювальний клапан, який забезпечує точне налаштування швидкості повітряного потоку.

Насінневий матеріал надходить до приймальної камери, де рівномірно розподіляється по ширині та спрямовується в проміжок між регулювальним клапаном (поз. 4) і живильним валиком (поз. 3), після чого по похилих направляючих подається до решітного блока. У першому аспіраційному каналі (поз. 2) відбувається продування насінневої маси повітрям, внаслідок чого відокремлюються легкі домішки – солома, частини листя, оболонки насіння та пил. Ці домішки осідають у першій осадовій камері та виводяться з машини шнеком (поз. 5). Повітря з частками пилу через витяжний патрубок спрямовується до централізованої аспіраційної системи потокової лінії для подальшого очищення.

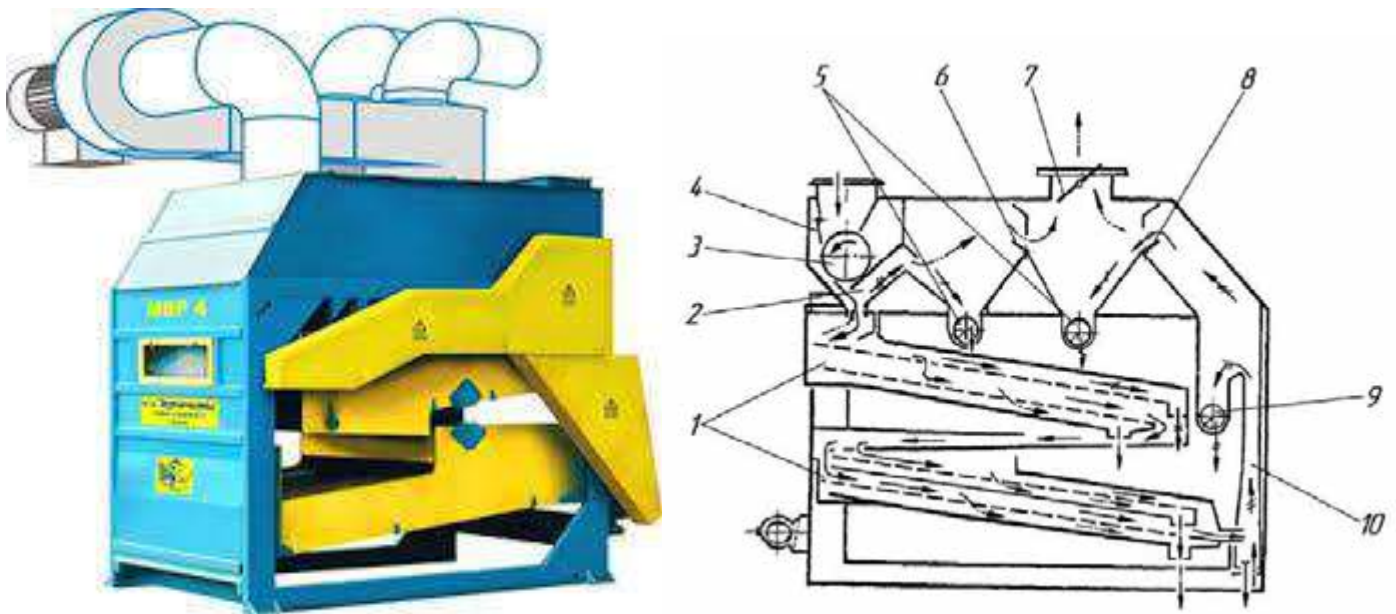


Рис. 1.2 – Технологічна схема машини МВР-4 (МВУ-1500):

1 – решітні стани; 2 – пневмоканал першої аспірації; 3 – живильний валик; 4 – клапан; шнек відведення легких домішок; 6, 8 – клапани точного регулювання подачі повітря; 7 – клапан грубого регулювання подачі повітря; 9 – шнек виведення фуражної фракції; 10 – пневмоканал другої аспірації

Після проходження очищення на решітному стані насінневий матеріал через регульовану щілину надходить у канал другої аспірації по похилій напрямній, де висхідний повітряний потік забезпечує видалення біологічно неповноцінного зерна та залишків легковагових домішок.

Повітряно-решітна зерноочисна машина ОВС-25 являє собою пересувну в межах току машину, призначену для попереднього очищення зернового вороху на відкритих токах і майданчиках.

Основними вузлами машини є завантажувальний транспортер, приймальна камера 1 (рис. 1.3), повітряні канали 4, верхній 9 і нижній 8 решітні стани, відвантажувальний транспортер.

Механізм самопересування забезпечує переміщення в робочому режимі зі швидкістю 0,1–0,3 м/хв. і переїзд у межах току із швидкістю 2,7–6,1 м/хв. Машина ОВС-25 урухомлюється за допомогою трьох електродвигунів сумарною потужністю 9,6 кВт. Завантажувальний транспортер містить похилій скребковий транспортер і два шарнірно з'єднані з ним скребкові живильники, які можуть копіювати поверхню току.

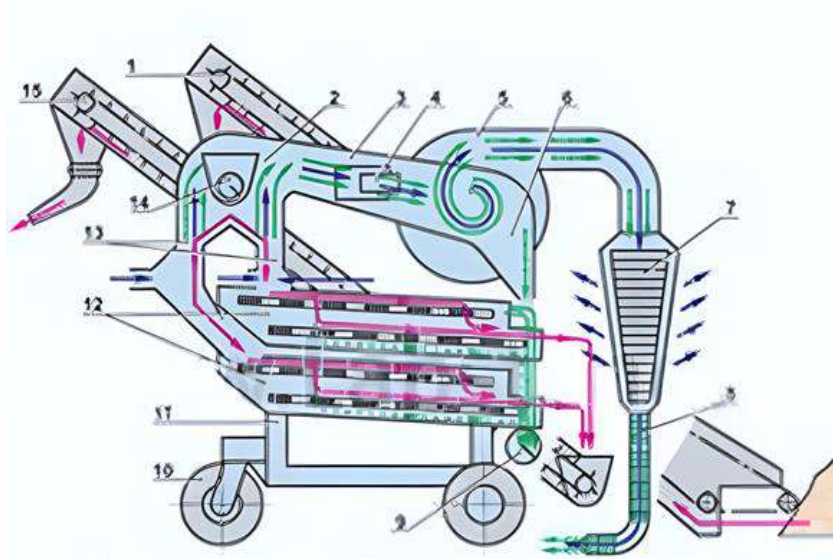


Рис. 1.3 – Схема повітряно-решітної машини ОВС-25:

1 – завантажувальний транспортер; 2 – приймальна камера; 3 – повітропровід; 4 – заслінка; 5 – вентилятор; 6 – камера; 7 – пиловідокремлювач; 8 – пневмотранспортер; 9 – шнек відходів; 10 – колесо; 11 – рама; 12 – решітні стани; 13 – пневмосепарувальні канали; 14 – шнек розподільний; 15 – вивантажувальний транспортер

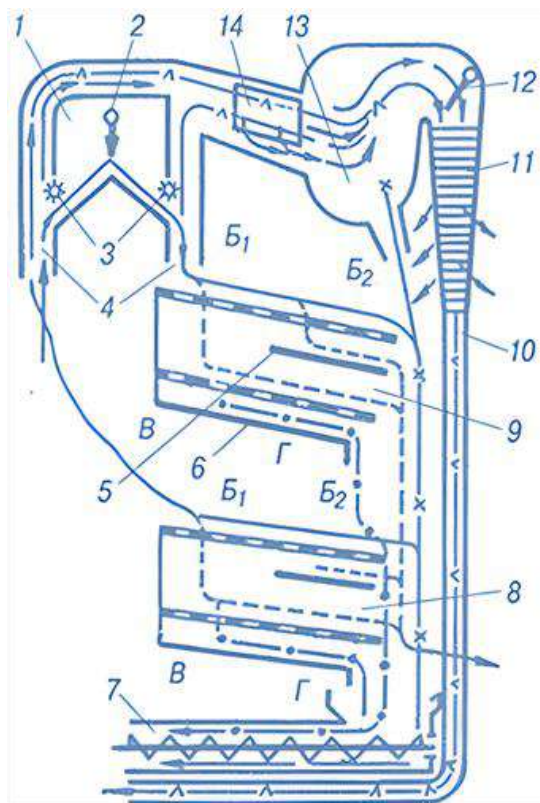


Рис. 1.3.1 – Схема робочого процесу повітряно-решітної машини ОВС-25:

I – приймальна камера; 2 – розподільний шнек; 3 – живильні валики; 4 – повітряні канали; 5 і 6 – верхня і нижня скатні дошки; 7 – вивантажувальний шнек; 8 і 9 – нижній і верхній решітні стани; 10 – пневмотранспортер; II – інерційний пиловідокремлювач; 12 – заслінка; 13 – відстійна камера; 14 – вікно

Завантажувальним транспортером зерно подається в приймальну камеру 1, де його рівномірно розподіляє шнек.

Кожух шнека має регулювальний потік – зернозлив, по якому зсипається зайве зерно. Приймальна камера поділяє зерно на дві рівні частини, які надходять на решітні стани. Внизу камери розміщено ребристі живильні валики 3, які подають зерно в повітряні канали 4. Під валиками розміщено регулювальні клапани.

Повітряні канали 4 призначені для відокремлення від зерна легких домішок. Вікно 14 у корпусі можна перекривати пересувною заслінкою, що дає змогу регулювати швидкість повітряного потоку в каналах. Повітряний потік виносить легкі домішки у відстійну камеру 13, в якій частина домішок осідає, а більш легкі надходять у пневмотранспортер 10.

Решітні стани 8 і 9 працюють паралельно. У кожний решітний стан вставляють рамки з решетами Б1, Б2, В і Г. Стани коливаються у протилежних напрямках для зрівноваження інерційної сили. До машини прикладається комплект решіт з довгастими отворами шириною 1,5–5 мм і з круглими діаметром 3,6–10 мм. Очищене від легких домішок зерно надходить із повітряних каналів 4 на решето Б1 кожного решітного стана, де розділяється на дві рівні частини. Дрібні домішки і частина зерна, пройшовши через решето Б1, надходять на решето В, крупні домішки і зерно, що залишилося, сходять на решето Б2. Решета В і Г працюють послідовно і виділяють дрібні важкі домішки, які по нижній скатній дошці 6 зсипаються в горловину вивантажувального шнека 7.

Крупні домішки йдуть сходом з решета Б2, а зерно, що проходить через нього, по верхній скатній дошці 5 зсипається в приймальний пристрій відвантажувального транспортера. Сюди надходить і зерно, що йде сходом із решета. Відвантажувальний транспортер, у нижню головку якого зерно зсипається з приймального пристрою, подає його в бурт або в кузов транспортного засобу. Пневмотранспортер 10 відводить відходи в окремий бурт.

Робочу швидкість машини підбирають так, щоб за повного завантаження решітних станів через 5–10 хв. роботи в живильній камері утворювалися лишки зерна. Після цього машину зупиняють і після сходу лишків знову вмикають механізм самопересування.

Правильність підбору решіт перевіряють за виходами зерна, легких і крупних відходів, підсіву.

Повітряний потік регулюють так, щоб він виносив пил, уламки соломи і колосків, полови, легке насіння бур'янів, але не видаляв повноцінного зерна. Щітки мають щільно прилягати до решета по всій його поверхні. У разі спрацювання щіток піднімають напрямні, якими перекочуються ролики рами щітки.

Сепаратор гравітаційний СГ-25 призначений для попереднього очищення зернового вороху решетами і повітряним потоком від крупних, дрібних і легких домішок усіх зернових, зернобобових, соняшнику, кукурудзи і круп'яних культур, що надходять від комбайнів. Сепаратор виконано у вигляді вертикальної колонки і не має рухомих частин. Ворох переміщується самопливом (під дією гравітаційних сил) нерухомими робочими органами – решетами і поступово очищається від крупних, дрібних, а при працюючого вентилятора і легких домішок. Номінальна пропускна здатність становить 25 т/год., потужність урухомника вентилятора 3 кВт, маса блоків сепарації та аспірації відповідно – 152 і 205 кг.



Рис. 1.4 – Сепаратор гравітаційний СГ-25

Сепаратор повітряно-решітний стаціонарний СС-100 призначений для відокремлення від зерна домішок, які відрізняються за шириною, товщиною і аеродинамічними властивостями, за допомогою решіт і повітряного потоку. Забезпечує попереднє, первинне і вторинне очищення. Сепаратор СС-100 складається з попередньої пневмоочистки, шнека відходів, приймального решета, сортування і підвісних решіт і головної пневмоочистки. Особливістю будови сепаратора є те, що він має велику площу решіт (10,6 м²), які розміщені у спарених решітних станах у два яруси, а їх очищення від домішок, що застряли в отворах, здійснюється гумовими кульками і не потребує складної кінематики механізму урухомника. Решітний корпус влаштований на гнучких зв'язках, що значно зменшує вібрацію, а також дає змогу регулювати кут нахилу (4–1°), амплітуду (5–15 мм) і частоту коливання решіт (250–320 коливань за хвилину).

Комплексний барабанний сепаратор КБС 1270.400 (рис. 1.5.) призначений для попереднього, первинного і вторинного очищення. Машина складається з блока аспірації і порожнистого барабана (діаметром 1270 мм) з чотирма швидкознімними решетами загальною площею 16 м², у якого можна плавно змінювати кут нахилу (1,5–5°) і частоту обертання 0–25 об/хв.).



Рис. 1.5 – Комплексний барабанний сепаратор КБС 1270.400

Процес роботи ґрунтується на послідовному очищенні зерна від сторонніх домішок у барабані, який повільно обертається. Спочатку відбувається очищення повітряним потоком від легких домішок, які виводяться шнеком, а

потім, залежно від схеми очищення, зерновий ворох або подається у барабан і рухаючись внутрішньою поверхнею решіт поступово звільняється від домішок, або вивантажується з машини.

Продуктивність сепаратора за попереднього і первинного очищення становить до 250 і до 200 т/год., калібрування – до 30 т/год. Подача повітря 10 тис.м³/год. Тиск повітря – 1400 Па. Потужність урухомника (без вентилятора) – 5,87 кВт. Маса – 2650 кг.

Двоаспіраційні зерноочисні машини також можуть застосовуватися для первинного очищення зернового вороху. Наприклад, машини серії МВР (МПУ) (МВР-7, МПУ-70, МПУ-20, МПУ-15) призначені для якісного доочищення зернового вороху, що надходить з комбайнів перед сушінням, тимчасовим зберіганням і кінцевою обробкою з видаленням великих, легких і дрібних домішок повітряним потоком і на решетах. Такі повітряно-решітні сепаратори входять до складу різних зерноочисних агрегатів та ліній.

Аспіраційна система машини МВР-7 (МПУ-70) (див. рис. 1.6) включає пневмосепаруючі канали для дорешітного та післярешітного очищення, а також осадову камеру. Перша стадія аспірації формується за рахунок похилих перегородок, розташованих у нижній частині приймальної камери, й слугує для видалення легковагових домішок із зернового вороху. Канали другої аспірації в машинах серії МВР розташовані вертикально; на вході до осадової камери вони оснащені регулювальними заслінками, що дозволяють змінювати швидкість повітряного потоку. Післярешітне повітряне очищення призначене для додаткового виділення легких домішок, які не були вилучені під час першого етапу, а також для видалення частини біологічно неповноцінного зерна.

Аналіз сучасних технологій післязбиральної обробки зерна та конструктивних особливостей зерноочисного обладнання свідчить про чітку тенденцію розвитку галузі в напрямку мінімізації механічного впливу на зерновий матеріал та скорочення виробничих витрат на отримання кінцевої продукції. Це, у свою чергу, обумовлює необхідність зменшення кількості машин у складі ліній післязбиральної обробки зернового вороху.

Одним із найбільш ефективних підходів до досягнення цієї мети є фракційна технологія післязбиральної обробки, яка забезпечує зниження рівня

механічного навантаження на зерно, що надходить на очищення.

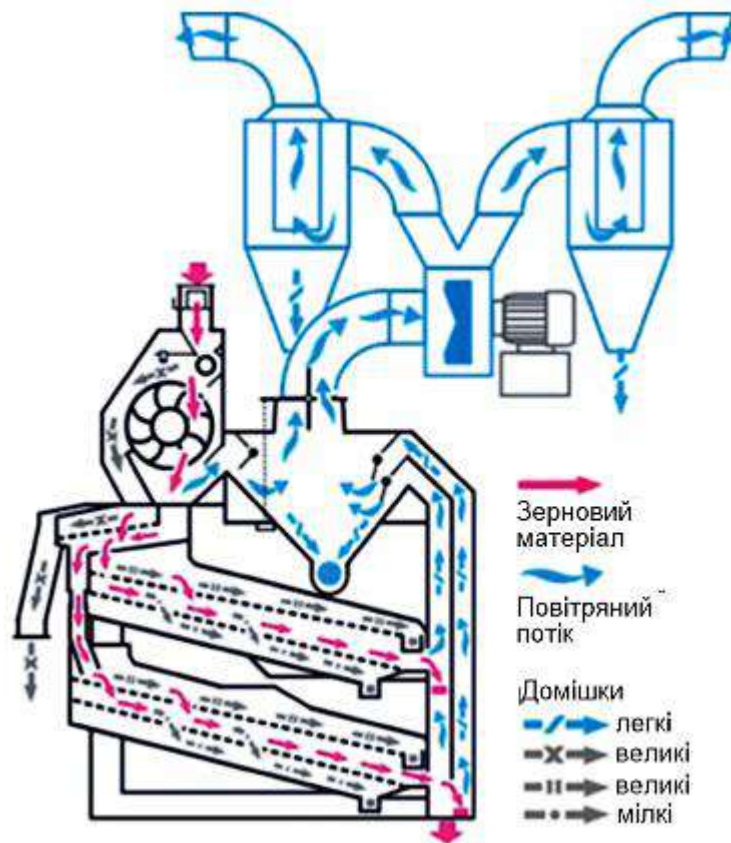


Рис. 1.6 – Технологічна схема машини МВР-7 (МПУ-70):

У зв'язку із зменшенням кількості зерноочисних машин в агрегаті важлива роль відводиться універсальним повітряно-решітним зерноочисним машинам, оскільки основне відділення зернового матеріалу від можливих засмічувачів, як рослинних, так і мінеральних здійснюється саме на таких сепараторах.

1.2. Аналіз двоаспіраційних зерноочисних машин

Невід'ємною складовою сучасних зерноочисних агрегатів і потокових ліній післязбиральної обробки зернових культур є універсальні повітряно-решітні зерноочисні машини. Особливо широкого застосування набули універсальні сепаратори, пневмосистеми яких поєднують дорешітну та післярешітну аспірацію. Такі машини можуть ефективно використовуватися як для попереднього й первинного, так і для вторинного або кінцевого очищення зернового вороху.

Застосування універсальних очищувальних машин дозволяє скоротити кількість одиниць обладнання в складі післязбиральної лінії, що, своєю чергою, сприяє зменшенню матеріальних витрат на виробництво кінцевого продукту. Крім того, універсальні повітряно-решітні машини здатні виконувати як підготовку товарного зерна, так і очищення насінневого матеріалу – за умови правильного налаштування робочих режимів.

Зерноочисні машини серії ОЗФ зазвичай інтегрують у склад зерноочисних агрегатів типу ЗАВ, а також у різноманітні післязбиральні лінії.

Зокрема, модель ОЗФ-80/40/20 оснащена двоаспіраційною пневмосистемою розімкнутого типу (див. рис. 1.7).

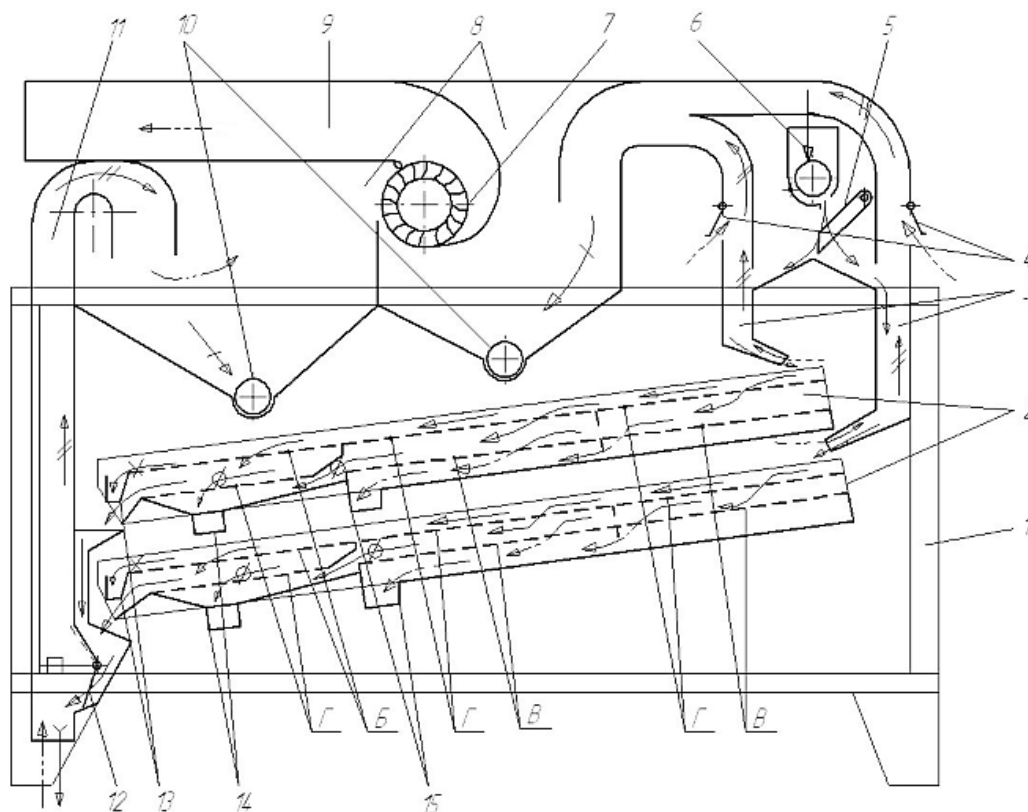


Рис. 1.7 – Технологічна схема фракційного очищувача зерна ОЗФ:

1 – рама; 2 – решітні стани; 3 і 11 – пневмосепаруючі канали першої та другої аспірації; 4 – повітрязабірні клапани; 5 – дільник; 6 – живильне пристрій; 7 – діаметральний вентилятор; 8 – осадові камери; 9 – повітровідвідний патрубок; 10 – шнеки; 12 – герметизуючий клапан; 13 і 15 – лотки виведення великих та дрібних домішок; 14 – лоток виведення фуражної фракції

Пневмосепаруючі канали дорешітного та післярешітного очищення мають вертикальне розташування. Всмоктуючий повітряний потік забезпечується

одним діаметральним вентилятором, який розташований у верхній частині машини між осадовими камерами першої та другої аспірації.

Зерно, що надходить на очищення, розподіляється на два рівноцінні потоки, які подаються до каналів дорешітної аспірації. Тут за допомогою висхідного повітряного потоку з маси зернового вороху вилучаються легковагові домішки, які осідають в осадовій камері першої аспірації. Швидкість повітряного потоку в дорешітних каналах регулюється шляхом зміни положення повітрозабірних клапанів.

Далі обидва потоки проходять паралельне сортування на решітних станах. Після очищення на решетах вони об'єднуються в єдиний потік і через герметизуючий клапан подаються у пневмоканал післярешітної аспірації. Тут із зернової суміші висхідним потоком повітря видаляються щуплі, некондиційні зерна та залишки легких домішок, які потрапляють до осадової камери другої аспірації. Для підтримання стабільної швидкості повітряного потоку в каналі післярешітного очищення герметизуючий клапан встановлюється у плаваюче положення.

Пневматична система універсальних зерноочисних машин серії ОЗФ-80 має низку експлуатаційних недоліків. Одним із них є недостатня ефективність дорешітної пневмосепарації, яка, для забезпечення якісного подальшого сортування на решетах, повинна виділяти більшу частину соломистих і легковагових домішок. Для цього у вертикальних пневмоканалах дорешітного очищення необхідно підтримувати повітряний потік зі швидкістю 6–7 м/с.

Однак при наявності високих аеродинамічних опор у системі, вентилятор, що використовується в конструкції, не здатний підтримувати задану швидкість повітряного потоку в обох аспіраційних каналах одночасно. Таким чином, одним із головних недоліків пневмосистем машин серії ОЗФ-80 є застосування одного діаметрального вентилятора для обслуговування як дорешітної, так і післярешітної аспірації, що негативно впливає на стабільність та ефективність повітряного очищення.

Для забезпечення ефективної роботи універсальних зерноочисних машин

високої продуктивності, особливо у складі ліній з додатковими очищувальними пристроями, доцільним є застосування відцентрових (радіальних) вентиляторів. Підвищення енергоефективності в таких випадках можливе завдяки удосконаленню конструкції аспіраційної системи.

Попри відомі переваги діаметральних вентиляторів у складі аспіраційних систем, значна кількість повітряно-решітних машин іноземного виробництва з високою продуктивністю використовують аспіраційні системи розімкнутого типу, оснащені саме вентиляторами радіальної конструкції. Такий тип вентиляторів дозволяє створювати вищий тиск всмоктування, порівняно з діаметральними аналогами, що забезпечує стабільніший повітряний потік у системі.

У більшості зарубіжних двоаспіраційних сепараторів обслуговування каналів дорешітної та післярешітної аспірації здійснюється за допомогою єдиного радіального вентилятора, що забезпечує компактність системи при збереженні достатньої продуктивності.

Часто вентилятори встановлюють зверху пневмосистеми, таке компонування мають сепаратори фірми Cimbria Heid [8], машини серії NSD вироблені організацією Denis (Франція) [9], зерноочисники виробництва Westrup [10] та сепаратори ІНТЕХ К150.

На особливу увагу заслуговують універсальні зерноочисні машини DELTA 140 серії (рис. 1.8). Такі сепаратори можуть бути використані і для попередньої підготовки, і для первинної та вторинної очистки. Характерною машиною виробництва цієї фірми може бути універсальний повітряно-решітний сепаратор DELTA 146 Combi. Ця двоаспіраційна зерноочисна машина призначена для підготовки товарного зерна, але при певному компонуванні та налаштуваннях може успішно справлятися з підготовкою насінневого матеріалу.

Одним з найбільш відомих виробників зерноочисної техніки та насінноочисних ліній у світі є фірма PETKUS Technologies GmbH [11]. Керівництвом цієї компанії вкладаються значні кошти для дослідження та вдосконалення сучасних технологій та машин, що використовуються при

післязбиральній обробці сільськогосподарських культур.

Колектив організації ROEBER Institut GmbH [11, 12], яка є підрозділом фірми PETKUS Technologies, займається вдосконаленням технічних засобів та розробкою нових технічних рішень.

PETKUS Technologies випускає універсальні двоаспіраційні зерноочисні машини для попередньої та первинної обробки зерна серії V, повітряно-решітні сепаратори серій A та U, а також універсальні сепаратори серії M, які в основному застосовуються для вторинного очищення зернового вороху. Один із універсальних повітряно-решітних сепараторів фірми PETKUS представлений на рис. 1.9

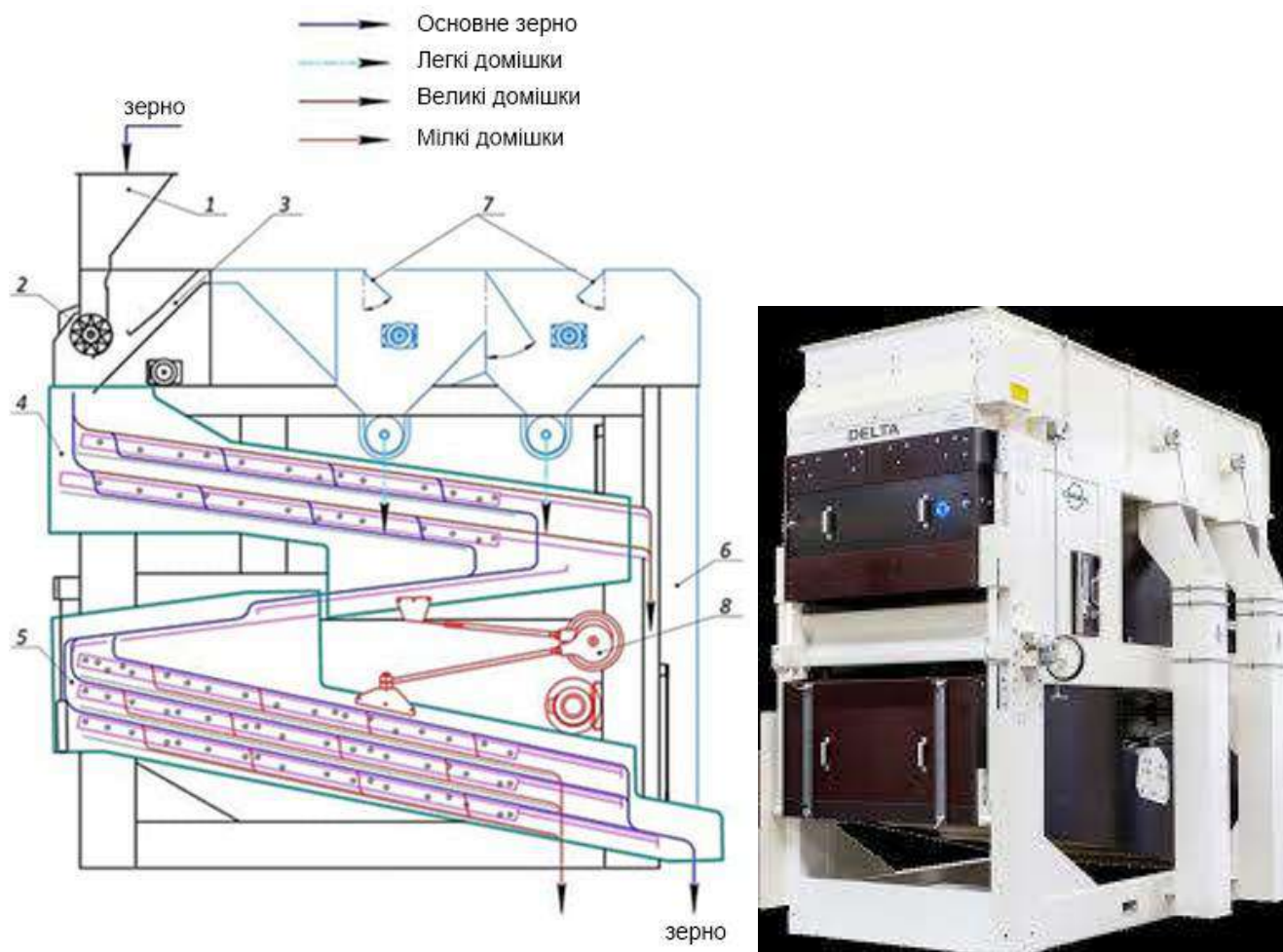


Рис. 1.8 – Схема машини DELTA 146 Combi фірми Cimbria Heid:

1 – горловина, 2 – валик живильника; 3 – канал дорешітної аспірації; 4 – верхній решітний стан; 5 – нижній решітний стан; 6 – канал післярешітної аспірації; 7 – осадова камера каналу дорешітної аспірації та осадова камера каналу післярешітної аспірації; 8 – скатна поверхня

Слід відзначити, що в сепараторах серії U12/U15 виробництва PETKUS Technologies GmbH друга аспірація реалізована у вигляді зведеного пневмоканалу з можливістю регулювання впускної заслінки. Для зміни швидкості повітряного потоку в аспіраційних каналах передбачено можливість коригування перерізу першого каналу шляхом зміни положення заслінки, а також регулювання заслінок в осадкових камерах, через які здійснюється додатковий підсмоктувальний забір повітря з атмосфери.

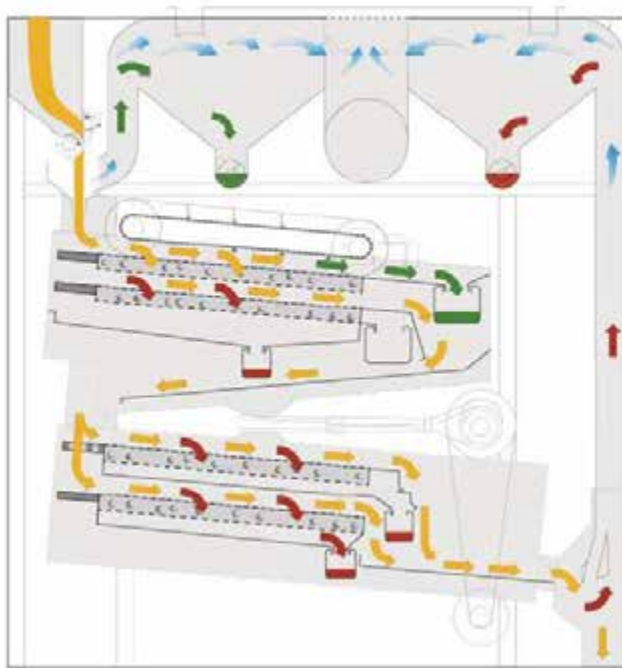


Рис. 1.9 – Схема машин PETKUS U12/U15:

З машин закордонного виробництва слід відзначити повітряно-решітні зерноочисні машини виробництва Schmidt Seeger серії TAS (рис. 1.10), які, як і багато сучасних машин, є універсальними сепараторами.

Особливістю пневмосистем машин даної серії, що відрізняє їх від аналогічного обладнання конкурентів, є послідовне використання одного повітряного потоку спочатку для очищення зернового вороху в каналі післярешітної аспірації, а згодом – у дорешітному пневмоканалі. Повітряний потік надходить у систему через канал другої аспірації, де здійснюється видалення залишкових легковагових домішок і некондиційних зерен, які потрапляють до осадової камери.

Після цього повітряна маса переміщується у канал дорешітного очищення, де проходить через потік зернового вороху, що надходить у машину. На цій

стадії повітря повторно виконує функцію очищення, виносячи з маси зерна пил і легковагові домішки в осадову камеру першої аспірації, після чого викидається в атмосферу.

Під час підготовки товарної пшениці машини цієї серії демонструють продуктивність у діапазоні від 60 до 250 т/год. При виконанні первинного очищення продуктивність становить 150 т/год, а у режимі вторинного очищення – 45 т/год.

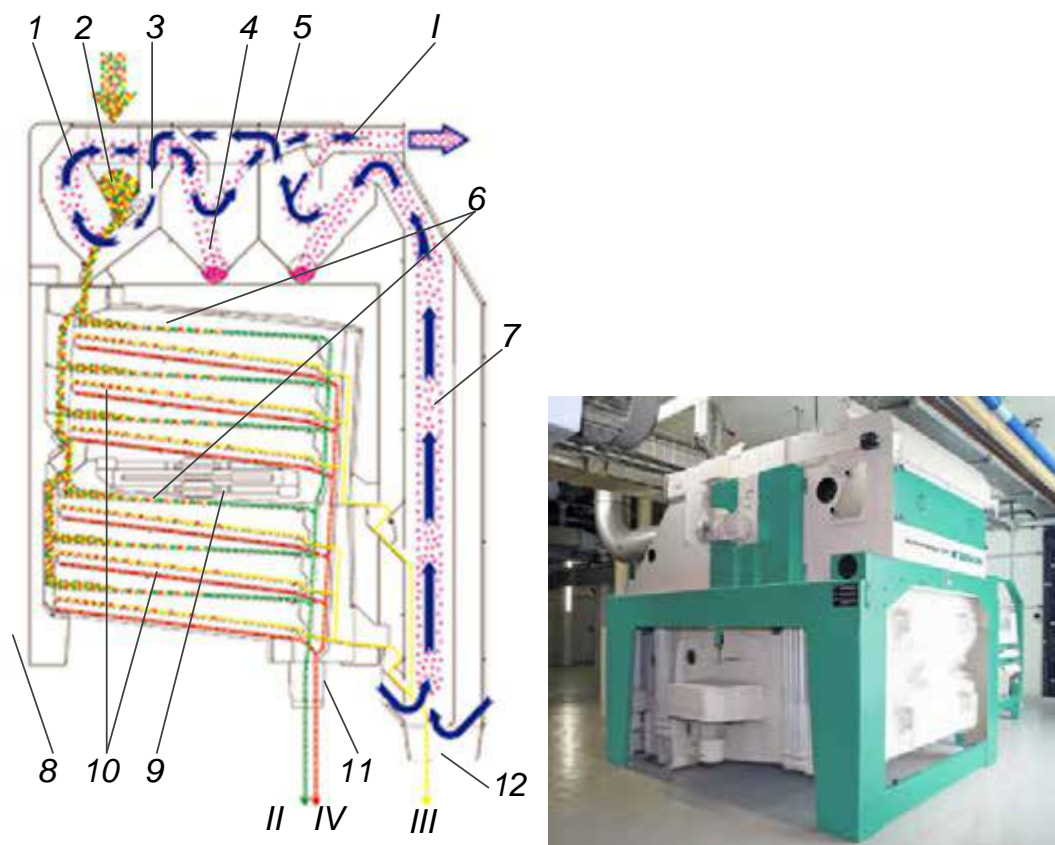


Рис. 1.10 – Технологічна схема роботи машини TAS-206A-2-6:

1 – пневмосепаруючий канал дорешітного очищення; 2 – завантажувальний пристрій з розподільником, що коливається; 3 – осадова камера пневмоканалу дорешітного очищення; 4 – осадова камера пневмоканалу післярешітного очищення; 5 – клапан регулювання швидкості повітря в пневмосепаруючому каналі дорешітного очищення; 6 – решета відділення великих домішок (великого зерна 1 гатунку); 7 – пневмосепаруючий канал післярешітного очищення; 8 – рама машини; 9 – привід решітного стану з круговим коливанням; 10 – сортувальні решітки для відділення основної фракції (2 гатунк); 11 – лоток виведення дрібного зерна та домішок; 12 – лоток виведення основної фракції; I- запилене повітря до фільтра та витяжного вентилятора; II – вихід великих домішок (великого зерна 1 сорт); III-вихід основної фракції (2 гатунку); IV – вихід дрібного зерна, дрібних та легковагових домішок

Schmidt Seeger також випускає спеціальні сепаратори для обробки зерна на насінні цілі, такі як машини TAS 210A-1 та TAS 200A-III. Пневмосистеми цих машин аналогічні пневмосистемами інших машин цієї серії.

На підставі досліджень пневмосистем універсальних сепараторів було розроблено двоаспіраційну пневмосистему універсальної повітряно-решітної зерноочисної машини (рис. 1.11).

При розробці даної аспіраційної системи за основу було прийнято двоаспіраційну пневмосистему попереднього повітряно-решітного сепаратора у вигляді її компонування, що дозволяє знизити витрати енергії на пневмосепарацію.

Дана пневмосистема працює таким чином. камеру другої аспірації 14, канал дорешітного повітряного очищення 9 осадову камеру першої аспірації 1.

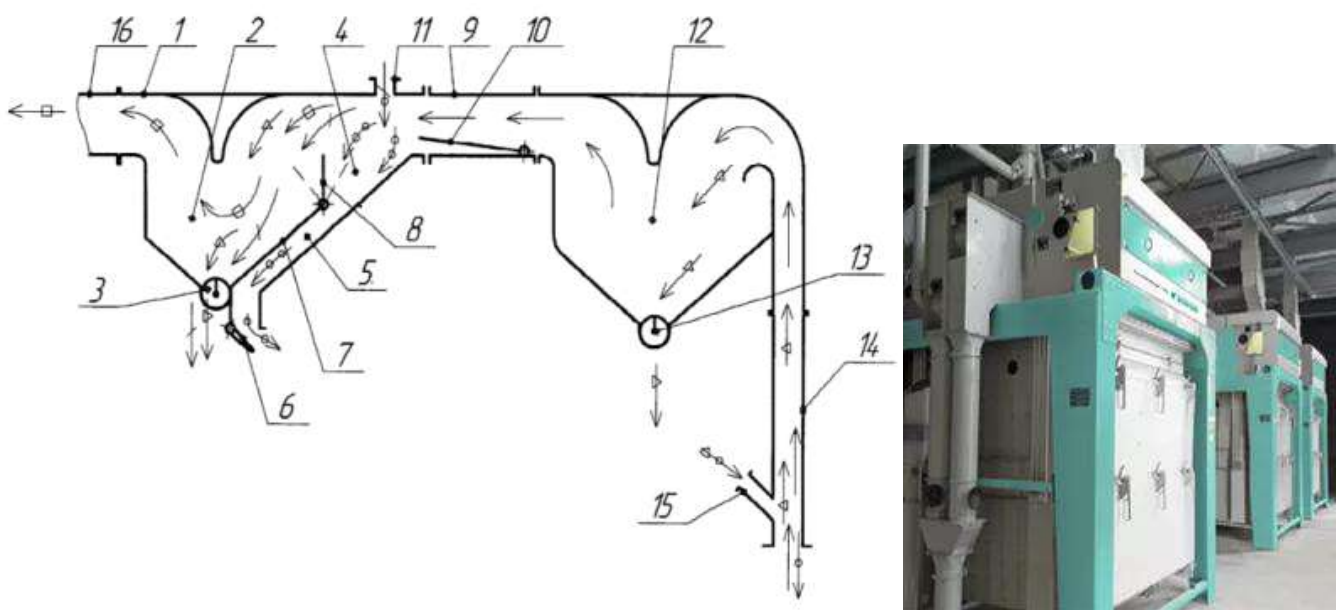


Рис. 1.11 – Технологічна схема роботи двоаспіраційної пневмосистеми:

1 – осадова камера першої аспірації; 2 – секція збору винесених компонентів; 3, 13 – пристрої для виведення фракцій з осадових камер; 4 – секція, що уловлює зерно, що пройшло очищення в першій аспірації; 5 – вивідний канал; 6 – клапан гравітаційний; 7 – стінка осадової камери; 8 – клапан регулювальний; 9 – канал першої аспірації; 10 – клапан регулювання швидкості повітряного потоку; 11 – вікно завантажувальне; 12 – осадова камера другої аспірації; 14 – канал другої аспірації; 15 – завантажувальне вікно в канал другої аспірації; 16 – повітропровід

Живильний пристрій подає зерновий ворох через завантажувальне вікно (поз. 11) тонким шаром у канал дорешітної аспірації (поз. 9), де повітряним потоком вилучаються пил та частина легковагових домішок. Далі регулювальний клапан (поз. 8) спрямовує попередньо очищений ворох через вивідний канал (поз. 5) на решітний стан, де відбувається сортування: виділяються крупні та дрібні домішки, а зерно розділяється на основну й фуражну фракції.

Зернова маса основної фракції після решітного сортування надходить у канал післярешітної аспірації (поз. 14) через завантажувальне вікно (поз. 15). У цьому каналі повітряний потік відділяє залишкові легковагові домішки та біологічно неповноцінне зерно, яке виводиться до осадової камери другої аспірації (поз. 1). Очищене зерно надалі або прямує на зберігання, або на додаткову обробку.

Переваги цієї аспіраційної системи порівняно з аналогами:

Зниження енерговитрат на очищення зерна завдяки використанню єдиного повітряного потоку, що послідовно проходить через канали післярешітного і дорешітного очищення та відповідні осадові камери.

Висока ефективність дорешітної аспірації досягається за рахунок горизонтального розташування пневмосепаруючого каналу, що виключає наявність поворотів у системі, які могли б створювати завихрення і знижувати якість сепарації. Така конфігурація також зменшує опір повітряного потоку, що позитивно впливає на енергоспоживання.

Простота конструкції, яка включає вертикальний канал післярешітної аспірації, дві осадові камери та горизонтальний канал дорешітної аспірації, з'єднаний із зовнішнім вентилятором. Така компоновка значно полегшує монтаж обладнання.

Виходячи з проведеного аналізу сучасних універсальних сепараторів, можна відзначити, що перевагу мають ті машини, в пневмосистемах яких використовуються всмоктуючий повітряний потік, створюваний радіальним вентилятором і послідовно проходить через канали повітряного очищення та їх

осадові камери. Така організація руху повітряної маси у пневмосистемі дозволяє досягти найменших енерговитрат та високої ефективності пневмосепарації у всіх аспіраційних каналах.

1.3. Удосконалення процесу очищення в зерноочисних машинах

Досить часто сепарація зернового вороху на повітряно-решітному сепараторі є завершальним етапом післязбиральної обробки, після якого очищений зерновий матеріал надходить або на зберігання, або безпосередньо на реалізацію. Сучасні повітряно-решітні машини, як правило, оснащуються двома аспіраційними каналами. Перша аспірація виконує попереднє очищення вороху від найменш щільних та великих домішок (лушпиння, листя, солома тощо) під час подачі оброблюваного матеріалу до машини. Це суттєво полегшує наступну сепарацію зернової суміші на решітних елементах та у каналі післярешітної аспірації.

Натомість друга аспірація, яка здійснює обробку зернового матеріалу в однойменному каналі, є заключною стадією очищення. Після її проходження зерно має відповідати стандартам, що висуваються до товарної продукції, та бути придатним для зберігання або продажу.

Оскільки після сортування на решітному стані зерновий ворох вже рівномірно розподілений по ширині потоку, живильні пристрої другої аспірації виконують дещо інші функції, ніж у першій. Одним із важливих завдань таких пристроїв є герметизація завантажувального вікна. Проте ще важливішою функцією є забезпечення рівномірного завантаження пневмоканалу по глибині, з урахуванням швидкості повітряного потоку та опору зернової маси.

Варто зазначити, що на відміну від живильників каналів дорешітної аспірації, конструкція живильних пристроїв післярешітного очищення не стандартизована і часто реалізується у вигляді різних технічних рішень, адаптованих до конкретних умов експлуатації та типу сепаратора.

Також було розроблено та запатентовано пристрій для подачі зернової суміші у вертикальний пневмоканал, який зображено на рис. 1.12.

Пристрій живильника працює наступним чином. Зерновий ворох, сходячи з сортувального решета і далі з завантажувального пристрою 3, під власною

вагою потрапляє на лоток 4 і переміщається по поверхні лотка до завантажувального вікна 2 пневмосепаруючого каналу 1. Там рухається маса зернового вороху відсувається поверхню нижньою лопатою. Проходячи крізь зазор, товщина шару зернового вороху зменшується, і матеріал віялом подається до зони пневмосепарування.

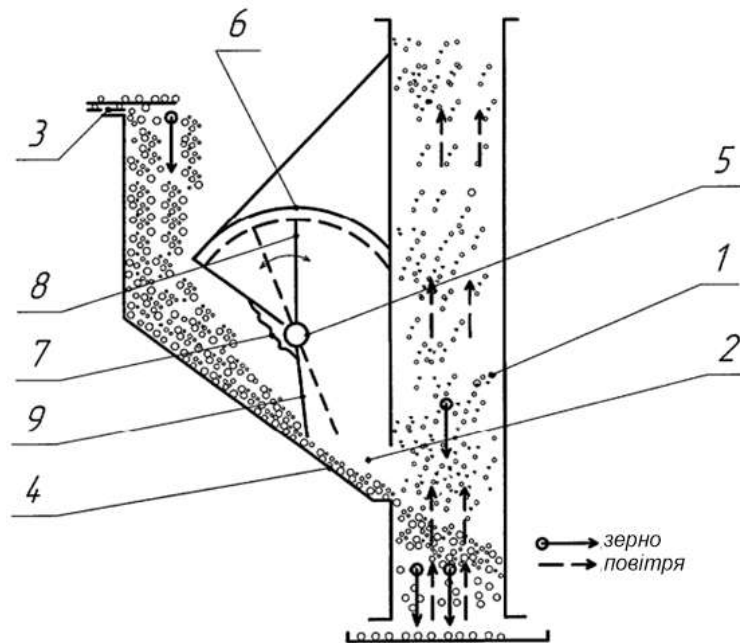


Рис. 1.12 – Схема пристрою для подачі зернової суміші до пневмосепаруючого каналу:

1 – вертикальний пневмоканал; 2 – поперечне вікно; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – скатний лоток; 5 – дволопатевий клапан; 6 – обичайка; 7 – повітронепроникне полотно; 8 – верхня поворотна лопата клапана; 9 – нижня лопать клапана

У пневмосепаруючому каналі завдяки висхідному повітряному потоку з зернового вороху вилучаються легковагові домішки, які відводяться до осадової камери (на схемі не показано). Водночас більш важкі частинки осідають у нижній частині каналу, звідки виводяться.

Дволопатевий клапан (поз. 5) забезпечує герметизовану подачу зернового вороху в канал. Нижня лопать (поз. 9) відкриває щілину лише настільки, щоб пропустити оброблюваний матеріал. Під час переміщення повітря в пневмосепаруючому каналі поблизу клапана створюється зона розрядження, що діє на обидві лопаті. За умови рівності зусиль клапан зберігає стійкий баланс.

Для додаткової герметизації зазору між верхньою лопаттю (поз. 8) і обичайкою (поз. 6), на першій закріплено ущільнюючий матеріал (поз. 7).

Описаний принцип дії клапана дозволяє усунути небажане підсмоктування повітря та забезпечити стабільну подачу зернової маси в канал. Проте, при роботі з високою продуктивністю, спостерігається перевантаження частини пневмоканалу, ближчої до зони введення. Це відбувається через нерівномірний розподіл матеріалу по глибині каналу, внаслідок чого повітряний потік не може ефективно проникати крізь щільний шар зернового вороху. Як наслідок, він проходить переважно через менш навантажену частину каналу, де й виносить лише часткову кількість легких домішок і дефектного зерна.

Такий перекис у завантаженні каналу призводить до зниження ефективності пневмосепарації, особливо при зростанні об'ємів оброблюваного матеріалу.

При нерівномірному завантаженні вертикального пневмосепаруючого каналу післярешітної аспірації зерно не розподіляється рівномірно по всьому перерізу каналу. У результаті основна частина повітряного потоку спрямовується через ділянки з низькою щільністю оброблюваного матеріалу, оскільки їхній аеродинамічний опір менший. Натомість у зоні безпосереднього введення зернової маси, де її концентрація є підвищеною, опір повітряному потоку значно зростає, що призводить до зниження швидкості повітря і формування завихрень. Таке нерівномірне протікання повітря негативно позначається на ефективності сепарації, оскільки легковагові домішки не вилучаються у повному обсязі, а енерговитрати на процес післярешітного очищення істотно зростають.

З метою підвищення якості сепарації у другій аспірації, у низці моделей зерноочисних машин почали впроваджувати підканалні сітки. Такі конструктивні елементи сприяють рівномірному розподілу зернового вороху по ширині каналу в зоні пневмосепарації, а також забезпечують однорідність повітряного потоку, що загалом покращує якість очищення зерна.

Впровадження завантаження каналів післярешітної аспірації через підканалну сітку реалізовано, зокрема, в сепараторах деяких серій виробництва компаній Cimbria Heid та Petkus [8, 11] (рис. 1.13). У цих машинах післярешітна

аспірація виконана у вигляді здвоєного пневмоканалу, перша частина якого має розширений переріз. Потік зернового вороху, що сходить з усіх сортувальних решіт, спрямовується на підканальну сітку, яка є продовженням нижнього сортувального або підсівного решета.

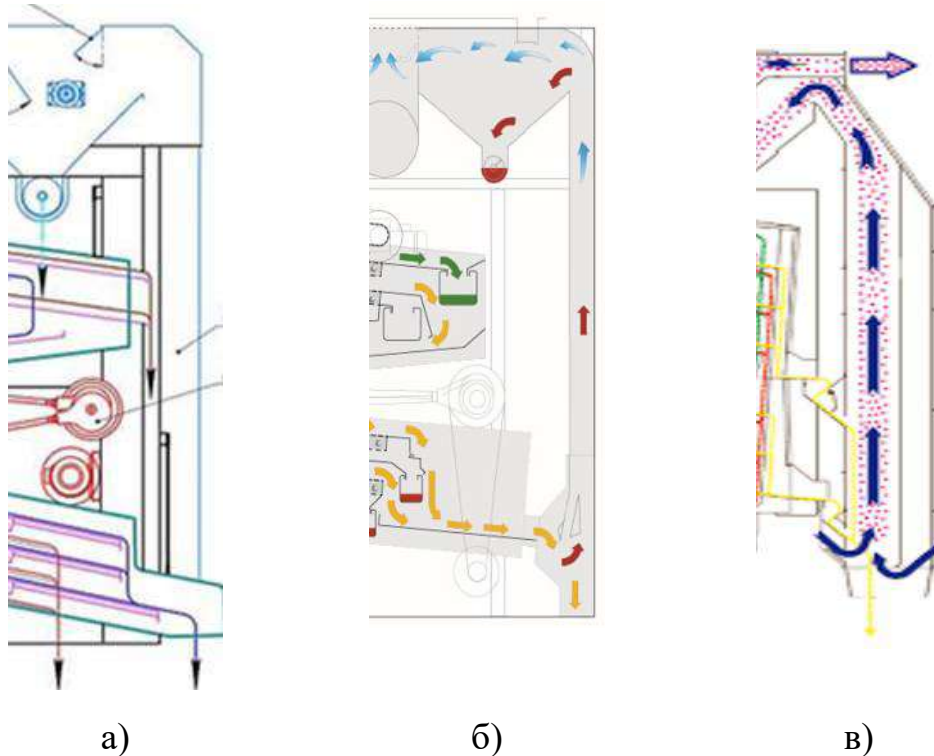


Рис. 1.13 – Системи післярешітної пневмосепарації: а) машини DELTA 146; б) машини PETKUS U12/U15 ; в) машини TAS-206A-2-6

Підканальна поверхня являє собою дрібнопористу металеву сітку, яка закріплюється у кінцевій частині решітного стану та виконує поступальні коливання синхронно з ним. Для забезпечення герметичності при подачі зернового вороху в канал, на внутрішніх стінках каналу встановлюються герметизуючі заслінки.

Відповідно до вимог замовника, виробники можуть оснащувати машину системою автоматичного регулювання заслінок, що забезпечує адаптивне керування процесом очищення. У початковій, розширеній частині пневмосепаруючого каналу зерновий матеріал продувається повітряним потоком низької швидкості, що сприяє утворенню псевдозрідженого шару. Це, у свою чергу, забезпечує оптимальні умови для ефективного відділення легковагових домішок у другій частині післярешітного пневмоканалу.

При проектуванні сучасних зерноочисних машин було запропоновано різні варіанти конструкції пневмосепаруючого каналу. Зокрема, одна з удосконалених конфігурацій (рис. 1.14) передбачає підвищення ефективності сепарації за рахунок наступних особливостей:

У конфузорній зоні каналу (поз. 7) створюється високошвидкісний рівномірний повітряний потік, який забезпечує максимальне видалення легковагових домішок. Невелика частина повноцінного зерна, яка може бути захоплена повітрям, додатково очищується в зонах розширення (поз. 6 та 8), де за умов зниженої концентрації зернової суміші в повітрі забезпечується більш чітке розділення фракцій. У результаті зменшуються втрати повноцінного зерна разом із домішками у відходи.

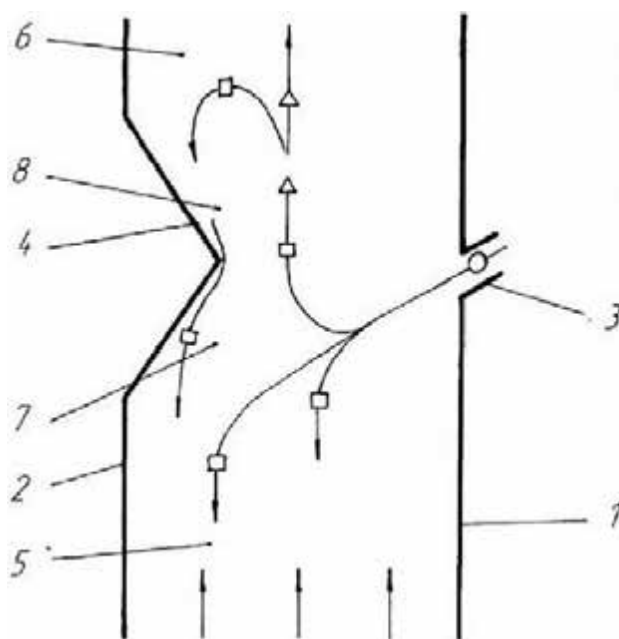


Рис. 1.14 – Загальний вигляд пневмосепаруючого каналу: 1 – внутрішня стінка; 3 – завантажувальний пристрій;

До недоліків описаної конструкції пневмосепаруючого каналу можна віднести нерівномірність швидкості повітряного потоку по його довжині: у зонах 7 і 8 вона істотно перевищує відповідні значення в зонах 1 і 2. Це призводить до того, що оптимальні умови для поділу сипучого матеріалу не забезпечуються по всій довжині каналу, що, своєю чергою, знижує ефективність сепарації. Крім

того, посилене механічне навантаження на зерно у зонах підвищеної швидкості може спричинити травмування зернової маси.

На наступному рисунку представлено альтернативну конструкцію пневмосепаруючого каналу, яка працює за наступним принципом:

Початковий зерновий ворох подається через завантажувальне вікно (поз. 2) у вертикальний пневмосепаруючий канал (поз. 1) за допомогою живильного пристрою (поз. 4). У каналі зернова маса обробляється висхідним потоком повітря, який відокремлює легковагові домішки, що направляються у відходи.

Середні фракції, а також частина повноцінного зерна і домішок, які рухаються по параболічних траєкторіях, близьких до протилежної від живильника стінки каналу, потрапляють до камери повторного очищення (поз. 6). Звідти по скатній площині (поз. 8) ці частинки подаються назад у пневмосепаруючий канал для вторинної очистки.

Очищений матеріал, звільнений від легковагових домішок, під дією сили тяжіння виводиться через нижній отвір каналу (поз. 1) та спрямовується до наступного етапу обробки або на зберігання.

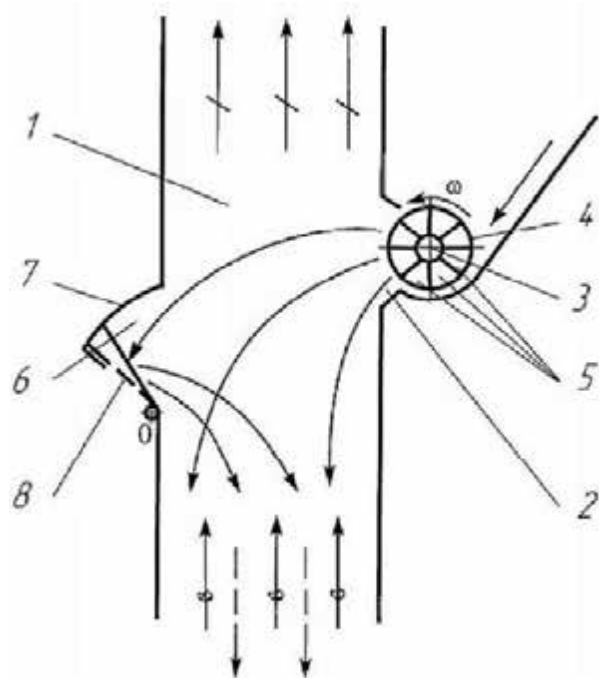


Рис. 1.15 - Загальний вигляд пневмосепаруючого каналу:

1 – вертикальний пневмосепаруючий канал; 2 – поперечне вікно; 3 – вал живильника; 4 – живильник; 5 – зовнішня циліндрична поверхня; 6 – робоча камера; 7 – верхня стінка робочої камери; 8 – скатна поверхня

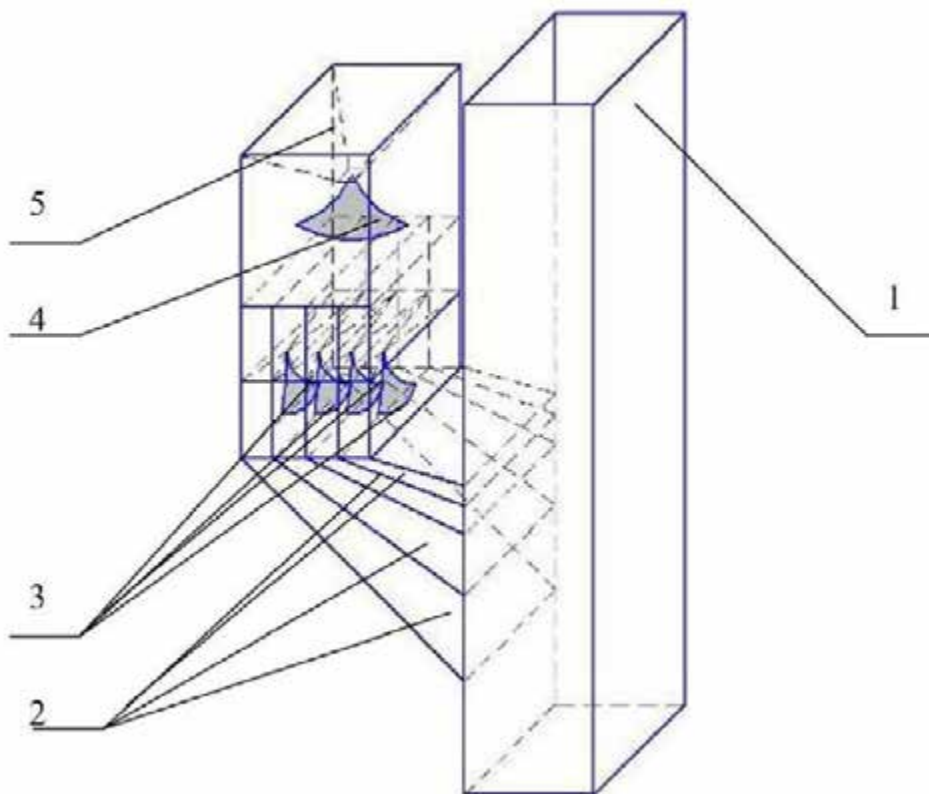
Серед основних переваг запропонованого технічного рішення можна виділити підвищення якості сортування зернового вороху та зменшення втрат повноцінного зерна, яке раніше виводилось у відходи разом із легковаговими домішками.

Разом з тим, застосування робочої камери запропонованої форми при збільшених обсягах подачі матеріалу може призводити до її повного заповнення, внаслідок чого зерновий ворох рухатиметься вздовж стінки вертикального пневмосепаруючого каналу. Такий характер руху може спричинити додаткові втрати зерна, оскільки частина його потраплятиме до легковагової фракції.

Під час наукових досліджень також було розглянуто проблему звантаження зернового вороху на протилежну від зони подачі стінку пневмоканалу (при самопливному введенні). У зоні завантаження відзначалося різке зростання швидкості повітряного потоку, викликане зменшенням ефективної глибини пневмоканалу, що, у свою чергу, призводило до виносу повноцінного зерна в легку фракцію і, як наслідок, до втрат продуктивного матеріалу.

Одним із перспективних технічних рішень є конструкція введення зернового вороху у вертикальний пневмосепаруючий канал, представлена на рис. 1.16. Суть конструкції полягає у попередньому розподілі зернового вороху на декілька окремих потоків за допомогою приймально-розподільчого пристрою. Після цього розділені шари зерна спрямовуються в пневмоканал по декількох скатних поверхнях, розташованих на різній висоті й під різними кутами. Така організація подачі забезпечує рівномірний розподіл матеріалу по глибині пневмосепаруючої зони та рівномірність швидкостей зернових потоків.

За результатами експериментальних досліджень конструкції, ефективність сепарації (E) склала від 86,8% до 93,8%, а чіткість розділення (z) – у межах 7,9–3,3%, що свідчить про високу результативність застосованого технічного



рішення.

Рис. 1.16 – Схема пневмосепаратора із запропонованим пристроєм живильника: 1 – прямокутний пневмосепаруючий канал; 2 – скатні лотки; 3, 4 – розподільники вертикальних відсіків; 5 – бункер

Випробування описаного пневмосепаратора дали такі результати:

- ефективність очищення 86,8...93,8%;
- продуктивність пневмосепаратора розробленої конструкції збільшена на 15...25% на відміну аналогів.

Використання живильників, які забезпечують рівномірне подавання та розподіл зернового вороху в робочій зоні сепарації, дозволяє підвищити продуктивність вертикального пневмосепаруючого каналу, зберігаючи при цьому необхідний рівень ефективності очищення.

Аналіз наукових робіт у сфері пневмосепарації свідчить, що сучасний розвиток вертикальних пневмоканалів пов'язаний із вдосконаленням систем живлення, які здатні забезпечити рівномірний розподіл зернового матеріалу в об'ємі пневмосепаруючої зони.

Запровадження живильного пристрою, який дозволяє рівномірно подавати зернову суміш по всій площі поперечного перерізу аспіраційного каналу, може призвести до підвищення ефективності пневмосепарації на 12–20%.

Результати досліджень окремих науковців свідчать, що частинки, які потрапляють у пневмоканал без додаткової початкової швидкості, рухаються по прямолінійних траєкторіях у напрямку вгору або вниз відносно точки введення. Водночас інші дослідники аналізували подачу зернового вороху із застосуванням живильних пристроїв, і встановили, що частинки мають початкову швидкість, яка характеризується конкретним значенням та напрямком руху.

У деяких наукових публікаціях вказано, що раціональні параметри подачі зернового матеріалу у вертикальний пневмоканал становлять: швидкість $V = 0,1 \dots 0,3$ м/с при куті нахилу $\alpha = 30 \dots 45^\circ$.

Крім того, дослідниками було систематизовано дані щодо ефективності роботи пневмоканалів з різною геометрією поперечного перерізу. Так, при питомому навантаженні на канал до 3,5–4 кг/(см·год), висхідний повітряний потік є більш ефективним у каналах з круглим поперечним перерізом. Однак, при перевищенні цього навантаження кращі результати забезпечують канали прямокутної форми.

У наукових працях відзначають, що якість повітряного очищення зернового матеріалу зростає зі збільшенням тривалості його взаємодії з повітряним потоком та за умов значного розосередження частинок у потоці. Подовжити час взаємодії частинок із висхідним повітряним потоком можна шляхом удосконалення конструкції вертикального пневмоканалу, а забезпечити більші інтервали між частинками вороху – шляхом використання ефективних живильних пристроїв.

У дослідженнях процесу очистки висвітлюються різні підходи до модернізації вертикальних пневмоканалів. Зокрема, наголошується, що подальший розвиток пневмосистем тісно пов'язаний із впровадженням нових

конструкцій приймально-розподільчих пристроїв – таких як вібротки, живильні валики тощо. Ці пристрої сприяють рівномірному розподілу зернової суміші в зоні сепарації, що позитивно впливає на ефективність сортування.

Незважаючи на розбіжності в думках науковців щодо доцільності використання пневмоканалів різної орієнтації (горизонтальних, похилих або вертикальних), більшість фахівців погоджуються з тим, що аспіраційні пневмоканали вертикальної конфігурації мають переваги в контексті точності сепарації. Хоча такі системи вимагають більшої енерговитрати, вони забезпечують вищу якість відділення легких домішок і неповноцінного зерна.

З огляду на вищезазначене, перевагу в очищенні зернового вороху все частіше надають пневмосепаруючим каналам вертикального типу.

Висновки

На основі проведеного аналізу сучасних технологій післязбиральної обробки зерна, конструкцій пневмосистем зерноочисних машин і принципів роботи пневмосепаруючих систем можна сформулювати наступні висновки:

- Фракційна технологія обробки зерна є найбільш перспективною, оскільки забезпечує зменшення інтенсивності механічного впливу на зернівки, що сприяє збереженню їхніх якісних показників;
- Застосування єдиного повітряного потоку, який послідовно проходить через пневмоканали післярешітного та дорешітного очищення разом із відповідними осадковими камерами, дозволяє раціоналізувати витрати енергії в процесі пневмосепарації;
- Основний напрям розвитку систем післярешітного повітряного очищення пов'язаний з удосконаленням механізмів подачі зернового вороху до зони взаємодії з повітряним потоком;
- Використання живильних пристроїв, що забезпечують рівномірний розподіл зернового матеріалу по площі пневмосепаруючого каналу, сприяє підвищенню ефективності пневмосепарації на 15–20%.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗЕРНООЧИСНИЧОЇ МАШИНИ

2.1. Підвищення ефективності післярешітної сепарації

Пневмосепарація зернового вороху у висхідному вертикальному повітряному потоці є складним багатофакторним процесом, у якому траєкторія руху частинок визначається взаємодією багатьох сил. Через велику кількість змінних параметрів повністю врахувати всі чинники у рамках теоретичного аналізу практично неможливо. У зв'язку з цим існуючі математичні моделі опису процесу пневмосепарації базуються на законах класичної механіки, але із застосуванням значної кількості спрощень та припущень. Такий підхід вимагає виконання чисельних розрахунків і значних витрат часу, що нерідко призводить до появи похибок у результатах.

Незважаючи на зазначені обмеження, вченими встановлено основні параметри, що мають найбільший вплив на ефективність пневмосепарації зернового вороху у вертикальному повітряному потоці. З урахуванням відомих теоретичних положень, для математичного моделювання процесу була сформульована система диференціальних рівнянь (2.1), яка описує траєкторію руху частинок зернової суміші в робочій зоні пневмосепаруючого каналу.

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k\dot{x}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \ddot{y} = -k\dot{y}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - g + kV^2 \end{cases}, \quad (2.1)$$

де x та y – переміщення частинки по осях координат, м;

k – коефіцієнт парусності частки, м^{-1} ;

V – швидкість частинки щодо повітряного потоку, м/с.

Для більш точного встановлення параметрів процесу сортування зернової суміші у вертикальному пневмоканалі з висхідним повітряним потоком обчислення виконували із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення.

Чисельне розв'язання відповідної системи рівнянь дозволяє моделювати

траєкторії частинок із різними фізичними характеристиками та початковими умовами введення в повітряний потік.

Варто відзначити, що траєкторії руху частинок у пневмоканалі залежать від їхньої початкової швидкості й можуть мати два основних типи. Перший – це стандартна траєкторія в полі сили тяжіння, другий – траєкторія з відбиванням від протилежної (задньої) стінки каналу.

Алгоритм побудови траєкторій передбачає наступне: Для виділеного з процедури розв'язання рівняння залежності $y(t)$ вирішується рівняння, з якого визначається час польоту T при $y(t) = y_n$, де y_n – вертикальна координата нижньої частини аспіраційного каналу. Якщо $x(T)$ виявляється більше значення горизонтальної координати задньої частини аспіраційного каналу $x_{до}$, то розв'язується рівняння $x(t) = x_k$, з якого визначається час польоту T_1 до задньої частини аспіраційного каналу. Це значення підставляється у функцію $y(t)$ і визначається вертикальна координата точки падання на задню стінку, а також горизонтальна та вертикальна складники швидкості. З цього моменту система (2.1) вирішується заново визначення відбитої траєкторії руху. Початкові параметри польоту у своїй враховують коефіцієнти відображення.

Можливі траєкторії польоту представлені рис. 2.1.

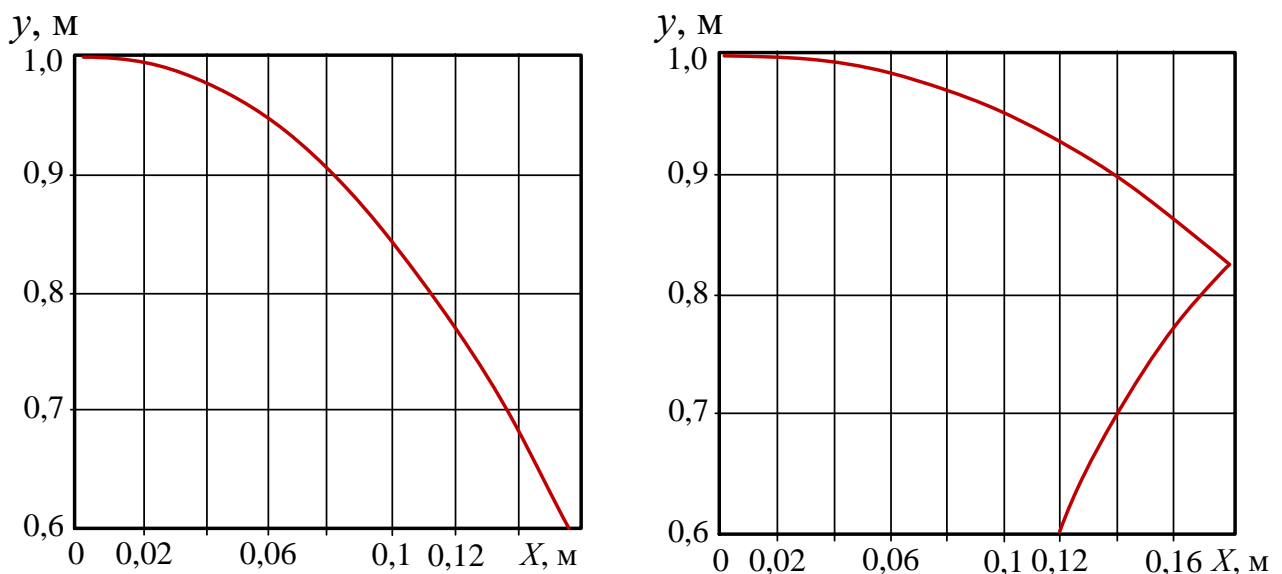


Рис. 2.1 – Траєкторії руху частки у повітряному каналі

Для моделювання процесу пневмосепарації зернового вороху у висхідному повітряному потоці було обрано варіант подачі оброблюваного матеріалу у пневмоканал шляхом його сходження з вібраційної (коливної) площини решета.

Розглянемо абсолютний рух зерна за сепаруючим решетом, що коливається за законом $z = r \sin \omega t$, розташованому під кутом α до горизонту (рис. 2.2).

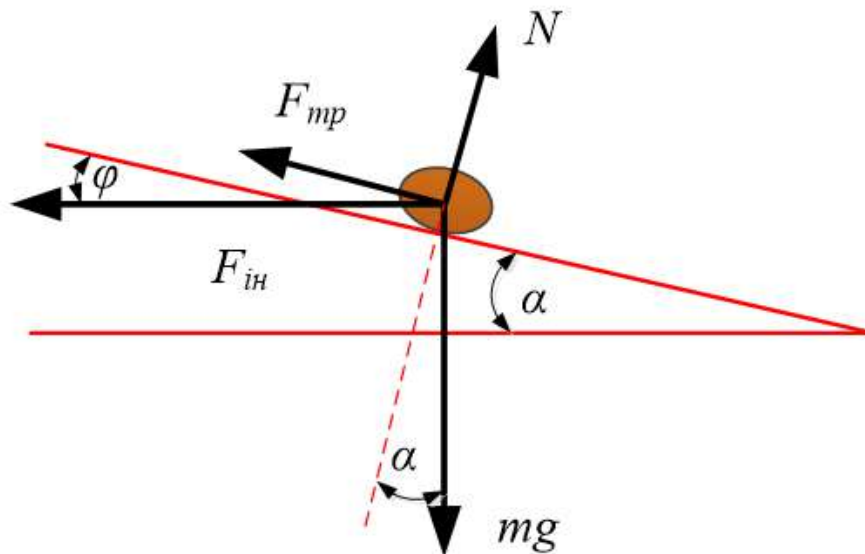


Рис. 2.2 – Схема сил, що діють на частинку під час роботи решета

Чинними силами є: вага mg ;

сила інерції $F_{ин} = mr\omega^2 \sin\omega t$;

нормальна реакція $N = mg\cos\alpha + mr\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha$;

сила тертя $F_{тр} = fN = f(mg\cos\alpha + mr\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha)$.

де: g – прискорення вільного падіння; N – сила нормальної реакції; f – коефіцієнт тертя; m – маса частки зернового вороху; r – радіус кривошипу; ω – кутова швидкість кривошипу; t – час.

Для спрощення розрахунків кут спрямованості коливань ϕ прирівнюємо до кута нахилу решета α .

$$\frac{d(mv)}{dt} = mg \sin\alpha \mp f \left(mg \cos\alpha + mr\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha \right), \quad (2.2)$$

Сформулюємо теорему про зміну імпульсу частинки зернового вороху у проекції на вісь, яка збігається з напрямком її руху. При цьому слід урахувати, що знак сили тертя визначається напрямком відносної швидкості переміщення зернівки. Після диференціювання відповідного виразу отримаємо:

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin\alpha \mp f \left(mg \cos\alpha + mr\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha \right) - \frac{dm}{dt} v, \quad (2.3)$$

У процесі руху по поверхні решета, що здійснює сепарацію, маса зернового вороху змінюється за законом:

$$m = m_0 e^{-\mu x}$$

де m_0 - вихідна маса вороху,

μ – коефіцієнт втрати маси на решеті (аналог коефіцієнта сепарації),

x – координату за напрямом руху.

$$\text{Тоді } \frac{dm}{dt} = -m_0 \mu e^{-\mu x} \frac{dx}{dt} = -m_0 \mu e^{-\mu x} v$$

Підставляючи значення маси та її похідної до рівняння (2.3), отримаємо:

$$\frac{dv}{dt} = g \sin\alpha \mp f \left(g \cos\alpha + r\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha \right) + \mu v^2, \quad (2.4)$$

Додаючи до рівняння (2.4) початкова умова $v(0) = v_0$ отримуємо завдання Коші для звичайного диференціального рівняння першого порядку.

Особливістю цієї задачі є змінність величини нормальної реакції та напрямку дії сили тертя, що залежить від знака відносної швидкості частинок зернового вороху. Тому для її розв'язання доцільно застосовувати покроковий

підхід. Похідну $\frac{dv}{dt}$ представимо у вигляді:

$$\frac{dv}{dt} \approx \frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{h}, \text{ де } h = t_{i+1} - t_i - \text{ крок по часу.}$$

Тоді рівняння (2.4) набуде вигляду:

$$\frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{h} = g \sin\alpha \mp f \left(g \cos\alpha + r\omega^2 \sin\omega t \cdot \sin\alpha \right) + \mu v(t_i)^2, \quad (2.5)$$

а для обчислювального алгоритму:

$$v(t_{i+1}) = v(t_i) + h \left[g \sin \alpha \mp f \left(g \cos \alpha + r \omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha \right) + \mu v(t_i)^2 \right], \quad (2.6)$$

Якщо відносна швидкість зерна $v(t_i) - r \omega \cos \omega t_i > 0$, то рівняння (2.6) прораховується зі знаком «-», інакше – зі знаком «+».

Для розрахунків кутову швидкість прийняли $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$, Порівняну з режимом роботи решітного стану більшості сучасних зерноочисних машин. Нехай радіус кривошипу $r = 0,015 \text{ м}$, кутова швидкість $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$, кут нахилу решета $\alpha = 9^\circ$ крок часу для розрахунку $h = 0,0002 \text{ с}$, коефіцієнт втрати маси на решеті $\mu = 0,25 \text{ 1/м}$, прискорення вільного падіння $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$N = mg \cos \alpha + m r \omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha$$

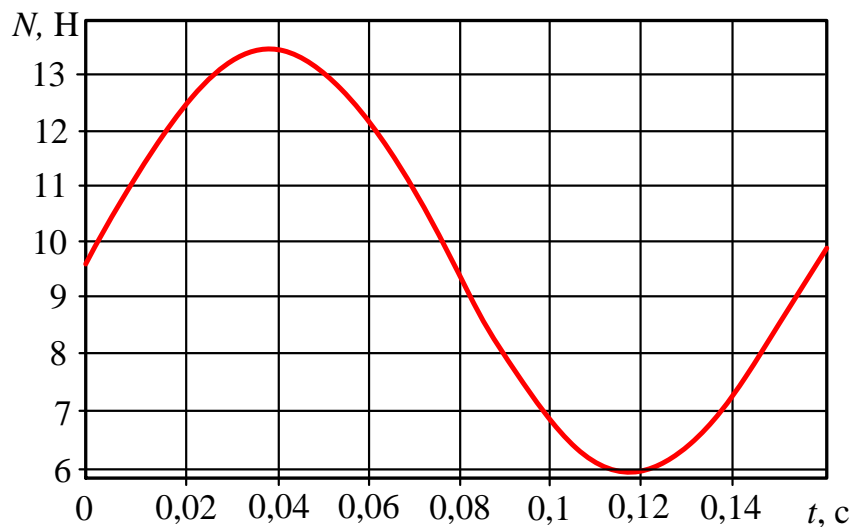


Рис. 2.3 – Зміна нормальної реакції за період коливань

На початку розрахунку визначається величина нормальної реакції (див. рис. 2.3).

Як показано на рисунку, значення нормальної реакції протягом усього руху зернової маси по решітці залишаються додатними, що свідчить про відсутність її відриву від поверхні решітного стану.

Після цього створюється оператор циклу, який разом з умовним оператором, що перевіряє знак відносної швидкості руху, дозволяє поетапно обчислювати абсолютну швидкість переміщення зернового вороху.

На рис. 2.4 представлена залежність абсолютної швидкості іноді при початковій швидкості руху $v(0) = 0,3$ м/с. Як бачимо з цього графіка, через проміжок часу менше 1 секунди характер зміни швидкості стабілізується в діапазоні 0,33-0,5 м/с.

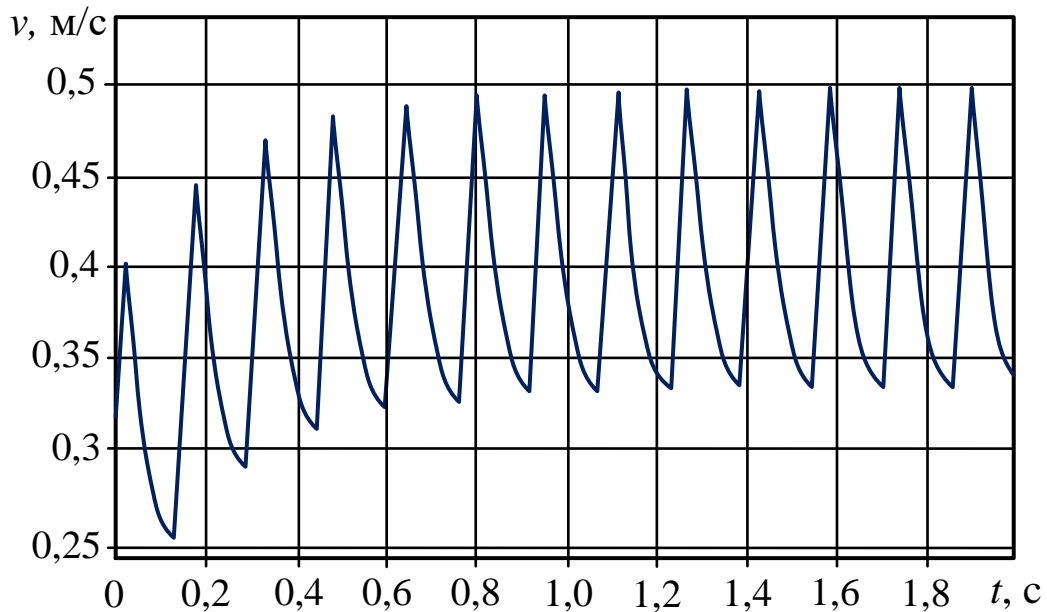


Рис. 2.4 – Залежність абсолютної швидкості руху від часу

Після визначення швидкості переміщення зерна по коливальній решітці як функції часу, ці значення було введено в програмне забезпечення у вигляді діапазону для подальших розрахунків. В результаті чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують політ частинки з урахуванням опору повітря та наявності висхідного потоку зі швидкістю V , були побудовані траєкторії руху частинок у межах швидкостей 0,33–0,5 м/с (рис. 2.5).

На рисунку 2.5 наведено траєкторії частинок із зазначеним діапазоном швидкостей та значенням коефіцієнта парусності в межах 0,07–0,14 1/м за умови, що швидкість висхідного повітряного потоку становить 9 м/с. Розрахунки засвідчили, що частинки з коефіцієнтом парусності понад 0,12 виносяться у верхню частину аспіраційного каналу.

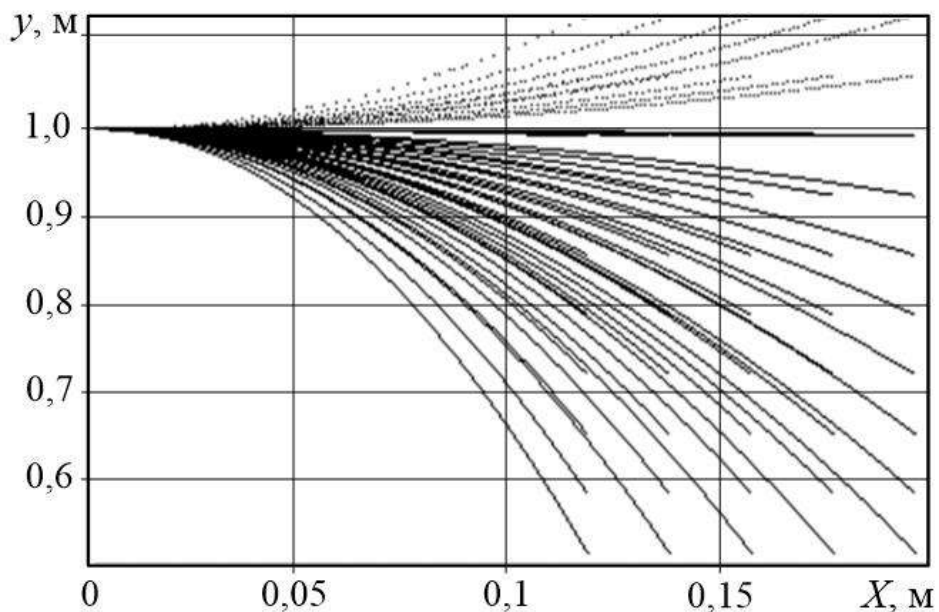


Рис. 2.5 – Політ масиву частинок

На рисунку 2.5 показано, що частинки зернового вороху, які надходять у пневмосепаруючий канал зі сходу з поверхні решета, рівномірно розподіляються лише в тій частині каналу, що знаходиться навпроти точки подачі. У самій же зоні завантаження матеріал потрапляє у канал щільним потоком, схожим на струмінь, який ускладнює роботу висхідного потоку повітря.

З огляду на це можна зробити висновок: для підвищення ефективності пневмосепарації в системах післярешітного повітряного очищення, що використовуються в більшості серійних сепараторів, де зерновий ворох подається на другу аспірацію зі сходу коливальної поверхні, варто забезпечити більш рівномірний розподіл вороху по площі каналу.

Більшість науковців дійшли висновку, що на траєкторію руху частинок у пневмоканалі впливають такі чинники, як парусність елементів суміші, початкова швидкість і кут подачі матеріалу в зону сепарації, а також швидкість висхідного повітряного потоку. Останній показник обмежується якістю оброблюваного зерна і допустимими втратами повноцінного зерна у відходи. Парусність частинок, у свою чергу, визначається складом вороху, на який ми маємо можливість впливати.

Щоб траєкторії частинок заповнювали пневмоканал рівномірно по

глибині, необхідно змінювати один або кілька параметрів введення матеріалу в зону пневмосепарації.

Хоч змінити кут подачі можливо, це може ускладнити процес модернізації вже існуючих машин. Крім того, механізм подачі в такому випадку матиме більш складну конструкцію, що може негативно вплинути на загальну надійність роботи зерноочисної машини.

Щоб досягти більш рівномірного розподілу зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу в системах післярешітної аспірації сучасних зерноочисних агрегатів, варто забезпечити подачу частинок оброблюваного матеріалу в зону сепарації з різною швидкістю, як продемонстровано на рисунку 2.6.

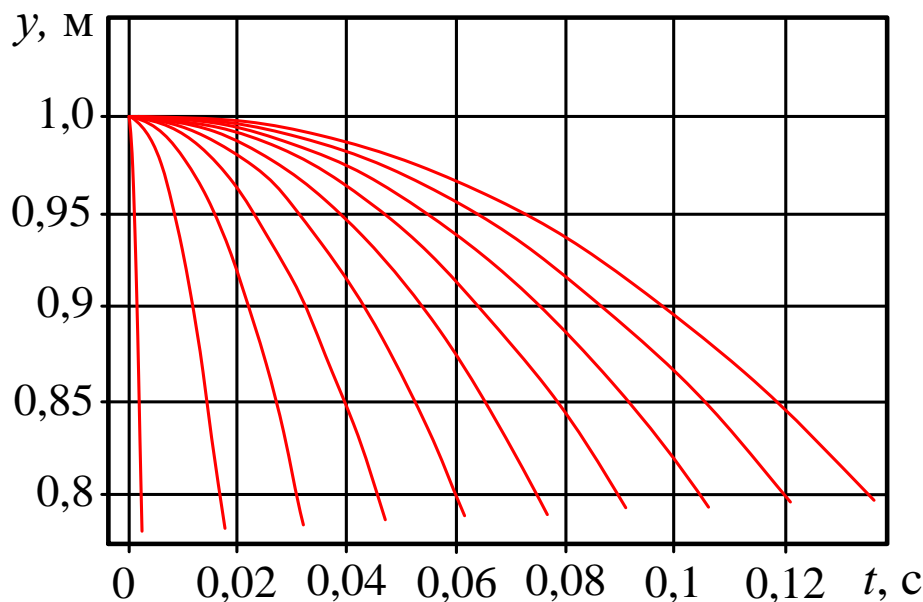


Рис. 2.6 – Розрахункові траєкторії частинок зернового вороху, що подаються в пневмоканал за початкових умов: парусність 0,06, швидкість повітряного потоку 9 м/с, кут введення 9° , початкова швидкість від 0,1 до 0,5 м/с з кроком 0,05 м/с

Передумови підвищення рівномірності розподілу зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу післярешітного очищення

Розглянемо тепер вплив сходинок на характер руху частинок зернового вороху (рис. 2.7) на деякому проміжку часу, що дорівнює періоду коливань. Період коливань становить:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 0.157 \text{ c,}$$

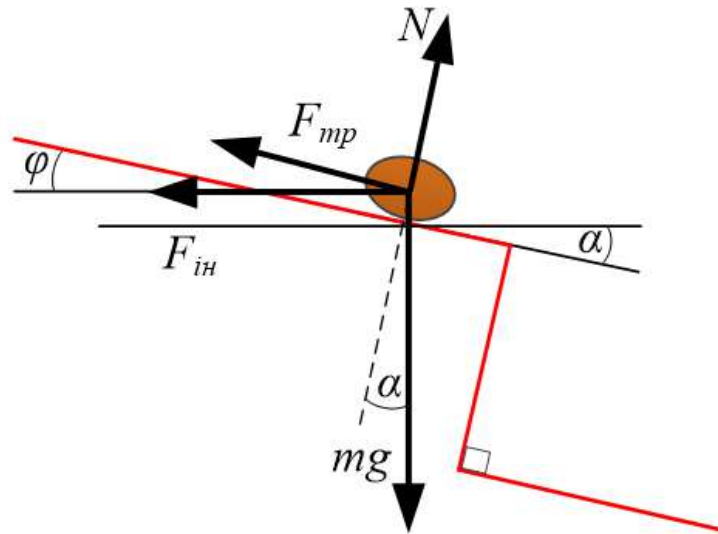


Рис. 2.7 – Рух частинки ступінчастою поверхнею

На рисунку 2.8 показано зміну відносної швидкості руху зернового вороху протягом 0,157 секунди в часовому інтервалі від 2,018 до 2,175 секунди. На початку та в кінці цього інтервалу відносна швидкість дорівнює нулю. Якщо частинка зернової суміші знаходиться на краю сходинки і має від’ємне значення відносної швидкості, то вона не покидає край (рисунок 2.14 а), а продовжує рух по поверхні, подібно до ковзання по гладкому лотку.

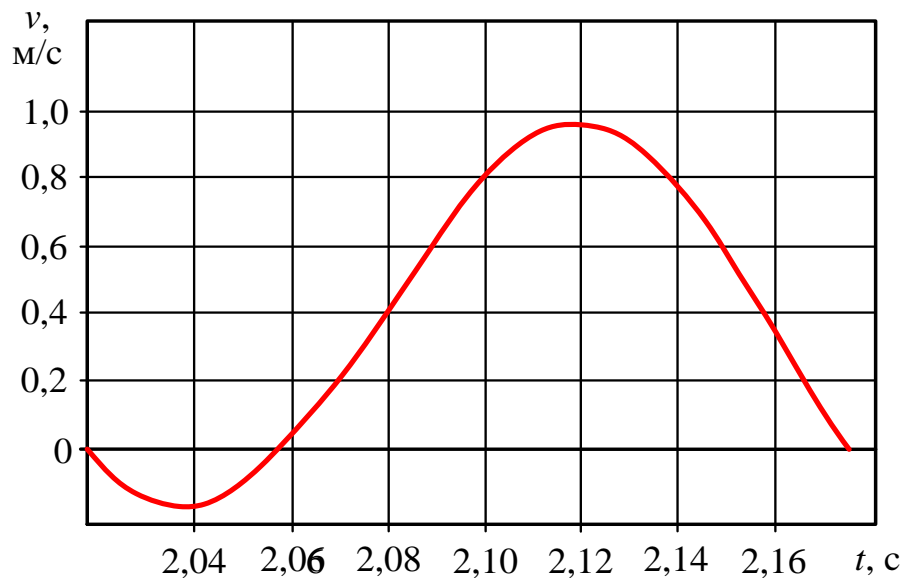


Рис. 2.8 – Відносна швидкість за період коливань

З періоду коливання це становить $2,055-2,018 = 0,037$, або 23,57%.
Починаючи з часу 2,055 з частки злітають з сходинки (рис. 2.9 б).

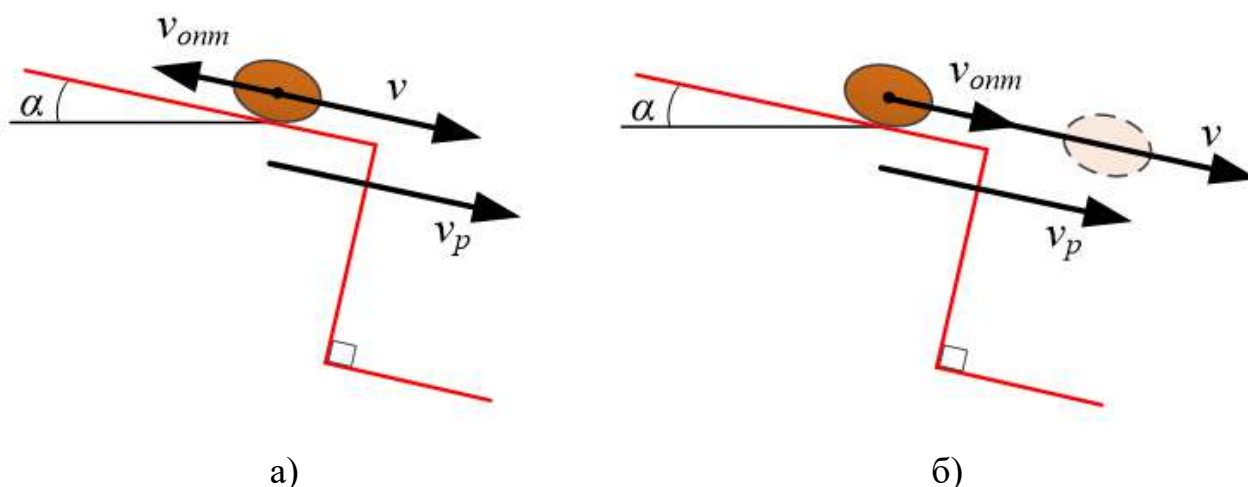


Рис. 2.9 – Рух частки зернового вороху ступінчастою поверхнею

Розташуємо вісь x за напрямом відносного руху зернової маси, а вісь y неї перпендикулярно. Використовуючи систему рівнянь польоту частки

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k\dot{x}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \ddot{y} = -k\dot{y}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} - g \end{cases}, \quad (2.1)$$

перетворимо її на систему відносного руху. Проекції абсолютних швидкостей на осі координат видаються у вигляді:

$$\dot{x} = \dot{x}_{омн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha, \quad \dot{y} = \dot{y}_{омн} - r\omega \cos \omega t \cdot \sin \alpha$$

Проекції абсолютних прискорень на осі координат матимуть вигляд:

$$\ddot{x} = \ddot{x}_{омн} - r\omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \alpha, \quad \ddot{y} = \ddot{y}_{омн} + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha$$

Тоді рівняння польоту набуде вигляду:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{омн} - r\omega^2 \sin \omega t \cdot \cos \alpha = -k(\dot{x}_{омн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha) \cdot \\ \cdot \sqrt{(\dot{x}_{омн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha)^2 + (\dot{y}_{омн} - r\omega \cos \omega t \cdot \sin \alpha)^2} + g \sin \alpha \\ \ddot{y}_{омн} + r\omega^2 \sin \omega t \cdot \sin \alpha = -k(\dot{y}_{омн} - r\omega \cos \omega t \cdot \sin \alpha) \cdot \\ \cdot \sqrt{(\dot{x}_{омн} + r\omega \cos \omega t \cdot \cos \alpha)^2 + (\dot{y}_{омн} - r\omega \cos \omega t \cdot \sin \alpha)^2} - g \cos \alpha \end{cases}$$

Початкові умови : $x_{омн}(0) = 0$, $y_{омн}(0) = h$, $\dot{x}_{омн}(0) = v_{омн}$, $\dot{y}_{омн}(0) = 0$.

Чисельне розв'язання поставленої задачі дало змогу порівняти відносні координати та швидкості руху частинок зернового вороху з їхніми відносними і переносними швидкостями протягом одного циклу коливання.

На основі отриманих результатів можна припустити, що існуючий діапазон швидкостей руху частинок зернового вороху по решеті серійної зерноочисної машини, який становить 0,3–0,53 м/с, може бути розширений завдяки проходженню ділянки з уступами. При цьому максимальна швидкість частинок буде обмежена максимальною лінійною швидкістю решета, яка в більшості сучасних машин наближається до 0,6 м/с. Мінімальна ж швидкість може знижуватись до нуля, однак для розрахунків прийнято значення 0,1 м/с.

Після визначення швидкостей, з якими зерно сходить зі ступінчастого коливального лотка, ці значення у вигляді діапазону були введені в програму «Політ масиву», де проведено обчислення. У результаті чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь 2.1, що описують політ частинки з урахуванням опору повітря при наявності висхідного потоку повітря зі швидкістю 9 м/с, були побудовані траєкторії руху частинок у межах швидкісного діапазону 0,1–0,6 м/с (рис. 2.10).

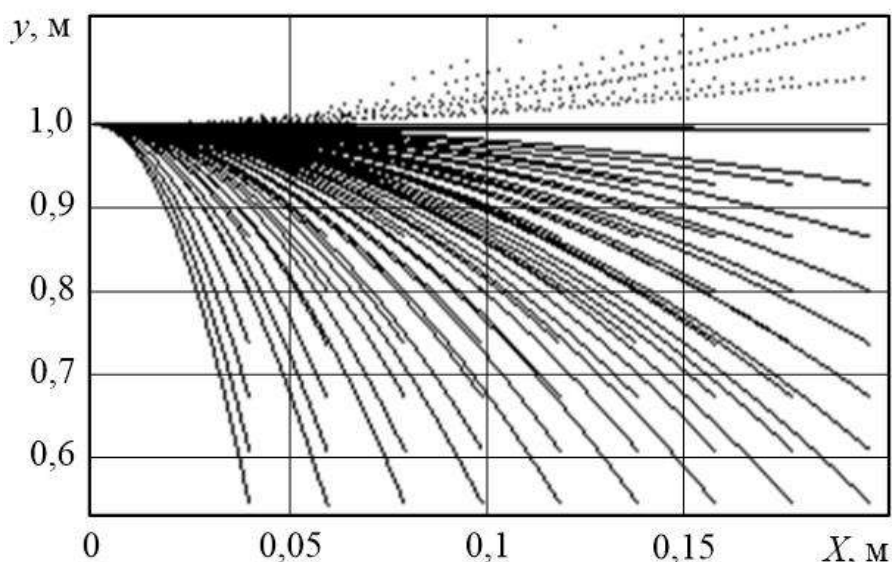


Рис. 2.10 – Політ частинок на початкових швидкостях 0,1 – 0,6 м/с

Як видно з рисунка 2.10, частинки, які надходять у пневмосепаруючий канал зі ступінчастої поверхні, за початкових умов, наближених до реальних, практично повністю заповнюють об'єм каналу післярешітної аспірації. Проте

рівномірність розподілу матеріалу в каналі можна оцінити лише візуально, що ускладнює безпосереднє порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

Для забезпечення можливості такого порівняння, на наступному етапі буде розглянуто розподіл зерна в нижній частині аспіраційного каналу при використанні гладкого сепаруючого решета, змодельованого за допомогою програми. У моделюванні використовується подвійний цикл, в якому змінюються коефіцієнти парусності в діапазоні від $0,06 \text{ м}^{-1}$ до $0,13 \text{ м}^{-1}$, а також швидкості руху частинок від $0,3$ до $0,5 \text{ м/с}$. Далі розраховуються траєкторії польоту з урахуванням можливих відбиттів частинок.

Основу каналу поділено на N сегментів, кожному з яких присвоєно лічильник S_i , що фіксує кількість частинок, які потрапили в відповідну зону. Отримані дані підсумовуються та виводяться у вигляді графіка з відсотковим представленням. На рисунку 2.11 представлено графік розподілу частинок по дну аспіраційного каналу шириною 18 см .

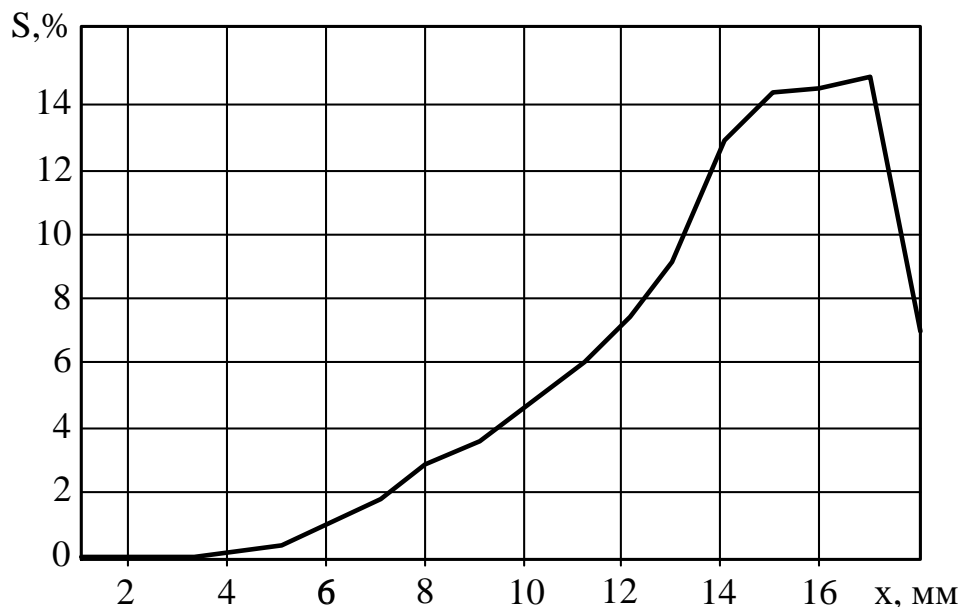


Рис. 2.11 – Теоретичний розподіл зерна в пневмоканалі при сході з гладкого лотка

Відзначимо, що швидкість висхідного потоку повітря впливає не тільки на фракційну складову видувних елементів зернового вороху, але і на конфігурацію зони розташування фракції, що не видується. На рис. 2.12 представлені графіки розподілу частинок на підставі аспіраційного каналу шириною 18 см .

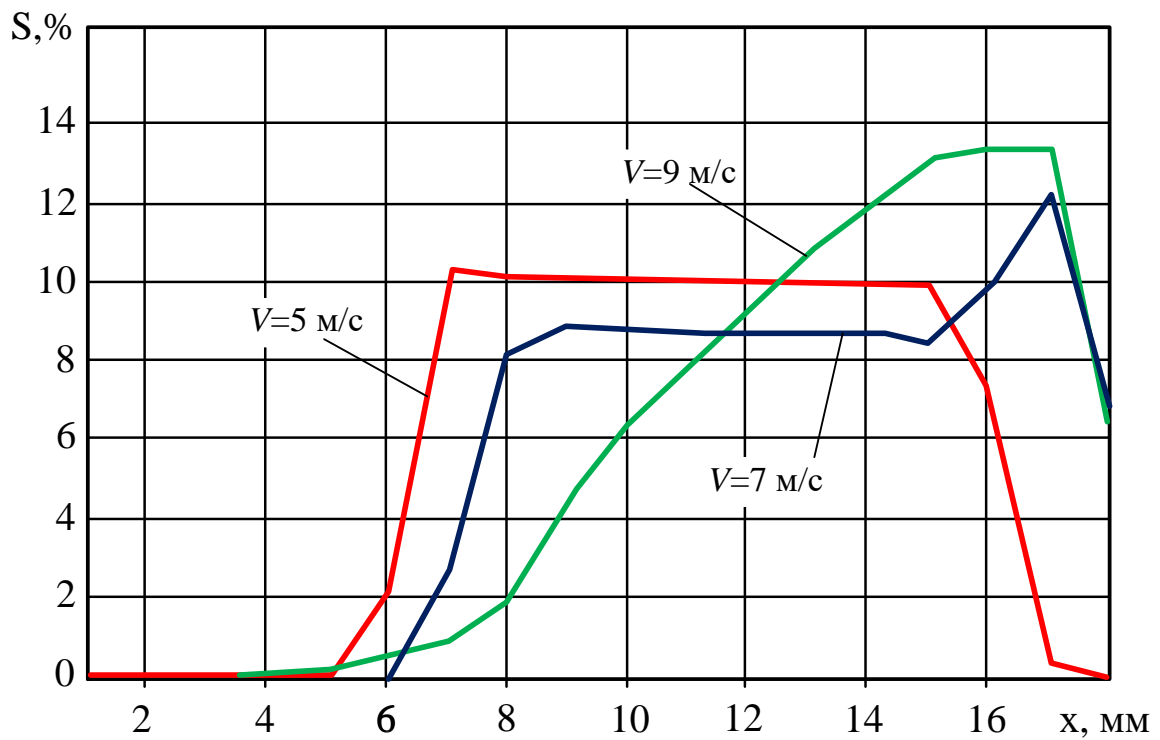


Рис. 2.12 – Залежність розподілу зерна у пневмоканалі при сході з гладкого лотка

Основа пневмоканалу поділяється на N рівних проміжків, кожному з яких відповідає лічильник S_i , що фіксує кількість частинок, які потрапили у відповідну зону. Після завершення підрахунку результати узагальнюються і подаються у відсотковому вираженні на графіку.

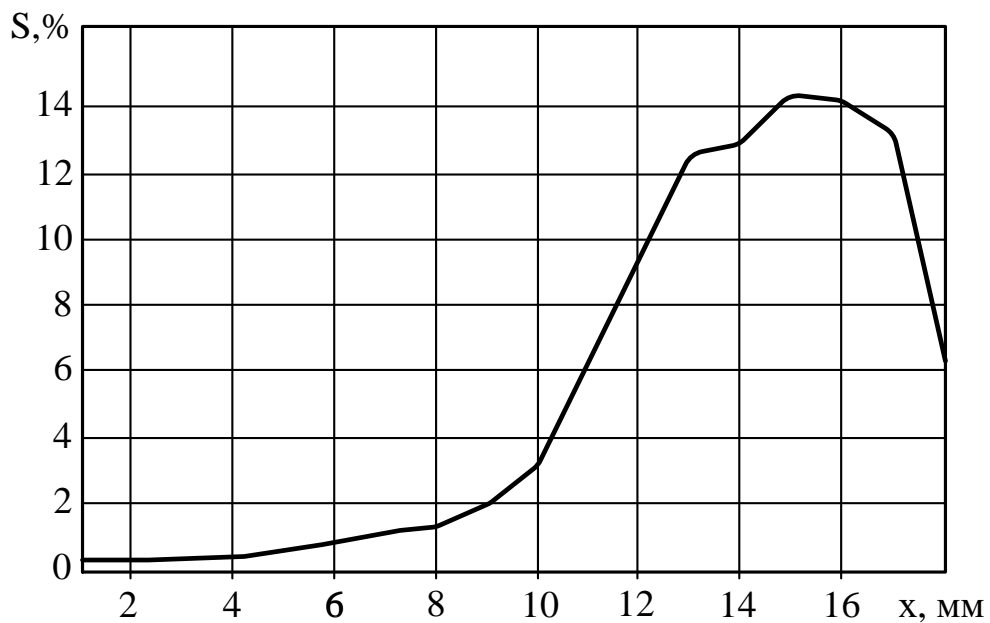


Рис. 2.13 – Теоретичний розподіл зерна у пневмоканалі при сході зі ступінчастого лотка

На рисунку 2.13 представлено графік розподілу частинок по ширині аспіраційного каналу, що має ширину 18 см, при розбитті основи на 18 інтервалів.

Як видно з графіка на рис. 2.13, розподіл зернової маси в основі аспіраційного каналу при ступінчастому лотку більш рівномірно, ніж при використанні гладкого лотка. Це відбувається через збільшення розкиду значень швидкостей сходу з лотка. Конкретні значення висоти та довжини сходинки слід вибирати експериментально.

Висновки

1. Результати моделювання показали, що швидкість частинок зернового вороху, які сходять із поверхні, що коливається разом із решітним блоком повітряно-решітної зерноочисної машини, знаходиться в межах 0,3–0,5 м/с. Такий діапазон початкових швидкостей є недостатнім для забезпечення рівномірного завантаження вертикального пневмосепаруючого каналу по всій його глибині.

2. Для досягнення оптимальних швидкостей руху частинок, які сприятимуть рівномірному заповненню пневмоканалу зерновим ворохом, необхідно змінити геометрію подаючої поверхні.

3. Додавання сходинки на коливальну поверхню порушує суцільність потоку матеріалу, що сприяє покращенню рівномірності розподілу частинок по площині пневмосепаруючого каналу. Зокрема, 23,6% частинок зберігають свою початкову швидкість, 51% – зменшують її після проходження сходинки, а решта набуває швидкості, що відповідає максимальній швидкості коливання сходинки. Такий розкид швидкостей у межах 0,1–0,6 м/с при завантаженні вороху за допомогою живильника з уступчастою поверхнею забезпечує більш рівномірний розподіл матеріалу в каналі порівняно з подачею по гладкій похилій площині.

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

З огляду на поставлені дослідницькі завдання, результати аналізу наукових джерел, теоретичних передумов і проведеного моделювання, сформовано таку програму експериментальних досліджень:

- здійснити експериментальне дослідження просторового розподілу зернового вороху у поперечному перерізі вертикального каналу пневматичної системи з метою верифікації результатів комп'ютерного моделювання;
- визначити закономірності розподілу швидкостей повітряного потоку в поперечному перерізі вертикального пневмосепаруючого каналу, що забезпечує ефективне розділення суміші;
- провести експериментальну оцінку конструктивних і режимних параметрів живильного механізму та науково обґрунтувати їх оптимальні значення з урахуванням умов експлуатації;
- дослідити вплив маси зернового вороху на аеродинамічний опір пневматичної системи та проаналізувати питомі енергетичні витрати, пов'язані з її функціонуванням.

3.2. Експериментальна установка та обладнання

Для реалізації експериментальної частини дослідження була сконструйована спеціалізована лабораторна установка, яка моделює роботу пневматичної системи із комбінованим обслуговуванням післярешітної та дорешітної аспірації за допомогою єдиного повітряного потоку. Принципова технологічна схема функціонування установки представлена на рисунку 3.1.

До складу лабораторної установки входять система аспірації, решітний стан та відцентровий вентилятор, змонтовані на загальній рамі. Аспіраційна система включає вертикальний пневмоканал післярешітного очищення, горизонтальний пневмосепаруючий канал для першої стадії аспірації, дві осадові

камери та повітропровід.

Зерновий ворох, який підлягає очищенню, надходить з бункера до каналу дорешітної аспірації за допомогою завантажувального пристрою. Осадова камера дорешітної аспірації, розташована на виході з відповідного пневмоканалу, обладнана регулювальним клапаном, що дозволяє контролювати обсяг компонентів, які виносяться у цю камеру. Канал дорешітного очищення об'єднує в єдину послідовну систему осадові камери першої та другої аспірації, всмоктуючий повітропровід та вентилятор.

Зовнішнє повітря надходить через канал післярешітного очищення (поз. 7), далі проходить через осадову камеру (поз. 10), горизонтальний канал дорешітної аспірації (поз. 8) та двосекційну осадову камеру (поз. 9), після чого через всмоктуючий повітропровід потрапляє до вентилятора (поз. 6). Канал післярешітного очищення оснащено оглядовим вікном, а введення матеріалу в цей канал відбувається через завантажувальне вікно по лотку живильника, конструктивно з'єднаного з решітним станом.

Ширина пневмосистеми установки становить 0,3 м, тоді як інші її габаритні характеристики відповідають параметрам повномасштабної зерноочисної машини, яка оснащена одним двоярусним решітним станом із трьома послідовно встановленими решітами довжиною по 0,99 м кожне. Робота лабораторної установки здійснюється відповідно до технологічної схеми, наведеної на рисунку 3.1.

Зерновий ворох для обробки з бункера 1 подається в горизонтальний пневмоканал першої аспірації 3, вкидаючим пристроєм 2. У каналі 3 повітря, забране з атмосфери каналом другої аспірації 8, виносить з оброблюваного матеріалу пил і легкі частинки в осадову камеру 5. Далі зерновий ворох уловлюється розподільчим клапаном 6 і направляється на решітний стан. Пройшовши очищення від великих і дрібних домішок на колосовому 14 і підсівному 15 решетах, зерновий ворох направляється на сортувальні решета 18,19 і 20, де зерновий ворох поділяється на основну і фуражну фракції. Пройшовши обробку на решітному стані, матеріал, що очищається,

направляється в канал другої аспірації 8 по живильному лотку 22. Там з вороху довідляються залишки легковагових домішок і неповноцінні зернівки, які висхідним повітряним потоком виносяться в осадову камеру післярешітної очистки 10. Вивільнення від домішок і повноцінного зерна основна фракція виводиться у збірник очищеного зерна 23.

Сортувальні та підсівні решета мають кулькову очистку, яка дозволяє уникнути забивання щілин решета та забезпечує якісну сепарацію. Зерно фуражної фракції, виділене сортувальними решетами, виводяться у свої збірники за спеціальними відводами 21. Виділені з вороху великі домішки виводяться по зернопроводу 16. Дрібні домішки надходять в окремий збірник через вивід 17.

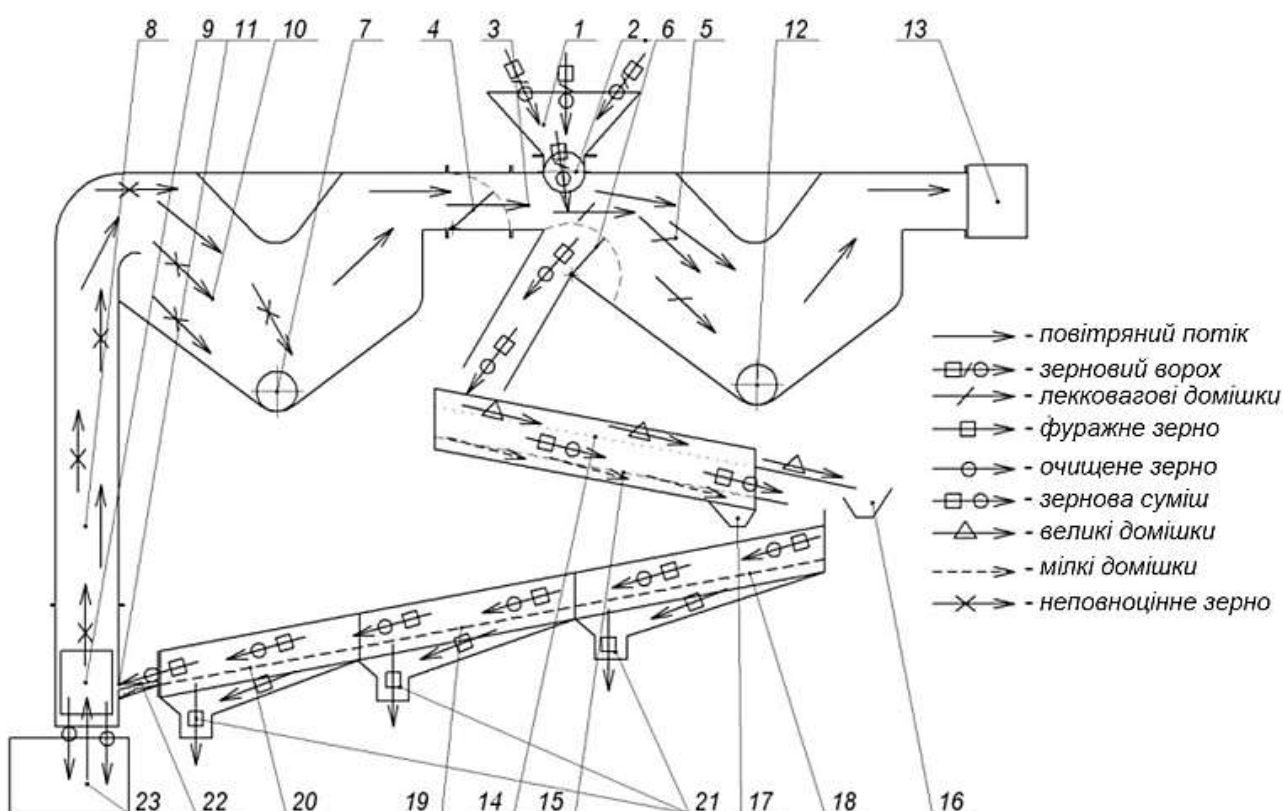


Рис. 3.1 – Технологічна схема роботи лабораторної установки повітряно-решітної зерноочисної машини:

1 – завантажувальний бункер; 2 – живильна котушка; 3 – канал першої аспірації; 4 – повітряна заслінка каналу першої аспірації; 5 – осадова камера каналу першої аспірації; 6 – калібрувальна заслінка; 7,12 – виведення легковагових домішок; 8 – канал другої аспірації; 9 – оглядове вікно у зоні сепарації; 10 – осадова камера другої аспірації; 11 – вікно завантаження каналу другої аспірації; 13 – вентилятор повітряної системи; 14 – колосове решето; 15 – підсівне решето; 16 – виведення великих домішок; 17 – виведення дрібних

домішок; 18 – перше сортувальне решето; 19 – друге сортувальне решето; 20 – третє сортувальне решето; 21 – виведення фуражного зерна; 22 – лоток живильника; 23 – збирання очищеного зерна

З метою забезпечення широких можливостей для проведення комплексних експериментальних досліджень у конструкції лабораторної установки передбачено низку регулювальних механізмів. Зокрема, реалізовано можливість зміни положення калібрувальної заслінки, коригування швидкості подачі та місця введення зернового вороху в канал дорешітного очищення, регулювання швидкості повітряного потоку в аспіраційних каналах, а також варіювання частоти коливань решітного стану. Крім того, конструкція установки дозволяє змінювати положення решіт у межах решітного блоку.

На рисунку 3.2 представлено схему нижньої ділянки вертикального пневмосепаруючого каналу післярешітного очищення, який є складовим елементом експериментальної установки.

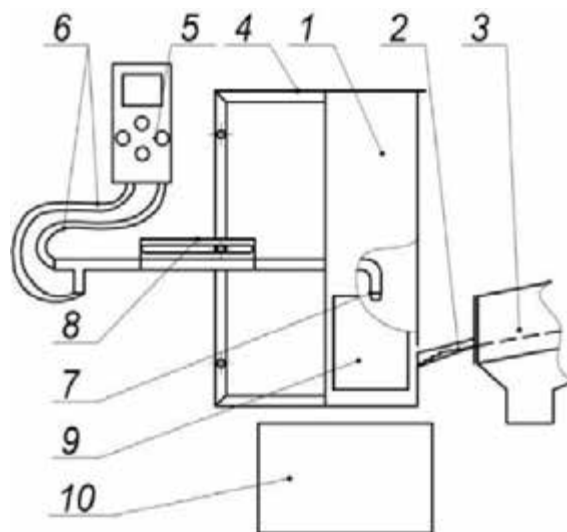


Рис. 3.2 – Схема нижньої частини каналу післярешітного очищення з пристроєм для вимірювання характеристик повітряного потоку:

1 – вертикальний пневмоканал; 2 – лоток живильника; 3 – решітний стан; 4 – утримуюча рамка; 5 – прилад вимірювання швидкості повітряного потоку; 6 – силиконові шланги; 7 – трубка Піто; 8 – фіксатор трубки Піто; 9 – оглядове вікно; 10 – бункер для збирання обробленого матеріалу

У каналі післярешітної аспірації встановлено трубку Піто та багатофункціональний вимірювальний прилад Testo для фіксації параметрів

повітряного потоку в пневмоканалі. Конструкція системи передбачає можливість змінювати висотне та глибинне положення точок вимірювання, що дозволяє детально дослідити характеристики руху повітря в межах каналу.

Вимірювання швидкості повітряного потоку у післярешітному каналі здійснювались із використанням трубки Піто (поз. 7 на рис. 3.2), а обробка та виведення результатів здійснювались за допомогою приладу Testo 435-3. Цей пристрій оснащений вбудованим датчиком для визначення диференціального тиску, а також комплектом змінних зондів для різних типів вимірювань. Для зручності користування корпус приладу обладнаний магнітом, що дозволяє фіксувати його на металевих елементах пневмосистеми.

З'єднання трубки Піто (7) з вимірювальним приладом реалізовано за допомогою силіконових шлангів (6). Сама трубка закріплена на утримуючій рамці (4) за допомогою фіксатора (8), що може переміщуватися у горизонтальній площині, забезпечуючи гнучке позиціонування точки виміру по глибині каналу. У корпусі рамки (4) передбачено отвори, які дозволяють встановлювати трубку Піто на різних висотах відповідно до дослідницьких потреб.

Для оцінки впливу ступінчастої поверхні на траєкторію руху зернової маси у пневмоканалі було виготовлено кілька варіантів скатних лотків, представлених на рисунку 3.3.

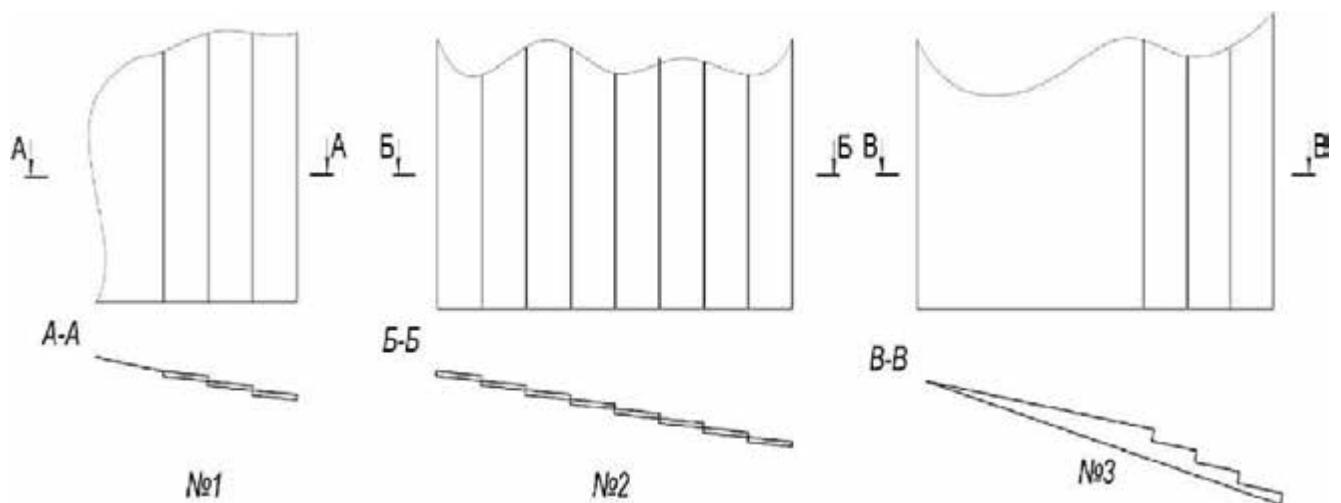


Рис. 3.3 – Схеми змінних скатних поверхонь лотка, що випробовується.

Під час виготовлення зразка №1 на останніх восьми сантиметрах поверхні лотка було сформовано східчасту структуру шляхом послідовного накладання металевих пластин одна на одну з перекриттям 2–3 мм. Для цього

використовували пластини шириною 25 мм і товщиною 2 мм. У результаті утворилася ступінчаста поверхня із сталим нахилом сходинок відносно площини переміщення зернової маси по решітці.

Зразок №2 виготовлявся за аналогічною технологією, однак відмінною рисою є те, що пластини, які формували ступінчасту поверхню, були рівномірно розміщені по всій довжині подаючого лотка, на відміну від локального розташування в зразку №1.

Третій варіант подаючого лотка (зразок №3, див. рис. 3.3) містить три чітко виражені сходинки, розміщені на вході до пневмосепаруючого каналу. На відміну від попередніх зразків, у цьому випадку щаблі виготовлені методом пресування з цільного листа тонколистового металу і розташовані паралельно до площини решіт. Ширина сходинок відповідає ширині пластин у перших двох зразках, тоді як їх висота становить 5–6 мм.

Ширина лотків усіх трьох зразків відповідає ширині пневмоканалу лабораторної установки і становить 0,3 м.

З метою дослідження рівномірності розподілу зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу було виготовлено спеціальний пристрій для відбору проб, конструкція якого зображена на рисунку 3.4.



Рис. 3.4 – Пробовідбірник

Пробовідбірник виготовлено з листового металу та виконано у вигляді

зварної конструкції. Його конструкція являє собою металевий короб без верхньої кришки.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався набір вимірювальних приладів, зокрема: багатофункціональний пристрій Testo 435-3 для визначення параметрів повітряного потоку (швидкість, динамічний, статичний і повний тиск); тахометри DT6236B та ТЧ-10-Р; вологомір для зерна WILE-65; лабораторна вага JW-1 та механічний секундомір.

Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювались із використанням трубки Піто. У кожній точці вимірювання фіксували середнє значення швидкості за інтервал 30 секунд. Виміри проводили у трьох горизонтальних площинах, що знаходились на відстані 100 мм, 350 мм і 600 мм від нижнього краю пневмоканалу.

Зібрані експериментальні дані систематизували в таблиці, після чого виконували їх подальшу обробку та аналіз.

Аеродинамічний опір каналу післярешітної аспірації визначався при різних значеннях питомого зернового навантаження. Вимірювання здійснювались у площині, розташованій на висоті 600 мм від нижньої межі пневмоканалу, оскільки саме на цій висоті повітряне поле характеризується найвищим ступенем однорідності.

Усі вимірювання проводились лише після повного заповнення пневмоканалу зерновим ворохом. Для кожного дослідження визначали середнє значення опору каналу за інтервал 90 секунд. Отримані результати заносили у таблицю, на основі яких будували відповідні графічні залежності.

З метою визначення оптимальних конструктивних параметрів лотка живильника дослідні зразки поверхонь послідовно встановлювали на виході решітного стану. При цьому канал післярешітного очищення тимчасово демонтувався, а через систему пропускали зерновий ворох. У процесі сходу оброблюваного матеріалу з поверхні лотка здійснювали бічну фотофіксацію, що дозволяло візуалізувати траєкторії польоту частинок. Отримані зображення піддавали цифровій обробці, після чого будували графіки, які відображали

траєкторії руху частинок у повітрі.

Для дослідження рівномірності просторового розподілу сипкого матеріалу в поперечному перерізі вертикального пневмосепаруючого каналу використовували спеціально виготовлений пробовідбірник (див. рис. 3.6). З метою визначення розподілу зернового вороху по глибині каналу запускали лабораторну установку та відкривали подачу зернової суміші. Після повного проходження вороху через всі функціональні елементи системи та його накопичення в каналі післярешітного очищення, пробовідбірник короткочасно встановлювали на виході з каналу.

Далі послідовно зважували вміст кожного сектору пробовідбірника, фіксуючи результати в таблиці. Визначення розподілу зернового матеріалу по глибині пневмоканалу проводили при різних режимах продуктивності системи та за умов завантаження двома різними типами скатних поверхонь – експериментальною (з чотирма сходами) та контрольною (гладкою). На основі зібраних даних будували відповідні діаграми розподілу вороху по глибині каналу.

Статистичну обробку експериментальних результатів, а також побудову графічних залежностей здійснювали із використанням програмних засобів STATISTICA 10, Microsoft Excel 2010, Mathcad 14 та інших пакетів прикладного програмного забезпечення.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНООЧИСНОЇ МАШИНИ

4.1. Властивості досліджуваного матеріалу

З метою об'єктивної оцінки результатів експериментальних досліджень було здійснено аналіз вихідного зернового вороху озимої пшениці, зокрема – визначено фракційний склад за товщиною частинок, що входять до складу матеріалу. Окрім того, проведено вимірювання швидкостей витання різних компонентів вороху, що дозволяє оцінити аеродинамічні властивості суміші.

У якості об'єкта дослідження використовували зерновий ворох озимої пшениці сорту «Щедрість одеська» урожаю 2024 року. Узагальнені результати експериментів подано в таблицях 4.1, 4.2, 4.3, а також ілюстровано графічно на рисунках 4.1–4.5.

На рис. 4.1 зображено графік розподілу зернового вороху за фракціями.

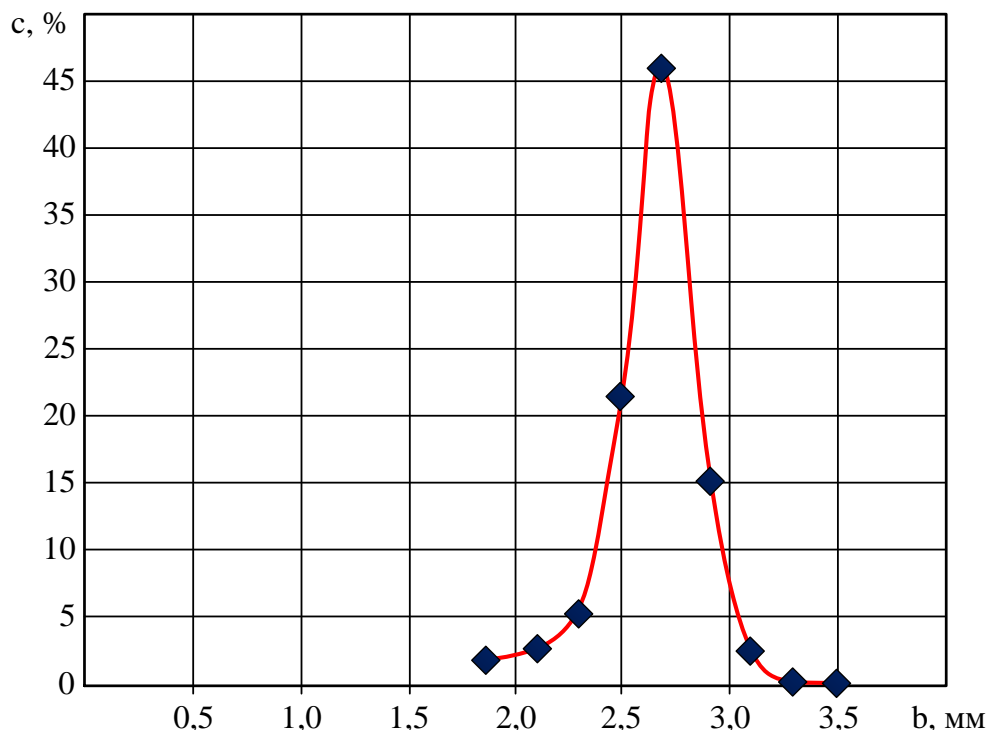


Рис. 4.1 – Розподіл компонентів зернового вороху по фракціях з кроком 0,2 мм

Аналіз даних, поданих на графіку (рис. 4.1), свідчить про зростання

масової частки зернового матеріалу зі збільшенням розміру фракцій до ширини 2,8 мм включно. Сукупна масова частка компонентів з товщиною 2,8; 3,2; 3,4 та 3,6 мм становить близько 17% від загальної маси зернового вороху. Найбільша частка припадає на фракцію з товщиною 2,8 мм, яка охоплює 46,37% загальної маси досліджуваного зразка.

Фракція з розміром 2,6 мм, що, як правило, спрямовується у фураж, становить приблизно 23%. Частка зерен, розміри яких менші за 2,6 мм, не перевищує 16%. Варто зазначити, що графік, наведений на рисунку 4.1, наближено відповідає нормальному закону розподілу, що може бути використано для статистичного узагальнення результатів.

Інформація про вміст окремих компонентів у кожній фракції детально представлена в таблиці 4.1. З аналізу табличних даних випливає, що основний характер масового розподілу зумовлений наявністю цілих зерен, які є переважними у складі вороху. Їхня частка у фракціях з розмірами 2,8 мм і більше становить 40,57% від загальної маси. Основна кількість неушкоджених зернин зосереджена у фракціях розміром 2,6; 2,8 та 3,0 мм.

Таблиця 4.1 – Розподіл компонентів зернового вороху за фракціями

<i>b</i> , мм	<i>m_н</i> , %	<i>P_з</i> , %	<i>P_д</i> , %	<i>P_ш</i> , %	<i>P_п</i> , %	<i>P_н</i> , %	<i>P_о</i> , %	<i>P_с</i> , %	<i>m</i> 1000
< 1,9	5,22	0,15	4,75	0,07	0,12	0,001	0,02	0,14	10,78
1,8	1,63	0,54	0,65	0,35	0,25	0,001	0,001	0,001	16,14
2,2	2,64	1,25	0,26	0,69	0,59	0,02	0,001	0,001	20,78
2,4	5,57	3,12	0,24	1,21	1,04	0,02	0,001	0,001	24,64
2,6	21,71	17,53	0,45	1,93	1,89	0,02	0,02	0,001	28,91
2,8	46,37	40,68	0,65	2,83	2,13	0,19	0,04	0,03	36,91
2,9	15,22	14,05	0,07	0,56	0,52	0,08	0,001	0,001	41,51
3,2	2,37	2,04	0,04	0,09	0,08	0,06	0,001	0,001	41,84
3,4	0,15	0,07	0,02	0,001	0,02	0,04	0,001	0,001	40,89
3,5	0,07	0,04	0,0011	0,001	0,001	0,04	0,001	0,001	39,21

Аналіз фракційного складу зернового вороху показав, що найбільша кількість невимолочених зерен зосереджена у фракції з розміром 2,8 мм. Водночас більшість подрібненого зерна припадає на фракції, розміри яких менші за 2,8 мм. Основна маса мінеральних домішок характеризується розміром, що не перевищує 1,8 мм.

Згідно з даними таблиці 4.1, можна зробити висновок, що при калібруванні

вихідного вороху на решітному стані доцільно використовувати підсівні решета з отворами шириною 2,1–2,3 мм. Такі решета ефективно виділятимуть більшу частину битого зерна та мінеральних включень. Застосування колосового решета в даному випадку є недоцільним, оскільки у вихідному матеріалі відсутні колоски або великі за розміром домішки.

У якості сортувальних решіт доцільно використовувати сита з отворами шириною 2,5–2,9 мм – залежно від подальшого призначення очищеного матеріалу. Для товарного очищення достатньо встановлення решета з розміром отворів 2,5–2,7 мм. Якщо ж метою є підготовка насінневого матеріалу, рекомендовано застосовувати сита з отворами 2,9 мм, оскільки фракція з таким розміром забезпечує масу 1000 насінин на рівні понад 43 грами, що відповідає нормативним вимогам до насінневого матеріалу.

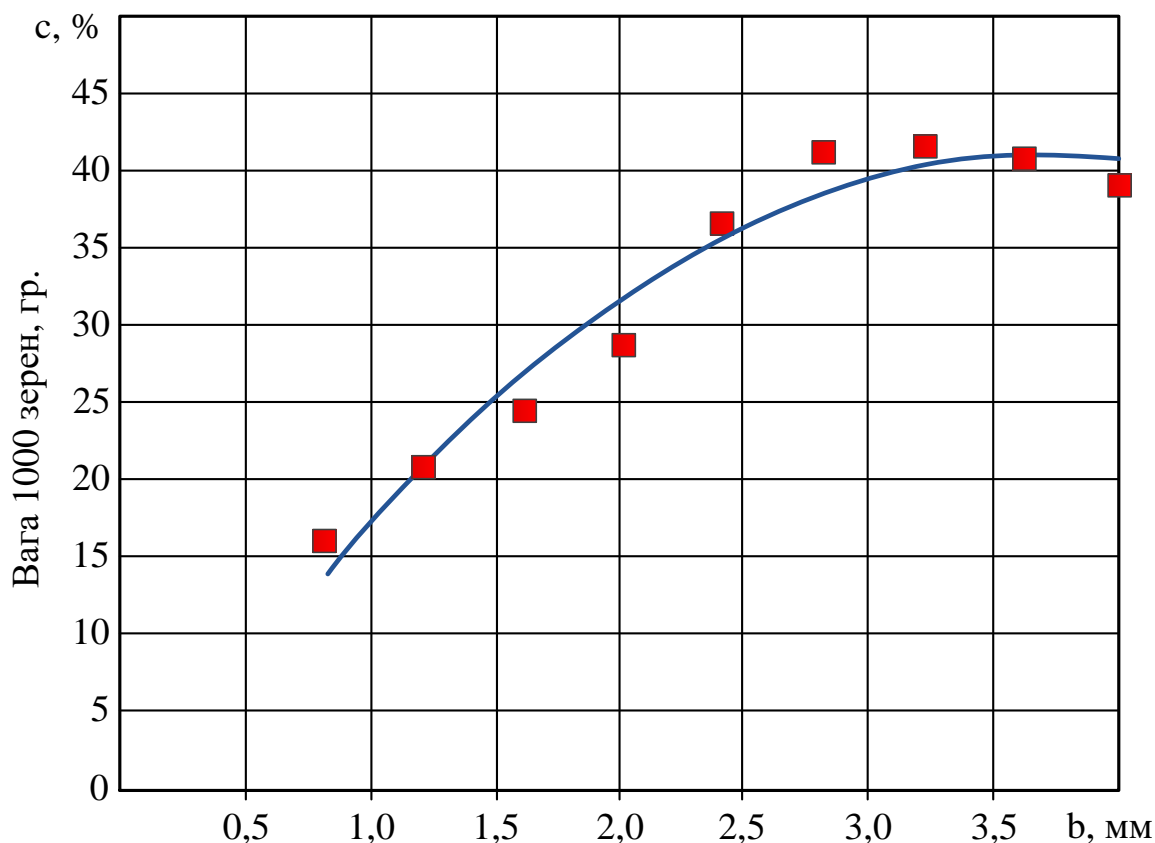


Рис. 4.2 – Залежність маси 1000 насінин від розміру фракції зерна

Залежність маси 1000 насінин від розміру зернин наведена на рисунку 4.2. Як видно з графіка, зі збільшенням розміру зерен маса 1000 насінин зростає, досягаючи максимуму у фракційному інтервалі 2,8–3,2 мм, після чого

спостерігається її зниження. Така тенденція пояснюється зменшенням щільності більших зерен, що, відповідно, знижує їхню масу у перерахунку на 1000 штук. Згідно з даними таблиці 4.1, частка зерна фракції 3,2 мм і більше становить орієнтовно 2,2% від загальної маси вороху. Максимальне значення маси 1000 насінин у досліджуваному зразку становить трохи більше 41 г, що відповідає фракціям розміром 2,8–3,2 мм.

Для визначення аеродинамічних властивостей компонентів вихідного зернового вороху було проведено експериментальні дослідження на вітрильному класификаторі конструкції ВІМ. Основним параметром, що характеризує поведінку частинок у повітряному потоці, виступала швидкість їх витання, яка є функцією парусності елементів суміші.

Розподіл маси зернового вороху за величинами швидкості витання представлено у вигляді графіка на рис. 4.3.

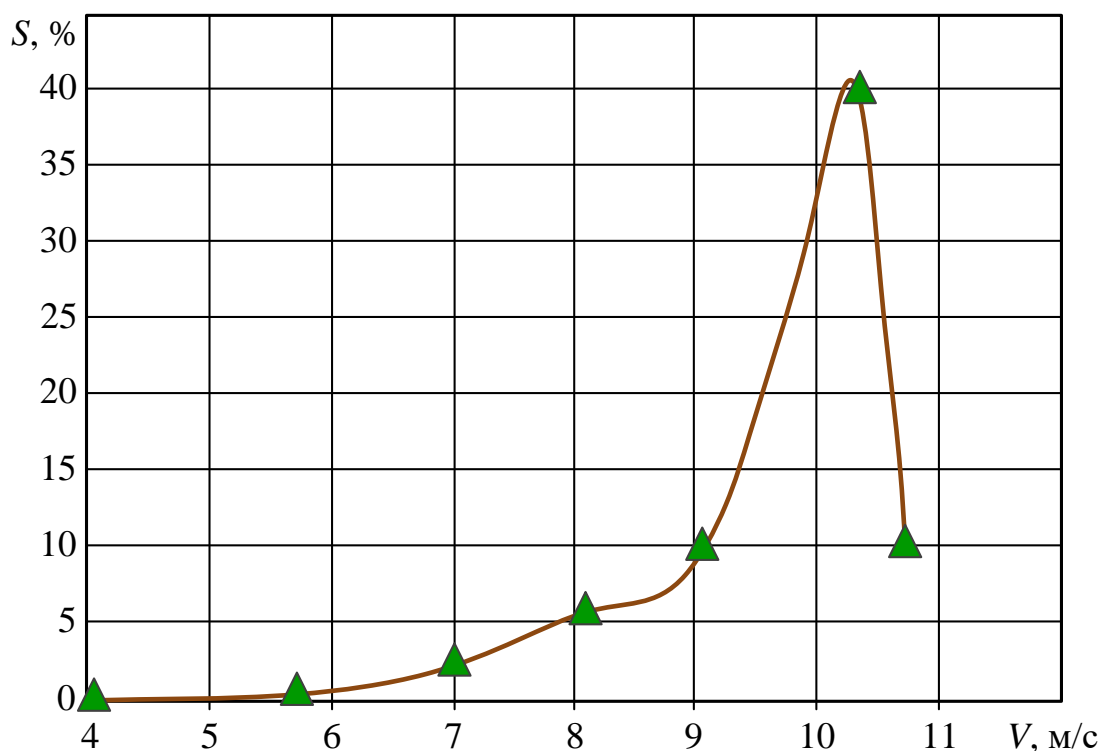


Рис. 4.3 – Розподіл вихідного вороху за швидкостями витання

Аналіз графіка, наведеного на рисунку 4.4, свідчить про те, що розподіл вихідного зернового вороху за швидкістю витання не відповідає нормальному закону розподілу. Натомість отриману залежність можна апроксимувати гамма-розподілом із зворотною шкалою по осі абсцис. Відхилення від нормального розподілу пояснюється присутністю у складі вороху значної частки незернових

компонентів, які мають нижчу аеродинамічну стійкість, а отже – меншу швидкість витання.

Основна маса матеріалу характеризується швидкістю витання в межах 8,5–11,5 м/с, при цьому максимальний вміст частинок реєструється за швидкості повітряного потоку 10,6 м/с. Зернова фракція має швидкість витання, що перевищує 7,6 м/с, тоді як незернові компоненти – такі як лузга, подрібнена солома, фрагменти бур'янів і пил – витають у повітряному потоці зі швидкістю в діапазоні від 4,2 до 8,5 м/с.

На основі аналізу експериментальних даних можна стверджувати, що основна частина дробленого зерна, яка становить близько 7% від загальної маси вороху, виноситься повітряним потоком зі швидкістю трохи вище 8,5 м/с. Практично весь обсяг легких домішок видаляється при швидкості повітряного потоку, що становить близько 9,2 м/с.

Результати аналізу відібраних зразків дозволяють зробити висновок: для ефективного вилучення засмічуючих компонентів із зернового вороху у післярешітному пневмоканалі доцільно підтримувати швидкість повітряного потоку на рівні 9,2 м/с. Однак слід враховувати, що за такого режиму існує ризик втрати частини повноцінного зерна, що також відображено на графіку (рис. 4.4).

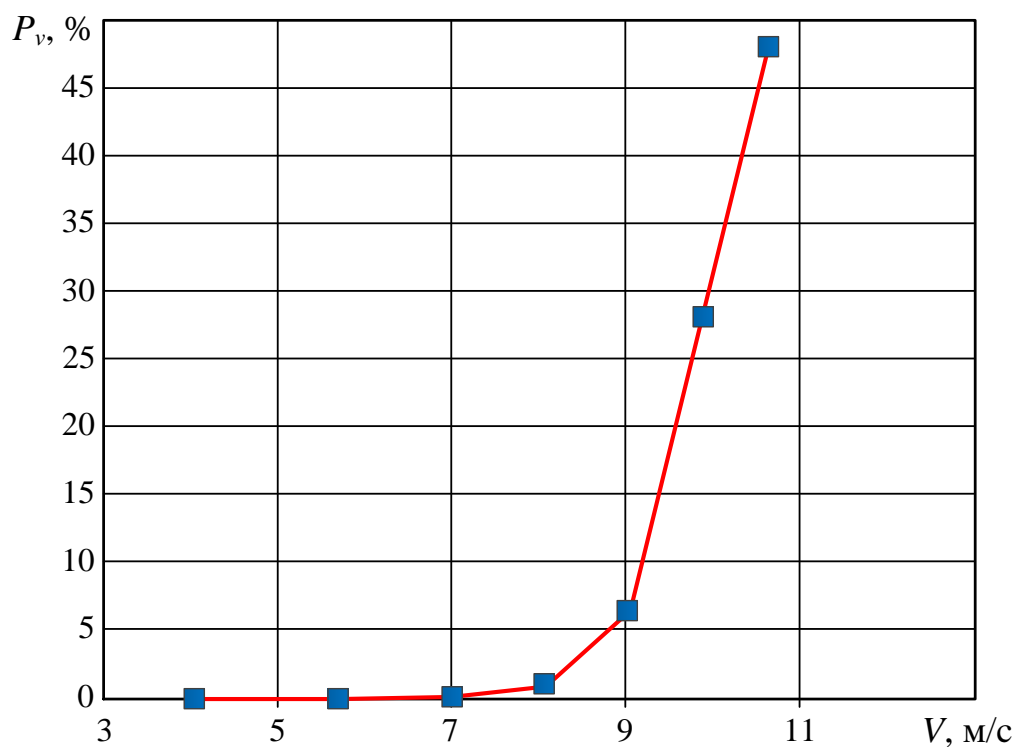


Рис. 4.4 – Розподіл цілого зерна вихідного вороху за швидкостями витання

Попри незначне вилучення цілих зернин повітряним потоком зі швидкістю 9,2 м/с, при підготовці насінневого матеріалу такі втрати не вважаються критичними. Це пояснюється тим, що маса 1000 насінин у вилученій фракції, яка накопичується в осадовій камері, є незначною і не впливає суттєво на якість посівного матеріалу.

На рисунку 4.5 подано графік залежності маси 1000 насінин від швидкості витання. Як видно з графічного матеріалу, зерна, які виносяться повітряним потоком зі швидкістю до 9,2 м/с, мають масу 1000 насінин не більше 26 грамів. Це свідчить про те, що вказана фракція відповідає фуражному зерну, оскільки вона характеризується низькою масою та, відповідно, зменшеним вмістом поживних речовин.

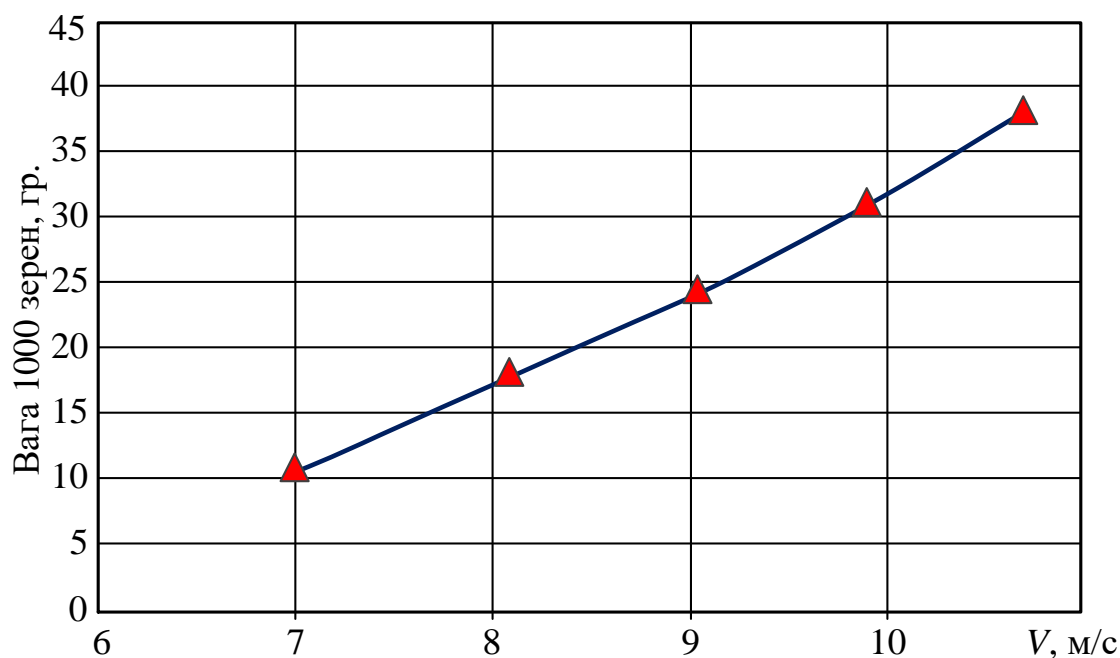


Рис. 4.5 – Залежність маси 1000 насінин від швидкості витання зерна

Для комплексної оцінки ефективності функціонування лабораторної установки, яка моделює роботу високопродуктивної повітряно-решітної зерноочисної машини з двоаспіраційною системою, необхідним є аналіз розподілу зернового вороху як за розмірними фракціями, так і за швидкостями витання.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що зі зростанням лінійних розмірів частинок зернового вороху спостерігається відповідне підвищення швидкості їх

витання. Зокрема, частинки товщиною менше ніж 2,6 мм характеризуються швидкістю витання в діапазоні 7,4–9,8 м/с. Такий розкид ускладнює їх ефективне виділення лише за допомогою одного повітряного потоку.

У складі досліджуваного вороху переважають зерна з товщиною 2,6–2,8 мм, які мають швидкість витання в межах 9,2–10,3 м/с. Частка цілих зерен, що витають зі швидкістю меншою за 9,2 м/с, становить не більше 1% загальної маси. Переважна більшість частинок із такою швидкістю витання – це дроблені зернівки або зерно, ушкоджене хворобами.

Таким чином, можна зробити висновок, що для ефективного вилучення подрібненого та некондиційного зерна з основної фракції вороху доцільно підтримувати швидкість повітряного потоку в каналі післярешітного аспіраційного очищення на рівні не менше 9,2 м/с.

4.2. Розподіл швидкості повітряного потоку

Для оцінки якісних показників функціонування вертикального пневмосепаруючого каналу необхідним є визначення розподілу швидкостей повітряного потоку в його внутрішньому об'ємі. Як зазначалося раніше, вимірювання цього параметра проводилися експериментальним шляхом із використанням багатofункціонального приладу Testo 435 у поєднанні з трубкою Піто відповідно до затвердженої методики.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4.4, свідчить, що незалежно від частоти обертання вентилятора характер просторового розподілу швидкостей повітряного потоку залишається стабільним у межах усіх площин, у яких проводились вимірювання.

З метою візуалізації результатів побудовано діаграму розподілу швидкостей повітряного потоку в пневмоканалі при частоті обертання вентилятора 2194 об/хв, яка представлена на рисунку 4.6.

З діаграми видно, що у площині, розташованій нижче завантажувального вікна, розподіл швидкостей має форму, близьку до нормального. Натомість вище зони завантаження спостерігається зміщення максимальних значень швидкостей у праву частину пневмоканалу. Така асиметрія пояснюється підсмоктуванням

повітря через завантажувальне вікно, що формує бічний тиск на основний повітряний потік.

Унаслідок взаємодії вертикального та горизонтального потоків повітря відбувається зміщення основного потоку в напрямку дії горизонтальної складової, що й спричиняє нерівномірність розподілу швидкостей у верхній частині каналу.



Рис. 4.6 – Діаграма розподілу швидкостей по глибині пневмоканалу в 3-х площинах

Встановлений характер розподілу швидкостей повітряного потоку всередині пневмосепаруючого каналу може негативно впливати на ефективність пневмосепарації у післярешітній системі очищення двоаспіраційної зерноочисної машини.

Зокрема, неповноцінні зерна, які під дією зон із підвищеною швидкістю повітря мають бути вилучені до осадової камери, можуть потрапляти в області пневмоканалу з низькою швидкістю повітряного потоку (наближеною до нуля). У таких умовах вони втрачають підйомну силу, осідають і потрапляють до фракції очищеного матеріалу, погіршуючи його якість.

Крім того, внаслідок нерівномірного розподілу повітряного потоку у каналі формуються зони надлишкових швидкостей. Якщо повноцінне зерно потрапляє в ці зони, воно може бути помилково вилучене разом із легкими домішками, що призводить до підвищених втрат товарного зерна в післярешітній аспіраційній системі.

Для усунення зазначеної проблеми та вирівнювання швидкісного профілю повітряного потоку по всій висоті та глибині вертикального пневмосепаруючого каналу необхідно мінімізувати бічне підсмоктування повітря, яке виникає через завантажувальне вікно. Найбільш ефективним способом є зменшення площі поперечного перерізу завантажувального вікна, що дозволяє частково герметизувати зону подачі зернового матеріалу.

Зменшення цієї площі зазвичай реалізується шляхом регулювання висоти відкриття завантажувального вікна відповідно до продуктивності машини. У більшості сучасних зерноочисних агрегатів застосовуються автоматизовані герметизуючі заслінки, які змінюють висоту завантажувального отвору залежно від висоти шару вороху, що надходить із решітного стану.

У рамках експериментальних досліджень на лабораторній установці було змонтовано регульовану герметизуючу заслінку, призначену для виключення бічного підсмоктування повітря в пневмосепаруючий канал. Після встановлення заслінки проведено повторні вимірювання швидкостей повітряного потоку згідно з раніше описаною методикою.

На основі даних, представлених у таблиці, можна зробити висновок, що застосування герметизуючої заслінки у зоні завантажувального вікна забезпечує вирівнювання швидкісного профілю повітряного потоку всередині пневмосепаруючого каналу. Усунення підсмоктування повітря через завантажувальний отвір спричинило підвищення швидкості повітряного потоку в площині, розташованій нижче рівня подачі зернового матеріалу, що позитивно впливає на ефективність процесу пневмосепарації.

На основі отриманих експериментальних даних була побудована діаграма розподілу швидкостей повітряного потоку (рис. 4.7). Як видно з діаграми, у результаті використання герметизуючої заслінки швидкість повітряного потоку

в нижній площині істотно зростає. При цьому поблизу стінки, розташованої протилежно завантажувальному вікну, утворилася зона зниженої швидкості (приблизно 0,4 м/с), що пояснюється близьким розташуванням приймального бункера до цієї ділянки каналу.

Подальші дослідження засвідчили, що за умови видалення бункера від каналу, відбувається часткове перерозподілення швидкостей у нижній площині, однак загальна картина розподілу повітряного потоку істотно не змінюється.

Також слід зазначити, що зона знижених швидкостей у середній площині зменшилася внаслідок припинення подачі зернового вороху через завантажувальне вікно. Це дозволяє припустити, що навіть за наявності герметизуючої заслінки до каналу все ж надходить певна кількість повітря, що впливає на формування швидкісного поля.

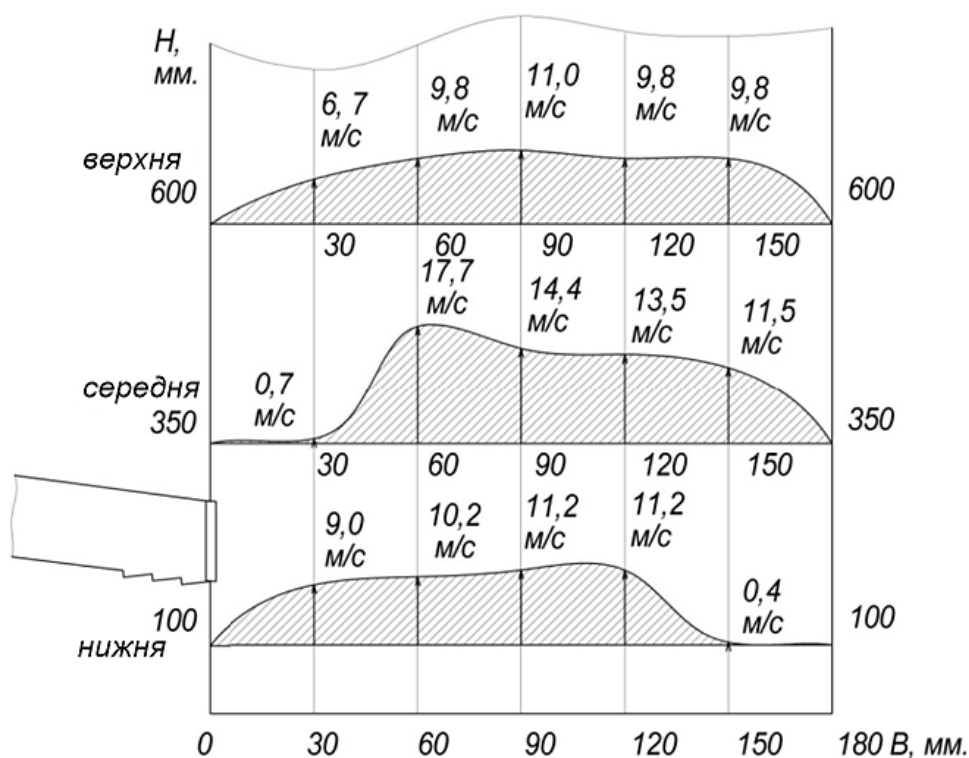


Рис. 4.7 – Діаграма розподілу швидкостей по глибині пневмоканалу в 3-х площинах з використанням герметизуючої заслінки

За умов досягнутого рівня вирівнювання швидкостей повітряного потоку в межах вертикального пневмосепаруючого каналу, можна вважати систему придатною до проведення експериментальних досліджень. Подача зернового вороху в пневмоканал при цьому не супроводжується інтенсивним

підсмоктуванням повітря через завантажувальне вікно, що забезпечує стабільність аеродинамічного режиму та рівномірність розподілу швидкостей повітряного потоку по всьому перетину каналу.

Результати досліджень, спрямованих на аналіз розподілу повітряного потоку по глибині пневмоканалу, засвідчили доцільність обов'язкової герметизації завантажувальних вікон та зон введення елементів живильного пристрою під час експлуатації післярешітної аспіраційної системи універсальних повітряно-решітних зерноочисних машин. Такий підхід дозволяє значно підвищити ефективність використання повітряного потоку у вертикальних пневмосепаруючих каналах, забезпечуючи більш чітке розділення зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями.

4.3. Обґрунтування параметрів живильника

Для визначення оптимальних геометричних параметрів щаблів лотка живильника було виготовлено кілька дослідних зразків скатних поверхонь живильника.

Обробивши фотоматеріали експериментального дослідження, були побудовані траєкторії сходу зернової маси з лотків живильника різної конструкції (рис. 4.8).

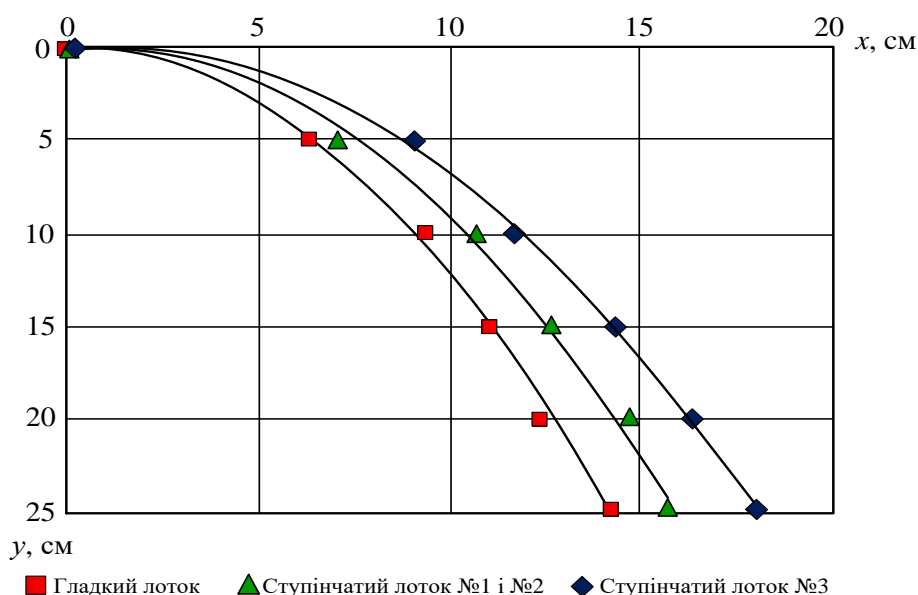


Рис. 4.8 – Траєкторії сходу матеріалу з різних лотків живильника.

На основі аналізу результатів досліджень можна стверджувати, що наявність сходинок на похилій поверхні живильного лотка, який здійснює зворотно-поступальний рух, суттєво впливає на зміну траєкторій польоту частинок зернового вороху, зокрема сприяє збільшенню радіуса кривизни їхнього руху. При цьому встановлено, що траєкторії сходу з лотків зразків №1 та №2 практично збігаються, що свідчить про те, що визначальним чинником впливу на траєкторію є, насамперед, висота сходинок, а не їх кількість.

Найбільше відхилення траєкторії польоту спостерігалось у зразка лотка №3, який має три сходинки висотою по 4 мм. У порівнянні з гладкою (контрольною) поверхнею дальність польоту частинок зросла на 42 мм при фіксованій висоті падіння 255 мм.

Під час побудови траєкторій враховувалися лише ті частинки, які демонстрували максимальну дальність польоту. В усіх серіях експериментів варіації дальності були незначними, що дозволяє вважати результати достатньо сталими. У зв'язку з цим було прийнято рішення провести порівняльний експеримент з оцінки ефективності роботи післярешітної пневмосепараційної системи двоаспіраційної зерноочисної машини за умов подачі матеріалу з двох типів живильних поверхонь – контрольної (гладкий лоток) та експериментальної (лоток зі сходинками, зображений на рис. 4.9).

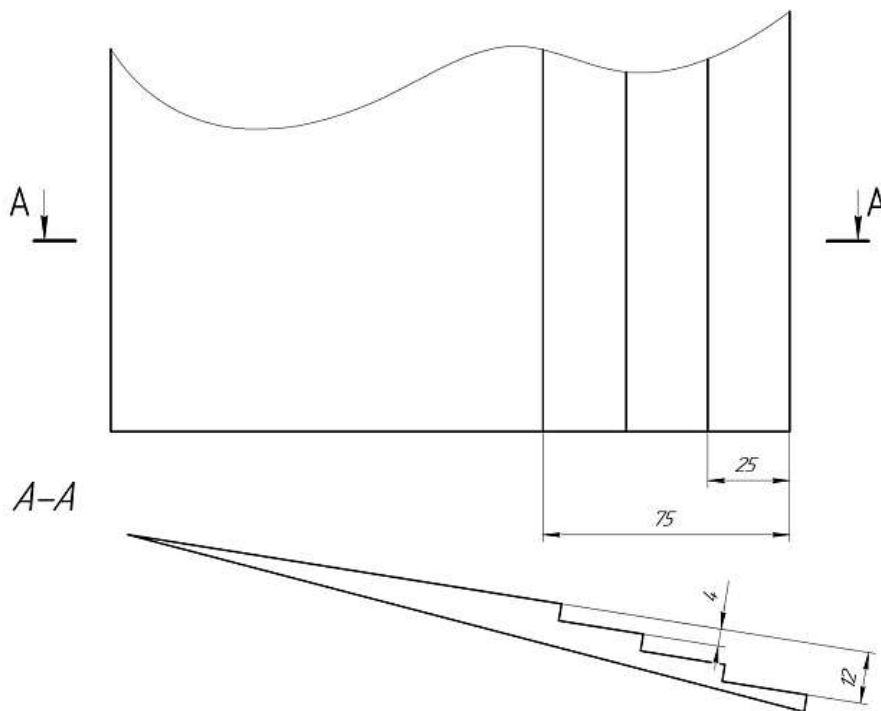


Рис. 4.9 – Скатна поверхня з трьома сходинками висотою 4 мм

Аналіз фотоматеріалів демонструє, що при подачі зернового вороху з гладкої похилої поверхні живильника формується цілісний, хоча й достатньо широкий, зерновий струмінь. Розсіювання потоку починається лише в безпосередній близькості до протилежної стінки пневмосепаруючого каналу, внаслідок чого ефективно відділення легких фракцій повітряним потоком відбувається переважно у зоні, прилеглої до цієї стінки. Як видно на фотознімках, відокремлення легковагових частинок з такого щільного потоку є ускладненим, що негативно впливає на загальну ефективність пневмосепарації.

У випадку використання ступінчастої, коливальної поверхні живильника, спостерігається значно рівномірніше заповнення пневмоканалу оброблюваним матеріалом по всій його глибині. Такий розподіл забезпечує кращі умови для виділення легковагових домішок, оскільки зменшується локалізація потоку і, відповідно, знижуються аеродинамічні перешкоди для повітряного потоку. Рівномірне заповнення пневмоканалу сприяє ефективному відділенню домішок на всій висоті його поперечного перерізу.

У результаті проведеного порівняльного експерименту було визначено розподіл маси зернового вороху за виходами лабораторної установки, дані якого наведено в таблиці 4.2. Аналіз цієї таблиці показує, що при використанні ступінчастого живильного лотка в осадову камеру післярешітної аспірації вилучено більшу кількість частинок, ніж у випадку застосування гладкої поверхні за однакових умов подачі та швидкості повітряного потоку. Це свідчить про більш інтенсивне виносення зернової маси, включаючи цілі зерна, що вказує на підвищену ефективність дії повітряного потоку за аналогічних експлуатаційних параметрів.

Таблиця 4.2 – Розподіл компонентів зернового вороху на виходах установки

Вихід	лоток	P_z	P_d	$P_{ш}$	$P_{п}$	P_n	P_c	m 1000
$M_{оф}$	Г	62,8	1,1	0,8	1,1	0,4	0,1	36,8
	С	67,1	0,9	0,6	0,6	0,3	0,01	38,1
$M_{окп}$	Г	1,5	0,3	0,2	0,2	0,3	0,01	31,7
	С	2,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,01	32,2
$M_{окд}$	Г	1,4	1,3	0,3	0,2	0,2	0,01	29,8
	С	1,2	0,8	0,3	0,2	0,01	0,01	27,5
$M_{пор}$	Г	20,7	5,6	0,44	0,43	0	0	26,9
	С	19,4	3,8	0,42	0,41	0	0	27,8

За підсумками проведених експериментальних досліджень було сконструйовано пристрій для післярешітної пневмосепарації зернового вороху, призначений для використання на двоаспіраційних машинах (рис. 4.10).

Конструкція пристрою включає пневмосепаруючий канал 1, оснащений поперечним завантажувальним вікном 2 для введення оброблюваного матеріалу. У зоні подачі встановлено коливальний живильник 3 із рельєфною скатною поверхнею, яка містить сходинок 4. Живильник складається з бічних стінок і похилої основи з ритмічно розташованими ступінчастими елементами. Щаблі мають висоту a , ширину b і кут нахилу β відносно горизонтальної площини.

Висота a сходинок визначається з урахуванням фізико-механічних властивостей зернового вороху й підбирається таким чином, щоб забезпечити максимальний ступінь взаємодії між зерною масою та коливальною поверхнею живильника. Це необхідно для формування належної початкової швидкості подачі матеріалу в пневмосепаруючий канал.

Ширина b щаблів підбирається меншою або рівною амплітуді коливань живильника з метою забезпечення рівномірного та стабільного завантаження пневмоканалу по всій його глибині.

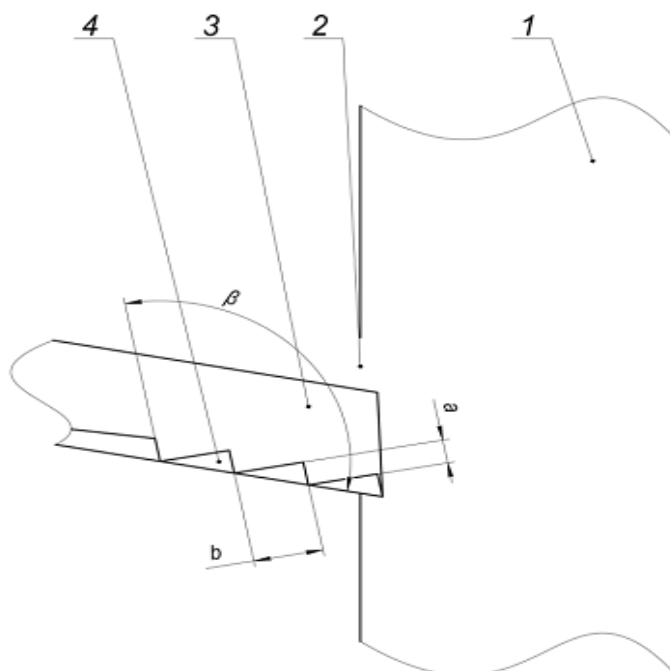


Рис. 4.10 – Пристрій для післярешітної пневмосепарації зернового вороху:

1 – вертикальний пневмоканал; 2 – поперечне завантажувальне вікно; 3 – лоток живильника; 4 – ступінчаста поверхня лотка живильника; a – висота сходинок; b – довжина сходинок; β – кут нахилу сходинок до лотка

Кут нахилу сходинок впливає на розкид по висоті траєкторій польоту частинок на вході в пневмоканал, а отже, на рівномірність розподілу вороху як за площею перерізу каналу, так і за обсягом найактивнішої зони сепарації.

Наприклад, для вороху пшениці, оброблюваної на двоаспіраційної зерноочисної машини з амплітудою коливання решітного стану 31 мм, рекомендована ширина сходинок дорівнюватиме 26 – 31 мм, висота сходинок від 4,1 до 8,2 мм, а кут нахилу дорівнює 1.

Пристрій для післярешітної пневмосепарації зернового вороху працює в такий спосіб.

Зерновий ворох подається до пневмосепаруючого каналу 1 через завантажувальне вікно 2 по подаючому лотку 3, який транспортує матеріал із певною початковою швидкістю. У процесі переміщення по лотку швидкість зернової суміші наближається до лінійної швидкості зворотно-поступального руху живильника, що спричиняє додаткове прискорення маси.

Унаслідок зіткнень частинок вороху з поверхнями сходинок, які мають певний кут нахилу, досягається рівномірніший розподіл зернової маси по поперечному перерізу пневмоканалу. У подальшому, під дією висхідного повітряного потоку, зернова суміш піддається аеродинамічному розділенню на фракції. Очищене зерно виводиться через нижню частину каналу 1.

Рівномірність розподілу матеріалу по перерізу забезпечується завдяки конструкції живильного лотка, на виході якого передбачено ступінчасту поверхню. Під час зворотно-поступального руху така поверхня надає додатковий імпульс частинкам вороху, що сприяє їх розосередженню в момент введення в пневмосепаруючий канал.

У результаті взаємодії зернового матеріалу зі сходинок подаючого лотка, а також міжчастинкових зіткнень, формуються траєкторії з різними кутами відбиття, що створює віялоподібну структуру потоку. Такий розосереджений потік сприяє ефективнішому виділенню легковагових домішок повітряним потоком у пневмосепаруючому каналі.

4.4. Аналіз розподілу зерна в каналі пневматичної системи

Рівномірність розподілу зернової маси по глибині вертикального

пневмосепаруючого каналу є одним із ключових чинників, що впливають на ефективність процесу пневмосепарації. Забезпечення однорідного завантаження пневмоканалу по всій його глибині дозволяє підвищити ефективну продуктивність пневмосепараційного обладнання на 16–26%, залежно від фізико-механічних властивостей вихідного зернового матеріалу.

З метою оцінки роботи живильного лотка удосконаленого пристрою було проведено експериментальні дослідження щодо визначення рівномірності розподілу зернового вороху по глибині вертикального пневмоканалу. При цьому для порівняння застосовувався контрольний зразок, подача вороху в який здійснювалася за відсутності повітряного потоку.

Результати, що ілюструють характер розподілу зернової маси по глибині пневмосепаруючого каналу за зазначених умов, подано у вигляді діаграм на рисунку 4.11.

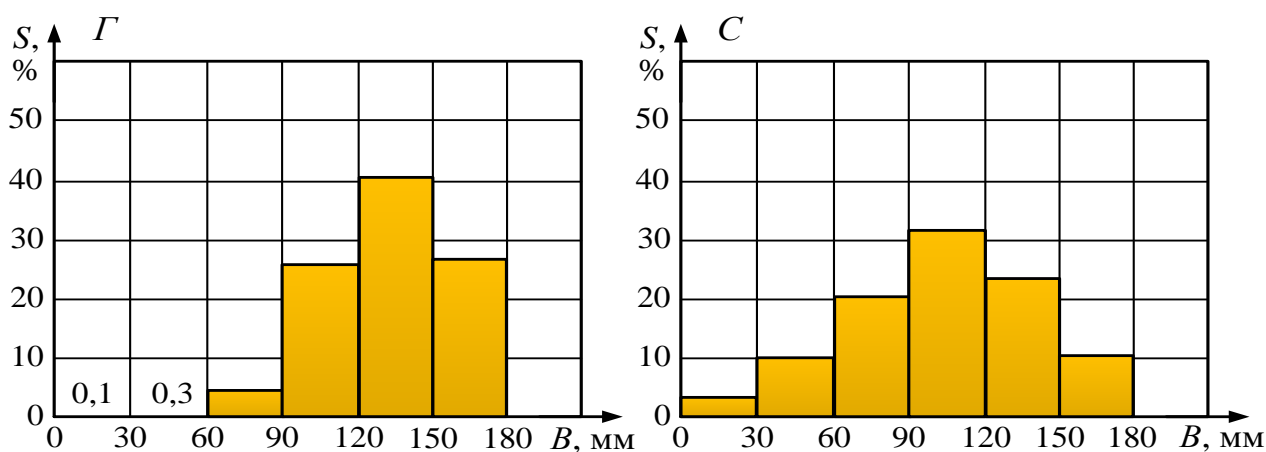


Рис. 4.11 – Розподіл зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу без повітряного потоку: Γ – при сході з гладкої скатної поверхні; C – при сході з лотка розробленої конструкції, що має сходинки заввишки 4 мм.

На діаграмі, позначеній літерою « Γ », представлено розподіл зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу в умовах подачі з гладкої похилої поверхні. З аналізу діаграми випливає, що розподіл матеріалу в поперечному перерізі каналу є нерівномірним. Максимальна концентрація зернової маси спостерігається в зоні, віддаленій на 125–155 мм від точки введення, і становить приблизно 40% від загальної маси, поданої в пневмоканал. У діапазоні 0–65 мм

концентрація вороху наближається до нульового значення, що свідчить про однотипність траєкторій руху частинок, які сходять із живильника. У результаті формується щільний зерновий струмінь, як було зафіксовано раніше.

Діаграма, позначена літерою «С» на рисунку 4.11, відображає характер розподілу зернового вороху по глибині пневмоканалу при подачі з використанням живильного лотка удосконаленої конструкції зі ступінчастою поверхнею. Як видно з графіка, пік концентрації зернової маси зміщений у центральну частину каналу, а розподіл має більш згладжений характер порівняно з варіантом із гладким лотком. Особливо слід відзначити, що в зоні безпосередньо під точкою введення матеріалу (0–65 мм) концентрація частинок зростає до 15%, що значно перевищує аналогічний показник у контрольному зразку.

Проведене порівняльне дослідження роботи розробленого та контрольного живильників у відсутності повітряного потоку підтвердило ефективність застосування ступінчастої скатної поверхні. Її використання забезпечило суттєво рівномірніший розподіл зернової маси по глибині пневмосепаруючого каналу в зоні післярешітного очищення.

З огляду на ймовірність варіацій у виробничих умовах, що можуть вимагати підвищеної інтенсивності повітряного потоку, було проведено додатковий експеримент. Його метою було порівняння рівномірності розподілу зернового вороху по глибині пневмоканалу при подачі з різних типів лотків за дії висхідного повітряного потоку зі швидкістю до 10,5 м/с. Результати цього дослідження представлені на рисунку 4.12.

З результатів досліджень при впливі більш інтенсивного повітряного потоку на зерно, що подається, видно, що в обох випадках розподіл зернового вороху значно зсувається до дальньої стінки каналу. Це з тим, що з впливі висхідного потоку повітря на зерновий ворох з'являється додаткова сила, спрямовану вгору, з-за якої траєкторії падіння частинок вороха подовжуються. Крім того, на зміщення матеріалу в пневмоканалі впливає потік повітря, що засмоктується через негерметизоване завантажувальне вікно.

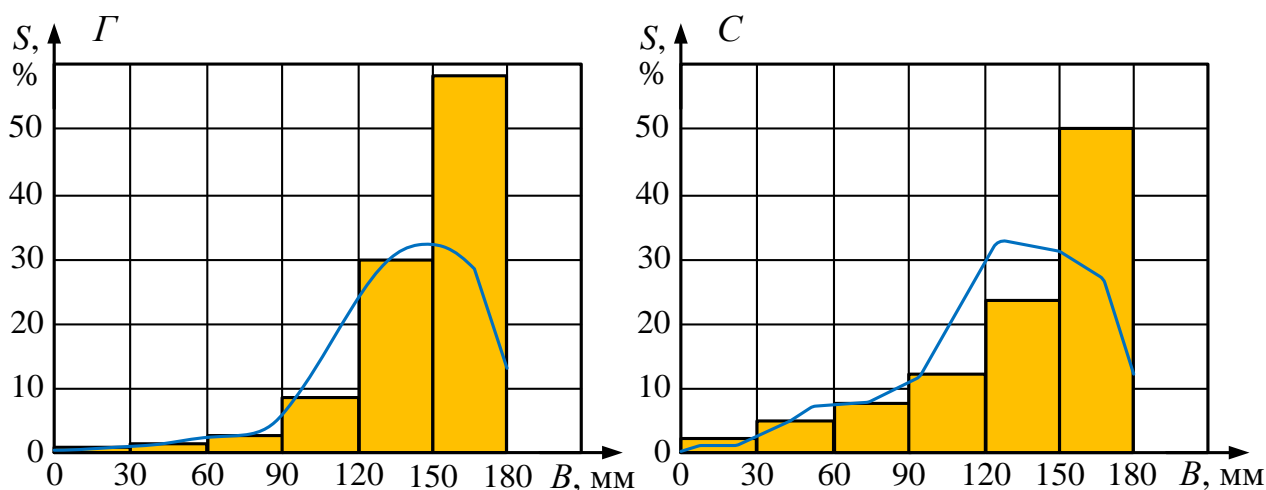


Рис. 4.12 – Розподіл зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу при впливі повітряним потоком:

Г – при сході з гладкою скатною поверхнею; С – при сході з лотка розробленої конструкції, що має сходинки заввишки 4 мм; ■ – експериментальний розподіл; — — теоретичний розподіл

Як видно з рисунка, запропонований варіант живильника забезпечує значно рівномірніший розподіл зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу. Проведений аналіз експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що рівномірність розподілу підвищилася приблизно на 15% від загальної маси матеріалу, поданого в пневмоканал.

Отримані результати експериментальних досліджень підтверджують висновки математичного моделювання, наведені в розділі теоретичних досліджень. Візуальне порівняння розподілів, отриманих у процесі моделювання та експериментів, подано на рисунку 4.12 у вигляді кривих, накладених на відповідні діаграми.

Аналіз порівняльних графіків свідчить про загальну відповідність характеру розподілу: розрахункова та експериментальна криві мають подібну форму. Єдиною істотною розбіжністю є положення піку концентрації зернової маси. У результатах моделювання цей пік зміщено далі від дальньої стінки пневмоканалу порівняно з експериментальними даними. Це пояснюється врахуванням коефіцієнта відбиття частинок під час моделювання польоту вороху, який був прийнятий у діапазоні 0,6–0,7, коли частинка досягала

протилежної стінки каналу.

У рамках порівняльного експерименту також було відібрано зразки для визначення складу зернового вороху та маси 1000 насінин залежно від глибини відбору в пневмоканалі.

Результати показали, що зерновий ворох, поданий у пневмоканал за допомогою живильного лотка зі ступінчастою поверхнею, характеризується вищим значенням маси 1000 насінин порівняно з ворохом, який подавався з гладкої поверхні. Зростання маси 1000 насінин свідчить про зменшення вмісту неповноцінного зерна з низькою щільністю, що дозволяє зробити висновок про підвищення ефективності виділення легкої домішки та зниження частки незрілих або ушкоджених зернівок при використанні ступінчастої системи подачі.

На основі отриманих даних також встановлено, що характер розподілу окремих компонентів зернового вороху по глибині каналу відповідає загальному розподілу маси: чим далі від точки введення матеріалу в пневмоканал, тим більше частинок накопичується в цій зоні. Зазначені залежності представлені на графіку (рис. 4.13).

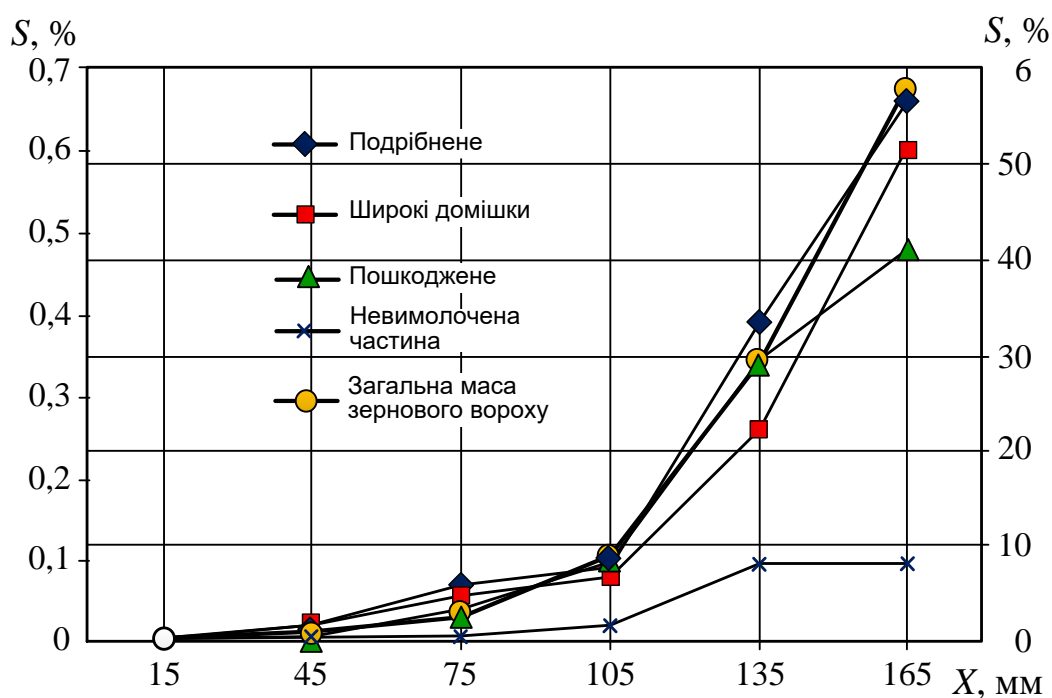


Рис. 4.13 – Залежність вмісту компонентів вороху від віддаленості від точки їх введення в пневмоканал

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що використання ступінчастого живильного лотка не чинить істотного впливу на характер розподілу окремих фракцій зернового вороху по глибині пневмосепаруючого каналу. Основний ефект від застосування цієї конструкції полягає в підвищенні рівномірності загального масового розподілу матеріалу по глибині каналу.

Водночас, якщо проаналізувати залежність маси 1000 насінин від відстані до точки введення зернової суміші в пневмоканал при подачі з використанням різних типів живильних лотків, можна виявити відмінності у формуванні цих показників (рис. 4.14).

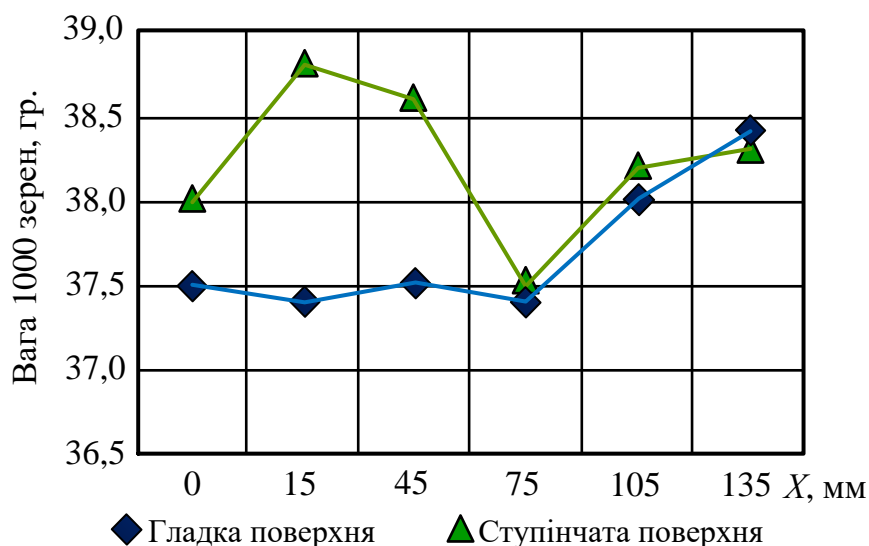


Рис. 4.14 – Залежність маси 1000 насінин від віддалення точки введення

Видно, що маса 1000 насіння вороху, поданого в пневмоканал лотком живильника зі східчастою поверхнею, трохи вище, ніж маса 1000 насіння вороха, завантаженого з гладкої поверхні. Оскільки маса 1000 насіння одна із значних показників якості зерна, можна зробити висновок, що використання ступінчастої поверхні під час завантаження пневмосепаруючого каналу дозволяє підвищити якість кінцевого продукту.

Висновки

1. Для ефективного виділення основної частини подрібненого зерна, сторонніх домішок та біологічно неповноцінного зерна у каналі післярешітного

повітряного очищення необхідно забезпечити швидкість повітряного потоку не менше ніж 9,2 м/с.

2. На основі емпіричних досліджень визначено оптимальні конструктивні параметри ступінчастої поверхні живильного лотка, призначеного для обробки вороху озимої пшениці: висота сходинки – 4 мм, ширина – 26 мм, кут нахилу сходинки – $91 \pm 10^\circ$.

3. Встановлено, що впровадження ступінчастої конструкції живильного пристрою сприяє зниженню аеродинамічного опору каналу післярешітного очищення на величину до 9,2% при одночасному підвищенні продуктивності системи на 22%.

4. Використання ступінчастого живильника в системі другої аспірації сприяє покращенню ефективності функціонування зерноочисної машини: показник повноти поділу зернової суміші зростає на 5,5–6,5%.

5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

Техніко-економічне обґрунтування виконано з метою оцінки доцільності впровадження запропонованого пристрою в якості елемента системи післярешітної пневмосепарації зернового вороху у складі серійної зерноочисної машини. Очікуваний ефект від впровадження ступінчастого живильного пристрою полягає в підвищенні продуктивності зерноочисного обладнання при одночасному забезпеченні відповідності агротехнічним вимогам.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показники	Базовий варіант	Проектований варіант
1. Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	1	1
2. Відрахування на реновацію, %	20	20
3. Відрахування на ТО, ПР та КР, %	9	9
4. Потужність електродвигунів машини, кВт	13	13
5. Тарифна ставка оператора, грн/люд.год.	98,0	98,0
6. Нормативне річне завантаження, год.	500	500
7. Продуктивність, т/год.	20	24,4
8. Ціна машини, грн.	450000	495687
10. Термін служби	9	9

Дані порівняльних показників економічної ефективності застосування запропонованого способу модернізації зерноочисної машини представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняльні показники ефективності сепарації зерноочисної машини

Найменування показників	Значення показників за варіантами	
	базовий	експеримен- тальний
1	2	3
Витрати на реновацію на одиницю роботи, грн./т	13,8	15,6
Витрати на поточний ремонт та ТО на одиницю роботи, грн./т	11,4	9,7

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
Витрати оплати праці, грн./т	4,7	3,6
Витрати електроенергію, грн./т	3,8	3,1
Додаткові капіталовкладення, грн.		35568,2
Економія прямих витрат за річний обсяг робіт, грн.		42567,3
Термін окупності додаткових капіталовкладень, років		0,82
Економічний ефект, грн.		1289354
Річний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень		0,32

Як показав розрахунок економічної ефективності, застосування запропонованого способу подачі оброблюваного вороху в канал післярешітного повітряного очищення є доцільним. Розрахунковий річний економічний ефект, від цього методу, становив 42567,3 грн. Розмір економічного ефекту за термін експлуатації складе 1289354 грн.

ВИСНОВОК

1. Аналіз сучасних досліджень у сфері зерноочищення засвідчив, що впровадження живильного пристрою, який забезпечує рівномірний розподіл зернового вороху по глибині вертикального пневмосепаруючого каналу, сприяє підвищенню ефективності пневмосепарації на 16–21%.

2. Теоретичні дослідження встановили, що при подачі зернового вороху у післярешітний пневмоканал зі сходу з коливного решета початкові швидкості частинок перебувають у межах 0,35–0,55 м/с, чого недостатньо для забезпечення рівномірного заповнення каналу по глибині. Для досягнення рівномірного розподілу матеріалу необхідний розкид початкових швидкостей у межах 0,15–0,7 м/с.

3. На основі результатів теоретичних досліджень і математичного моделювання встановлено, що рівномірний розподіл зернового вороху по глибині післярешітного пневмоканалу забезпечується за умов подачі матеріалу за допомогою ступінчастого живильного лотка, що коливається у синхронному режимі з решітним станом.

4. В результаті експериментальних досліджень емпірично визначено оптимальні параметри ступінчастої поверхні живильного пристрою для вороху озимої пшениці: висота сходинки — 4,2 мм, ширина — 26 мм, кут нахилу — $92 \pm 10^\circ$.

5. Застосування розробленого пристрою забезпечує зниження аеродинамічного опору каналу післярешітного повітряного очищення до 9,2%, підвищення рівномірності розподілу зернового вороху по глибині пневмоканалу на 16%, а також зростання продуктивності зерноочисної установки на 22% без зниження повноти відділення домішок.

6. Економічний аналіз підтвердив доцільність впровадження запропонованого способу подачі зернового вороху в канал післярешітного очищення. Розрахунковий річний економічний ефект становить 42 567,3 грн, а сумарна економія за весь термін експлуатації – 1 289 354 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliiev E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photoelectron separator of sunflower seeds. [Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника]. *Scientific Horizons*, 5 (78): 23-30. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.
2. Алієв Е. Б., Кутіщев В. Л. Очищення та розділення насіннєвого матеріалу олійних культур. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури. тенденції та перспективи» (1 листопада 2016 р.). Запоріжжя: ІОК НААН. 2016. С. 134–135.
3. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.
4. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. С. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравелла, 2008. С. 317–407.
5. Грабар І. Г., Дерев'янку Д. А., Герук С. М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насіннєвого матеріалу Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. I. С. 340–349.
6. Дерев'янку Д. А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. *Інженерія природокористування*. 2014. № 1(1). С. 114–123.
7. <https://www.cimbria.com/en.html>
8. <https://www.denis.fr>
9. <https://www.westrup.com/>
10. <https://www.petkus.com/>
11. <https://www.petkus.com/innovation/roeber-institute>
12. Bai C. Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London. 1996.
13. Dominik Kubicki, Simon Lo. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012) 2012. P. 1–6.

14. Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 6. 2012. P. 411–415.
15. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 2. 2013. P. 41–45.
16. 1. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. С. Сільськогосподарські машини. Київ: Каравелла, 2008. С. 317–407.
17. Грабар І. Г., Дерев'янку Д. А., Герук С. М. Вплив чинників післязбиральної обробки зерна на якість насіннєвого матеріалу Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. І. С. 340–349.
18. Дерев'янку Д. А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. Інженерія природокористування. 2014. № 1(1). С. 114–123.
19. Дерев'янку Д. А., Тарасенко О. П., Оробінський В. І. Вплив травмування на якість насіння зернових культур : монографія. Житомир: Нілан-ЛТД, 2012. 440 с.
20. Журнал «Агроном». URL: <http://www.agronom.com.ua> (дата звернення 23.07. 2024).
21. Кісь-Коркіщенко Л. В. Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій. Дис. ... доктора філософії: 133. Харків, 2021. 182 с.
22. Опалко В., Шатров Р. Механічне травмування зерна після збирання. Agroexpert. 2017. № 2.
23. Скрипник І. О., Пісарькова І. О., Петренко М. М Механічне травмування зерна. Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2018. Вип.48. С. 143–153. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>.
24. Тищенко Л. М., Ольшанський В. П., Ольшанський С. В. Вібросепараторна сепарація зернових сумішей. Харків: МД, 2011. 280 с.

25. Харченко, Є. І. Шаран А. В., Янюк Т. І. Інноваційні технології галузі: Конспект лекцій для студ. спец. 7.05170101, 8.05170101 «Технології зберігання і переробки зерна» денної та заочної форм навчання. Київ: НУХТ, 2014. 94 с.

26. Шаповаленко О. І., Євтушенко О. О., Кожевнікова М. І., Шпак О. О. Дослідження ступеню травмування зерна кукурудзи у виробничих умовах. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 2. С. 31–33.

27. Shaaya E., Kostjukovski M., Eilberg J., Sukprakarn C. Plant oils as fumigants and contact insecticides for the control of stored-product insects. *J. Stored Prod. Res.* 1997. Vol. 33. P. 7–15. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(96\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(96)00032-X).

28. MAREČEK J. Conditions for maintaining the quality of the grain at harvest. URL: <http://www.agroporadenstvo.sk> RIGO.

29. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I. [et al.]. Theoretical study of vibrocentrifugal separation of grain mixtures on a sieveless seedcleaning machine. *Rural Sustainability Research*. 2021. Vol. 46(341). P. 116-124. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>.

30. Bala B. K., Haque M. A., Hossain M. A., Majumdar S. Post Harvest Loss and Technical Efficiency of Rice, Wheat and Maize Production System: Assessment and Measures for Strengthening Food Security. Bangladesh Agricultural University; Mymensingh, Bangladesh: 2010.

31. Baoua I., Amadou L., Lowenberg-DeBoer J., Murdock L. Side by side comparison of GrainPro and PICS bags for postharvest preservation of cowpea grain in Niger. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 54. P. 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.03.003>.

32. Ben D. C., van Liem P., Dao N. T., Gummert M., Rickman J. F. Effect of Hermetic Storage in the Super Bag on Seed Quality and Milled Rice Quality of Different Varieties in Bac Lieu, Vietnam. *Int. Rice Res. Notes*. 2009. <https://doi.org/10.3860/irrn.v31i2.1138>.

33. De Groote H., Kimenju S. C., Likhayo P., Kanampiu F., Tefera T., Hellin J. Effectiveness of hermetic systems in controlling maize storage pests in Kenya. *J. Stored Prod. Res.* 2013. Vol. 53. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2013.01.001>.

34. Kimanya M. E., Meulenaer B., Camp J., Baert K., Kolsteren P. Strategies to reduce exposure of fumonisins from complementary foods in rural Tanzania. *Matern. Child Nutr.* 2012. Vol. 8. P. 503–511. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8709.2011.00337.x>.

35. Kitinoja L. Innovative small-scale postharvest technologies for reducing losses in horticultural crops. *Ethiop. J. Appl. Sci. Technol.* 2013. Vol. 1. P. 9–15.

36. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O. [et al.]. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99(1). P. 100-104. <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>.

37. Mykhailov Ye., Golebiewski J., Kiurchev S., Hutsol T., Kolodii O., Nurek T., Glowacki Sz., Zadosna N., Verkholantseva V., Palianychka N., Kucher O. Economic and technical efficiency of sunflower seed processing. Monograph. – Warszawa: 2020. 158 c. <https://doi.org/10.22630/SGGW.WE.9788375839340>.

38. Njoroge A., Affognon H., Mutungi C., Manono J., Lamuka P., Murdock L. Triple bag hermetic storage delivers a lethal punch to *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored maize. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.02.005>.

39. Shvidia V., Stepanenko S., Kotov B. [et al.]. Influence of vacuum on drying of seeds of grain crops. In: *Bulletin of the Karaganda University. Physics series.* 2022. Vol. 3(107). P. 90-98. <https://doi.org/10.31489/2022PH3/90-98>.

40. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A. [et al.]. To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section. *Processes.* 2022. Vol. 10(10). P. 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>.

41. Stepanenko S., Kotov B., Spirin A. [et al.]. Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. In: *Bulletin of the Karaganda University. Physics series.* 2022. Vol. 1(105). P. 43–57. <https://doi.org/10.31489/2022PH1/43-57>.

42. Suleiman R. A., Kurt R. A. Current maize production, postharvest losses and the risk of mycotoxins contamination in Tanzania; *Proceedings of the American*

Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting; New Orleans, LA, USA. 26–29 July 2015.

43. Tefera T., Kanampiu F., de Groote H., Hellin J., Mugo S., Kimenju S., Beyene Y., Boddupalli P.M., Shiferaw B., Banziger M. The metal silo: An effective grain storage technology for reducing post-harvest insect and pathogen losses in maize while improving smallholder farmers' food security in developing countries. *Crop Prot.* 2011. Vol. 30. P. 40–245. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.11.015>.

44. Vales M., Rao C. R., Sudini H., Patil S., Murdock L. Effective and economic storage of pigeonpea seed in triple layer plastic bags. *J. Stored Prod. Res.* 2014. Vol. 58. P. 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.01.004>.

45. Bai C., Gosman A. D. Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Technical Paper Series.* 1995. 21 p.

46. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k - ϵ Turbulence Model. *CFD Letters.* 2009. Vol. 1(2). P. 87–94.

47. Wallin S. Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models. Doctoral thesis. Norstedts truckeri, Stockholm, Sweden. 2000. 124 p.

48. Алієв Е. Б., Яропуд В. М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. Вінниця, 2017. №2 (97). С. 19–23.*

49. Алієв Е. Б. Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету. Житомир, 2017. №1 (58), т.1. С. 173–180.*

50. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства*

імені Петра Василенка. Харків, 2017. Вип. 180. С. 67–71.

51. Пешук Л. В. Біохімія та технологія оліє-жирової сировини. Навч. посіб. Л. В. Пешук, Т. Т. Носенко – К. : Центр учбової літератури, 2011. – 296 с.

52. Mohsenin N.N. Physical properties of plant and animal materials / N.N. Mohsenin // New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc. – 1980 – P. 51-87.

53. Aydin C. Physical properties of almond nut and kernel / C. Aydin // New Food Eng. – Vol. 60 – P. 315-320.

54. Gupta R.K. Physical properties of sunflower seeds / R.K. Gupta, S.K. Das // Food Eng. – 1997 – Vol. 66 – P. 1-8.

55. McCabe W.L. Unit operations of chemical engineering / W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriott // McGraw-Hill Book Co, New York. – 1986.

56. Jain R.K. Properties of pearl millet / R.K. Jain, S. Bal // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1997 – P. 85-91.

57. Sahay K.M. Unit operations in agricultural processing / K.M. Sahay, K.K. Singh // Vikas Publishing House Pvt Ltd, New Delhi. – 1994.

58. Singh K.K. Physical properties of sunflower seeds / K.K. Singh, T.K. Goswami // Physical properties of cumin seed. J. Agric. Eng. – 1996 – Vol. 64 – P. 93-98.

59. Nimkar M.P. Some Physical properties of green gram / M.P. Nimkar, K.P.

60. Chattopadhyay // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2001– Vol. 80(2) –P. 183-189

61. ДСТУ 4138-2002 Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Наказ Держспоживстандарту України від 28.12.2002 № 31

62. ДСТУ 3768:2019 Пшениця. Технічні умови. Прийнято та надано чинності: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 14 травня 2019 р. № 125 з урахуванням змін, внесених наказом ДП «УкрНДНЦ» від 22 травня 2019 р. № 133 з 2019-06-10.

63. ДСТУ 4762:2007 ТРИТИКАЛЕ Технічні умови. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 28 квітня 2007 р. № 95 з 2007–

08–01.

64. ДСТУ 4748:2007 Машини сільськогосподарські. Методи оцінювання пристосованості до технічного обслуговування. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 26.02.2007 № 40.

65. ДСТУ 4397:2005 Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Прийнято та надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 28.04.2005 № 101.

66. Оробінський, В.І. Поліпшення якості очищення зерна в машині з діаметральним вентилятором / В.І. Оробінський, А.І. Корольов // Вісник ВДАУ, – 2005. – №10 – С.159 – 164.

67. Тарасенко, А.П. Удосконалення процесу пневмосепарації у зерноочисній машині з відцентровим вентилятором / О.П. Тарасенко, В.І. Оробінський, А.А. Сундєєв, В.В. Шередекін, А.І. Корольов // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2005. – №9. – С.7 – 9.

68. Cimbria Heid, GmbH [Електронний ресурс]. –Данія: Thisted, 2024 Режим доступу: <http://www.cimbria.com/en-GB/Home/Solutions/Seed-Processing.aspx>.

69. Denis, GmbH [Електронний ресурс]. – Франція: Brou, 2024 -Режим доступу: <http://www.denis.fr/nettoyage/gamme> . (Дата звернення: 10.10.2024).

70. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4(1(130)), pp. 54–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869>

71. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Shvydia, V., Kalinichenko, R., Kharchenko, S., Shchur, T., Kocira, S., Kwaśniewski, D., Dziki, D. (2022). To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section. Processes, Vol. 10(10), 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>

72. Ruotong, M.U., Liang, W.U. (2023). A research review of global grain harvest losses. Resources Science, Vol. 45(9), pp. 1789–1800.

73. Aneliak, M., Kuzmych, A., Stepanenko, S., Lysaniuk, V. (2023). Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 71(3), pp. 83–92. <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>

74. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4(1(112)), pp. 54–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938>

75. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., Kaminski, J.R. (2021). Modeling separation process for sunflower seed mixture on vibro-pneumatic separators. *Mechanika*, Vol. 27(4), pp. 311–320. <https://doi.org/10.5755/J02.MECH.27647>

76. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R., Hryshchenko, V. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*, Vol. 24(1), pp. 225–235. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>

77. Rong, D., Wang, H., Xie, L., Ying, Y., Zhang, Y. (2020). Impurity detection of juglans using deep learning and machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 178, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105764>

78. Chen, F., Chen, P., Li, D., Cheng, F. (2015). Kernel-like impurity detection according to colour band spectral image using GA/SVM. *The Imaging Science Journal*, Vol. 63(8), pp. 469–475. <https://doi.org/10.1179/1743131X15Y.0000000022>

79. Yao, Q., Chen, J., Guan, Z., Sun, C., Zhu, Z. (2009). Inspection of rice appearance quality using machine vision. In: *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*, pp. 274–279. <https://doi.org/10.1109/GCIS.2009.91>

80. Kaya, E., Saritas, I. (2019). Towards a real-time sorting system: identification of vitreous durum wheat kernels using ANN based on their morphological, colour, wavelet and gaborlet features. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 166, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105016>

81. Sharma, D., Sawant, S. D. (2017). Grain quality detection by using image processing for public distribution. In: 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, pp. 1118–1122. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250640>
82. Chen, J., Gu, Y., Lian, Y., Han, M.. (2018). Online recognition method of impurities and broken paddy grains based on machine vision. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, Vol. 34(13), pp. 187–194. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.13.022>
83. Shen, Y., Yin, Y., Li, B., Zhao, C., Li, G. (2021). Detection of impurities in wheat using terahertz spectral imaging and convolutional neural networks. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 181, 105931. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105931>
84. Julka, N., Singh, A.P. (2022). Detection of foreign materials in wheat kernels using regional colour descriptors. Journal of Engineering Research, Vol. 10(2A), pp. 195–209. <https://doi.org/10.36909/jer.10371>
85. Chen, M., Jin, C., Ni, Y., Xu, J., Yang, T. (2022). Online detection system for wheat machine harvesting impurity rate based on DeepLabV3+. Sensors, Vol. 22(19), 7627. <https://doi.org/10.3390/s22197627>
86. Han, K., Zhang, N., Xie, H., Wang, Q., Ding, W. (2023). An improved strategy of wheat kernel recognition based on deep learning. Dyna, Vol. 98(1). pp. 91–97. <https://doi.org/10.6036/10686>
87. Ma, N., Su, Y., Yang, L., Li, Z., Yan, H. (2024). Wheat seed detection and counting method based on improved YOLOv8 model. Sensors, Vol. 24(5), 1654. <https://doi.org/10.3390/s24051654>
88. Han, J., Guo, J., Zhang, Z., Yang, X., Shi, Y., Zhou, J. (2023). The rapid detection of trash content in seed cotton using near-infrared spectroscopy combined with characteristic wavelength selection. Agriculture, Vol. 13(10), 1928. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101928>
89. Yadav, G., Maheshwari, S., Agarwal, A. (2014). Contrast limited adaptive histogram equalization based enhancement for real time video system. In: 2014

international conference on advances in computing, communications and informatics, pp. 2392–2397. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2014.6968381>

90. Romero-Zaliz, R., Reinoso-Gordo, J. (2018). An updated review on watershed algorithms. In: Cruz Corona, C. (eds.) *Soft Computing for Sustainability Science. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, Vol. 358, pp. 235–258. Springer, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62359-7_12

91. Kalinichenko, R. A., & Voitiuk, V. D. (2017). Energy-efficient operating modes of machines for highly efficient heat treatment of grain materials. Publishing Center of the Gogol National University [in Ukrainian].

92. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., & Lisetskyi, V. O. (2017). Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling). PP Lysenko [in Ukrainian].

93. Kotov, B. I. (1994). Technological and heat-energy foundations for increasing the efficiency of drying plant raw materials [dys. ... d. tekhn. n]. [in Ukrainian].

94. Kalinichenko, R. A., Kotov, B. I., & Spirin, A. V. (2017). Mathematical model of drying of plant raw materials in a rotating drum with combined energy supply. *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine. Series. Engineering and Energy of the Agricultural Complex*, 261, 217–225 [in Ukrainian].

95. PETKUS Wutha Technologie, GmbH [Електронний ресурс]. – Німеччина: Wutha-Farnroda, 2024 – Режим доступу: <http://petkus.de/produkte/-/info/sortieren/reiniger>.

96. ROEBER Institut, GmbH [Електронний ресурс]. – Німеччина: Wutha-Farnroda, 2024 – Режим доступу: <http://www.roeber-institut.de>. (Дата звернення: 08.09.2024).

97. Westrup A/S [Електронний ресурс]. – Denmark: Slagelse, 2024 – Режим доступу: <http://www.westrup.com/Products/>. (дата звернення: 06.09.2024).