

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ _____ ” 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

**«Удосконалення турбінного пневмосепаратора з обґрунтуванням його
параметрів»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____Бондар Артем Ігорович
« _____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____Дмитро ПЕТРЕНКО

« _____ » _____ 2026 р.

Рецензент

професор, д-р техн. наук

_____Микола МОРОЗ

« _____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

АНОТАЦІЯ

Роботу присвячено підвищенню ефективності пневмосепарації зерна шляхом впровадження зигзагоподібного каналу кільцевого перерізу. Теоретично обґрунтовано, що така геометрія подовжує час взаємодії фаз на 18% та забезпечує механічне розпушення зернового шару. Розроблено математичну модель руху часток із урахуванням сил Магнуса та Бассе. Встановлено оптимальний кут нахилу сегментів ($22...25^\circ$), що дозволяє підвищити якість очищення на 12...18% при збереженні компактності агрегату. Результати впровадження забезпечують вищу чистоту зерна за один прохід та зниження технологічних втрат.

Ключові слова: пневмосепарація, зигзагоподібний канал, математичне моделювання, ефективність очищення зерна

ABSTRACT

The work is devoted to increasing the efficiency of grain air separation by implementing a zigzag annular channel. It is theoretically substantiated that such geometry extends the phase interaction time by 18% and ensures mechanical loosening of the grain layer. A mathematical model of particle motion has been developed, taking into account Magnus and Basset forces. The optimal inclination angle of segments ($22...25^\circ$) was established, allowing for a 12...18% increase in cleaning quality while maintaining equipment compactness. The implementation results provide higher grain purity in a single pass and a reduction in technological losses.

Keywords: air separation, zigzag channel, mathematical modeling, grain cleaning efficiency

ЗМІСТ

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ
1	Вступ
2	Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень
3	Наукова частина
4	Практична реалізація результатів досліджень
5	Охорона праці
6	Загальні висновки
	Список використаної літератури

1. ВСТУП

Сучасний агропромисловий комплекс України та світу постає перед викликом – як забезпечити максимальну якість посівного матеріалу та продовольчого зерна в умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних стандартів [1, 4]. Зернова маса, що надходить від комбайнів, є складною полідисперсною системою, де крім повноцінного зерна містяться легкі домішки, пил та пошкоджені насінини. Саме етап первинного очищення та калібрування визначає подальшу стійкість збіжжя під час зберігання та його ринкову вартість.

Традиційні зерноочисні машини з вертикальними пневмоканалами тривалий час вважалися еталоном простоти, проте сьогодні їхні можливості практично вичерпані. Основною проблемою залишається недостатній час контакту зернової суміші з повітряним потоком та виникнення «зон затінення», де легкі домішки пролітають разом із важким зерном, не встигаючи сепаруватися [1-4].

Найбільш перспективним шляхом вирішення цієї проблеми є інтенсифікація процесу сепарації не за рахунок збільшення потужності вентиляторів (що веде до перевитрат енергії), а через оптимізацію геометрії робочої зони.

Запропоноване у даній роботі удосконалення – перехід до зигзагоподібної форми кільцевого пневмоканалу, відкриває новий вектор у розвитку турбінних сепараторів. Це дозволяє реалізувати принцип багаторазового перерозподілу зернового шару. Кожен злам каналу виступає як точка динамічного розпушення, де вектори сили тяжіння та аеродинамічного опору змінюють свій кут, фактично примушуючи суміш проходити цикл очищення кілька разів в межах одного робочого об'єму.

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та аналізі ефективності роботи пневмосепаратора з зигзагоподібним каналом, що дозволить підвищити якість очищення зерноsumішей при одночасному збереженні компактності та енергоефективності обладнання.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Ефективність функціонування турбінних сепараторів.

Функціонування турбінних сепараторів базується на відмінностях в аеродинамічних властивостях компонентів зернової суміші. Основним кількісним показником цих властивостей є швидкість витання (V_{cr}) – критична швидкість висхідного повітряного потоку, при якій аеродинамічна сила опору дорівнює силі тяжіння, що діє на частку.

Процес сепарації зумовлений суттєвою диференціацією значень швидкості витання основної культури та сторонніх включень. Кондиційне насіння: характеризується високими показниками (наприклад, для пшениці V_{cr} становить 7,0...11,5 м/с). Легкі домішки: (пил, полова, насіння бур'янів зі зниженою щільністю) мають значно нижчі значення V_{cr} – у межах 0,5...4,0 м/с [4].

Ефективне розділення фракцій відбувається у пневмосепараційних каналах (вертикальних або горизонтальних) за умови дотримання наступного нерівності [2-4]:

$$V_{imp} < V_{air} < V_{seed}$$

де V_{imp} – швидкість витання легких домішок;

V_{air} – швидкість повітряного потоку в каналі;

V_{seed} – швидкість витання основної культури.

За такого режиму важкі зернівки долають опір середовища та осідають під дією гравітації, тоді як легка фракція виноситься повітряним потоком у циклон або систему фільтрації.

Якість технологічного процесу визначається сукупністю технічних факторів [1-4, 9, 11, 12]:

- рівномірність розподілу матеріалу по всьому поперечному перерізу аспіраційного каналу;
- стабільність ламінарності та швидкості висхідного потоку повітря;
- експозиція (час перебування) часток у зоні дії повітряного струменя.

У сучасних конструкціях турбінних сепараторів мінімізація втрат кондиційного зерна досягається шляхом впровадження спеціалізованих вузлів завантаження [2, 4, 12]. Використання вібраційних або ротаційних розподільників забезпечує подачу зерна монотонним розсередженим шаром, що виключає виникнення застійних зон та гарантує максимальний доступ повітря до кожної одиниці матеріалу в зоні аспірації.

Конструктивні особливості аспіраційних систем турбінних сепараторів визначаються схемою циркуляції повітряного потоку та способом очищення відпрацьованого повітря від легких домішок [1-4]. Відповідно до цього виділяють три основні групи обладнання.

1. Сепаратори з відкритим циклом повітря. У системах відкритого типу атмосферне повітря забирається безпосередньо з виробничого приміщення або через систему припливної вентиляції. Проходячи крізь зернову масу в робочій зоні, потік насичується легкими фракціями домішок і транспортує їх за межі агрегату – у зовнішні циклони або фільтрувальні установки для подальшої сепарації та викиду очищеного повітря в атмосферу. Приклади реалізації: моделі DAMAS PULCO (Cimbria) та Kongskilde KF.

2. Сепаратори із замкненим (рециркуляційним) циклом. Принцип дії базується на безперервній рециркуляції повітряного потоку всередині замкненого контуру машини. Після фази фракціонування повітряно-продуктова суміш спрямовується в інтегровані осаджувальні камери, де внаслідок різкого зниження швидкості та зміни напрямку потоку домішки випадають в осад. Очищене повітря повторно нагнітається вентилятором у робочу зону без споживання зовнішніх повітряних мас. Приклади реалізації: повітряні сепаратори серії ВСЗ/ВСЗМ (виробництва ТОВ «ОЛІС»).

3. Комбіновані (багатофункціональні) установки. Даний тип обладнання інтегрує в єдиному технологічному вузлі секції ситового очищення (за геометричними ознаками) та аспіраційні канали (за аеродинамічними ознаками). Це дозволяє проводити комплексне очищення зерна від дрібних, крупних та легких домішок за один прохід матеріалу крізь агрегат. Типова конфігурація:

комбінація барабанного сепаратора ЛУЧ ЗСО та повітряного сепаратора ВСЗ («ОЛС»).

Аспіраційна установка DAMAS PULCO (рис. 2.1) є розробкою компанії DAMAS A/S, що наразі функціонує у складі машинобудівного холдингу SKIOLD у кооперації з Tornum (Швеція) [5]. Обладнання інстальоване на зернозаготівельних та переробних об'єктах у понад 100 країнах, що підтверджує високу експлуатаційну надійність та адаптивність технології до різних типів зернових та технічних культур.



Рис. 2.1. Аспіраційна установка DAMAS PULCO [5]

Конструкція PULCO базується на принципі горизонтально-вертикального аспіраційного каналу. Ключовою інженерною особливістю є система прецизійного розподілу зернової маси, яка забезпечує формування рівномірного моношару в зоні сепарації. Це гарантує ідентичність аеродинамічного впливу на кожну одиницю матеріалу.

Технічні переваги конструкції:

- динамічна стабільність – усі рухомі компоненти піддаються статичному та динамічному балансуванню, що нівелює передачу вібраційних навантажень на опорні конструкції споруд. Модифікація PULCO S [5] оснащена розширеною

вертикальною аспіраційною камерою. Така конфігурація дозволяє інтенсифікувати повітряний потік для видалення важких домішок без ризику винесення (унесення) кондиційної фракції;

- функціональність – реалізовано можливість інтеграції роздільної камери для фракціонування зерна за масою, що є рідкісною опцією для аспіраторів даного класу;

- ергономіка та екологічність – повністю герметичний корпус забезпечує рівень акустичного тиску не більше 70 дБ(А).

Модельний ряд включає 10 типорозмірів із діапазоном продуктивності 80...300 т/год (по пшениці). Наявні спеціалізовані виконання для дрібнонасінневих культур, солоду та олійних.

Експлуатаційні випробування та дані виробника підтверджують високі сепаруючі здатності агрегату. Завдяки мінімальним втратам цільового продукту, сепаратор є пріоритетним для використання на насінневих лініях, де збереження кожної одиниці посівного матеріалу є критичним.

Компанія Kongskilde Industries (Данія) спеціалізується на розробці систем механізації сільського господарства та пневматичного транспортування. Лінійка обладнання для очищення зерна представлена серією аспіраторів-преочисників KF [6]. Сепаратори серії KF (рис. 2.2) функціонують за принципом одноканальної аспірації з висхідним повітряним потоком. Модельний ряд включає чотири базові модифікації – KF12, KF20, KF40 та KF60 з номінальною продуктивністю від 12 до 60 т/год (діапазон експлуатаційної продуктивності становить 10...80 т/год залежно від вологості та засміченості сировини).

Конструктивна відмінність серії – модульність, що полягає у використанні уніфікованої системи трубопроводів серій ОК або FK зі швидкокороз'ємними з'єднаннями. Це забезпечує високу адаптивність при інтеграції аспіратора в існуючі технологічні лінії після норій, гвинтових конвеєрів або у складі пневмотранспортних мереж.

Конструкція дозволяє встановлювати регулювальний орган (шибер) повітряного потоку в будь-якій точці пневмопроводу, що оптимізує ергономіку

обслуговування. Модель KF40 комплектується автономними опорними конструкціями. Система розрахована на роботу як у циклі завантаження зерна на зберігання, так і при його вивантаженні.

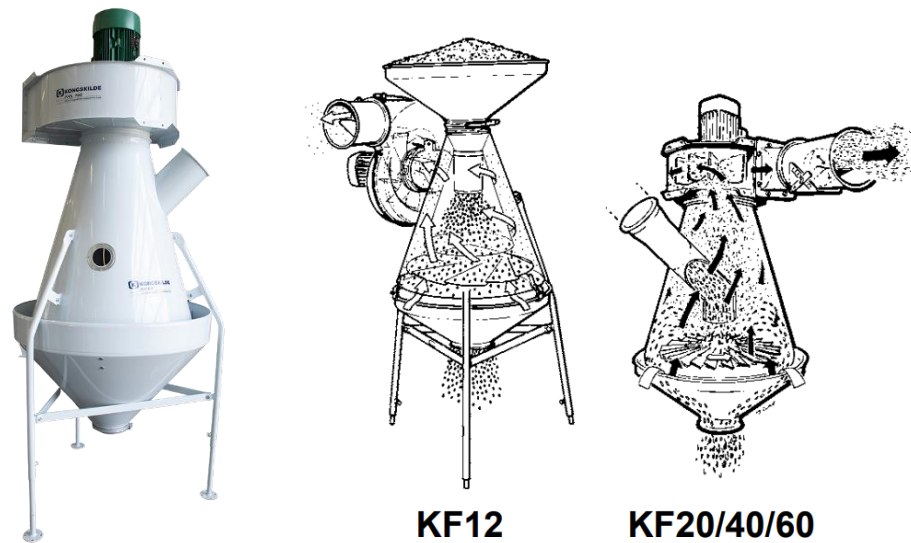


Рис. 2.2. Сепаратор серії KF від Kongskilde Industries [6]

Видалення сепарованих домішок здійснюється за допомогою циклонів серії ОК або спеціалізованих фільтрувальних установок.

Техніко-експлуатаційні параметри аспіраторів серії KF відповідають стандартам ЄС щодо безпеки та акустичного навантаження.

Завдяки модульній архітектурі, витрати на монтаж та переналагодження системи при зміні виду оброблюваної сільськогосподарської культури мінімізовані, що підвищує загальну рентабельність експлуатації обладнання.

Результати промислової експлуатації аспіраторів серії KF підтверджують високу точність розділення фракцій за умови дотримання регламентованих параметрів налаштування повітряного потоку. Показник ефективності вилучення пилової фази та легких сторонніх включень становить 95...98%. Такий рівень очищення досягається завдяки стабілізації швидкості висхідного потоку в робочій зоні каналу. Питома витрата електричної енергії варіюється в межах 0,06...0,14 кВт·год/т, що корелює з показниками провідних світових аналогів і забезпечує низьку собівартість первинної обробки зерна.

Вітчизняний виробник ТОВ «ОЛІС» (Україна) [7] представляє лінійку повітряних сепараторів замкнутого циклу серій ВСЗ (базова) та ВСЗМ (модернізована), а також пристрої з розімкненим циклом повітря ВСН, аспіраційні колонки КАО та сепаратори СВО (рис. 2.3). Модельний ряд серії СВО розрахований на високу пропускну здатність у діапазоні до 150 т/год.



Рис. 3.3. Сепаратор СВО ТОВ «ОЛІС» [7]

Сепаратор СВО-1 зазвичай позиціонується як обладнання для фракціонування продуктів шелушіння або попереднього очищення. СВО-1 оснащений механізмами тонкого регулювання швидкості повітря в зоні сепарації, що дозволяє відбирати домішки, які за аеродинамічними властивостями лише незначно відрізняються від основного продукту (наприклад, видалення лузги з крупи).

На відміну від статичних каналів, у СВО-1 часто застосовується вібруючий лоток або живильник, що розріджує шар продукту перед подачею в повітряний потік. Це запобігає «злипанню» часток і підвищує експозицію кожної одиниці матеріалу. Агрегат має малу площу забудови, що дозволяє інтегрувати його у вже діючі лінії крупозаводів, де простір обмежений.

Конструкція передбачає наявність оглядових вікон з органічного скла для моніторингу процесу сепарації в реальному часі та оперативної корекції режиму.

Модель СВО зазвичай розрахована на малі потоки сировини. Вона не підходить для великих елеваторів, де потрібна потужність від 150 т/год. При підвищеній вологості зерна (понад 17...18%) ефективність вібророзподілу різко знижується, що призводить до нерівномірності повітряного очищення. СВО-1 переважно працює за розімкненим циклом, що вимагає підключення до централізованої системи аспірації будівлі або встановлення окремого циклону з вентилятором.

Через високу інтенсивність повітряного потоку при роботі з дрібним насінням (рапс, мак) існує ризик підвищеного винесення кондиційного продукту у відходи без встановлення додаткових частотних перетворювачів на вентиляторі.

Сепаратор СВО-1 є оптимальним рішенням для фінальних стадій очищення та круповиробництва, де якість розділення важливіша за валову продуктивність.

Таким чином, DAMAS PULCO вирізняється найбільш широким діапазоном продуктивності (80...300 т/год) в одній лінійці та унікальною можливістю фракціонування зерна за масою завдяки додатковій роздільній камері. Саме ця функція робить PULCO незамінним у насіннєвій промисловості, де критично важливе розподілення зерна за питомою масою.

Сепаратори KF відзначаються найвищою гнучкістю монтажу завдяки модульній трубній системі ОК/ФК. Для господарств, де технологічна схема часто переглядається або де потрібна мобільність обладнання, KF є оптимальним рішенням. Однак лінійка типорозмірів (12...60 т/год) не перекриває великих потоків – для об'єктів із продуктивністю понад 60 т/год доведеться паралельно встановлювати декілька машин.

Повітряні сепаратори СВО «ОЛІС» є оптимальним рішенням для невеликих і середніх елеваторів і зернопереробних підприємств. Суттєва перевага – нижча вартість порівняно з імпортними аналогами за порівняного рівня ефективності.

2.2. Обґрунтування напрямку досліджень.

У класичних машинах (Damas, KF, CBO) зерно рухається за законом вільного падіння. Це означає, що швидкість частинки постійно зростає, а час її перебування в зоні сепарації – критично малий.

Критичний аналіз експлуатаційних параметрів турбінних сепараторів дозволив виявити пряму залежність між рівнем завантаження пневмосепараційного каналу (ПСК) та деградацією якісних показників очищення при одночасному зростанні питомих енерговитрат [2, 3].

Основна проблема сучасних конструкцій з активними розподільниками полягає в обмеженості механізму формування рівномірного шару зерноsumіші при збільшенні продуктивності [2, 12]. Підвищення частоти обертання розподільника (для розрідження потоку) призводить до зростання вектору початкової швидкості переміщення часток у каналі. Це скорочує час експозиції (взаємодії) зерна з повітряним потоком, що унеможливорює повне вилучення легких домішок. У разі збереження низької частоти обертання при високій подачі, товщина шару зернової маси стає критичною – повітряний потік не здатний подолати аеродинамічний опір щільного шару, що призводить до проскакування домішок у кондиційну фракцію.

Для подолання вказаних недоліків та інтенсифікації процесу сепарації, нами запропоновано зміну геометрії робочої зони. Перспективним напрямком є перехід до ПСК кільцевого перерізу із зигзагоподібним профілем [3] (рис. 2.4).

Переваги зигзагоподібної конфігурації наступні. Збільшення траєкторії руху – багаторазова зміна напрямку руху зерноsumіші подовжує час її перебування в активній зоні повітряного потоку без збільшення висоти агрегату.

У місцях перегину каналу відбувається перерозподіл часток у шарі, що сприяє їх активному розпушенню. Це дозволяє повітрю ефективно проникати крізь масу навіть при збільшеній товщині потоку.

Геометрія каналу сприяє вирівнюванню епюри швидкостей повітряного потоку по всьому перерізу, що мінімізує зони «проскоку» домішок.

Впровадження даного технічного рішення дозволяє стабілізувати ефективність фракціонування в широкому діапазоні питомих завантажень, нівелюючи недоліки традиційних активних розподільників [2, 3, 9].

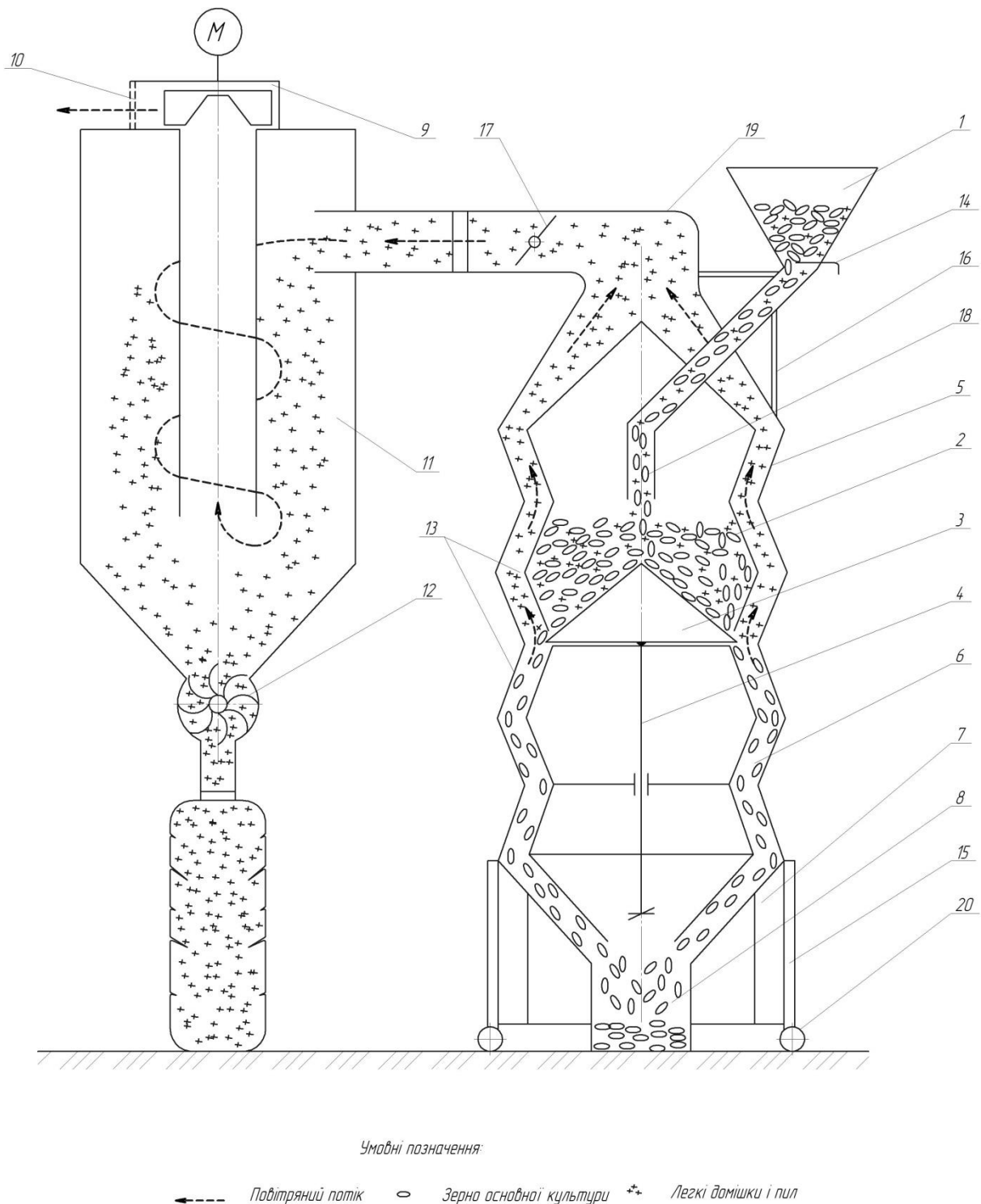


Рис. 2.4. ПСК кільцевого перерізу із зигзагоподібним профілем

Принцип функціонування розробленого пневмосепаратора базується на аеродинамічному розділенні фракцій у вертикальному висхідному потоці, проте

має низку конструктивних удосконалень, спрямованих на підвищення прецизійності розподілу матеріалу.

Вихідна засмічена насіннева суміш надходить до приймального бункера 1, жорстко зафіксованого на опорній рамці 16 (рис. 2.4). Регулювання інтенсивності подачі здійснюється за допомогою шиберної заслінки 14. З приймального вузла матеріал через направляючий патрубок 18, встановлений суворо співвісно з головною віссю агрегату, спрямовується до накопичувального бункера 2. Така орієнтація патрубку забезпечує радіально-симетричне заповнення об'єму бункера та рівномірний гідродинамічний тиск маси на дозуючі елементи.

Для формування стабільного та розсередженого потоку зерноsumіші застосовано конус-дозатор 3. Конструктивною особливістю конуса є його перфорована робоча поверхня, що має нахил від центра до периферії. Це сприяє попередньому розпушенню суміші ще до моменту її потрапляння в зону сепарації. Керування товщиною шару та величиною питомого завантаження пневмосепараційного каналу (ПСК) 6 реалізується через зміну положення регулювальної штанги 4.

Процес сепарації адаптується під фізико-механічні властивості конкретної культури шляхом прецизійного налаштування повітряного режиму. Встановлення оптимальної швидкості повітря в ПСК здійснюється за допомогою регулюючої заслінки 17, інтегрованої в трубопровід перехідного дифузора 19. Моніторинг динаміки фазового розділення та стану «киплячого шару» в зоні аспірації забезпечується через оглядове вікно 13, розташоване на зовнішньому корпусі 5.

Агрегат спроектований у стаціонарному виконанні на базі несучої рами 15. Проте для підвищення експлуатаційної гнучкості в умовах складських приміщень або критих токів, конструкція передбачає наявність транспортувальних коліс 20, що дозволяє оперативно переміщувати сепаратор у межах робочого майданчика.

Висновки по розділу

У результаті проведеного аналізу конструкцій та принципів роботи сучасних вітчизняних і закордонних турбінних сепараторів (DAMAS, Kongskilde, «ОЛІС»), а також обґрунтування запропонованої модернізації ПСК, зроблено наступні висновки.

Встановлено, що ключовою умовою якісного функціонування пневмосепараторів є забезпечення високого ступеня рівномірності розподілу зернової маси в робочій зоні. Сучасні активні розподільники (ротаційні, вібраційні) мають обмеження при підвищенні продуктивності, що призводить або до збільшення товщини шару, або до скорочення часу перебування зерна в потоці повітря.

Запропоновано перехід до пневмосепараційного каналу кільцевого перерізу з зигзагоподібним профілем. Така конфігурація теоретично дозволяє збільшити тривалість взаємодії фаз та забезпечити інтенсивне розпушення зернового потоку за рахунок переорієнтації часток у місцях перегину каналу.

Подальший етап роботи передбачає побудову математичної моделі, яка повинна висвітлити наступні аспекти. Визначення диференціальних рівнянь руху одиничної зернівки та частинки домішки у зигзагоподібному повітряному каналі з урахуванням сил аеродинамічного опору та відцентрових сил у місцях перегину. Встановлення раціональних параметрів кута нахилу та кроку зигзага для забезпечення максимального часу сепарації при збереженні безперервності потоку.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

Виконаємо детальний теоретичний аналіз руху часток зерносуміші у зигзагоподібному пневмоканалі. Для цього розглянемо кільцевий зигзагоподібний канал з внутрішнім радіусом R_1 та зовнішнім R_2 . В аналізі використаємо циліндричну систему координат (r, φ, z) [16, 17], де:

z – вертикальна вісь, спрямована у протилежному силі тяжіння напрямку;

r – радіальна координата;

φ – кутова координата.

Згідно геометрії зигзагоподібного каналу кожен його сегмент відхилений від вертикалі на кут α і має довжину $L_{сегм}$ (рис. 3.1). При переході між сегментами канал змінює напрямок на кут 2α :

$$z(s) = s \cdot \cos \alpha ,$$

$$x(s) = (-1)^n \cdot s \cdot \sin \alpha ,$$

де s – координата вздовж осі каналу, n – номер сегменту.

На зернину в повітряному потоці будуть діяти наступні сили (рис. 3.1):

- сила тяжіння:

$$F_g = m \cdot g = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{ч.е}^3 \cdot \rho_з \cdot g ,$$

де $r_{ч.е}$ – радіус частки (еквівалентний);

$\rho_з$ – густина частки;

g – прискорення, що виникає при вільному падінні частки.

де C_d – коефіцієнт, який є характеристикою аеродинамічного опору;

ρ_n – величина густини повітря;

$A = \pi r^2$ – площа міделевого перерізу частки;

$V_6 = V_n - V_3$ – величина відносної швидкості частки, яка характеризує різницю швидкості повітряного потоку і швидкості частки.

- сила Магнуса, що виникає при обертанні часток:

$$F_M = \frac{1}{2} \cdot C_M \cdot \rho_n \cdot A \cdot \omega \cdot r_{c.e} \cdot |V_6|,$$

де C_M – коефіцієнт Магнуса;

ω – кутова швидкість, з якою обертається частка в повітряному потоці.

- сила приєднаних мас:

$$F_{np} = \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot (dV_3 / dt),$$

де $m_n = \frac{2}{3} \pi \cdot r_{c.e}^3 \cdot \rho_n$ – маса приєданого повітря.

- сила Бассе, яка є нестационарною складовою:

$$F_B = \left(6r_{c.e}^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \rho_n \cdot \mu} \right) \cdot \int_0^t \left[d(V_n - V_3) / dt / \sqrt{(t - \tau)} \right] \cdot d\tau,$$

де μ – значення динамічної в'язкості повітряного середовища.

Загальне векторне рівняння диференціального рівняння руху матиме вигляд:

$$m_{ef} \cdot \frac{dV_3}{dt} = F_g + F_a + F_M + F_B,$$

де $m_{ef} = m + m_{np}$ – ефективна маса частки.

Розглянемо проекції зазначених сил відносно прийнятих осей координат:

- s -напрямок:

$$m_{ef} \cdot \frac{dV_s}{dt} = -m \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2 \cdot (V_n - V_s)^2}{2 \cdot \text{sign}(V_n - V_s)};$$

- n -напрямок, тобто по нормалі:

$$m_{ef} \cdot \frac{dV_n}{dt} = -m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_{Ц} + F_{M,n};$$

- радіальний r -напрямок:

$$m_{ef} \cdot \frac{dV_r}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial r_{q.e}} + F_{Видц}.$$

Виконаємо аналіз переміщення, що відповідає прямому сегменту зигзагу.

Тут будемо спостерігати декілька варіантів переміщення.

Усталений рух, при $V_s = \text{const}$. У встановленому режимі $dV_s/dt = 0$, тому:

$$0 = -m \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2 \cdot (V_n - V_s)^2}{2}.$$

Звідси швидкість зернини відносно каналу:

$$V_s = V_n - \sqrt{\frac{2m \cdot g \cdot \cos \alpha}{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2}},$$

або через швидкість витання $V_{\text{вум}}$:

$$V_{\text{вум}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{\text{ч.е}}^2}} = \sqrt{\frac{8 \cdot r_{\text{ч.е}} \cdot \rho_3 \cdot g}{3 \cdot C_d \cdot \rho_n}},$$

тоді:

$$V_s = V_n - V_{\text{вум}} \cdot \sqrt{\cos \alpha}.$$

Критеріями руху часток будуть:

- якщо $V_n > V_{\text{вум}} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$ – частка рухається вгору (видувається);
- якщо $V_n < V_{\text{вум}} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$ – частка рухається вниз (осідає);
- якщо $V_n = V_{\text{вум}} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$ – частка зависає в потоці.

Далі розглянемо нестационарний рух (розгін часток). При вході в канал частки мають початкову швидкість V_0 і прискорюється/сповільнюється до швидкості V_s .

Рівняння руху буде мати вигляд:

$$m_{\text{эф}} \cdot \frac{dV}{dt} = -m \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{\text{ч.е}}^2 \cdot (V_n - V)^2}{2}.$$

Введемо безрозмірні змінні:

$$V' = V / V_{\text{вум}}; V'_n = V_n / V_{\text{вум}}; t' = t \cdot g / V_{\text{вум}},$$

отримаємо:

$$\frac{dV'}{dt'} = -\beta \cdot \cos \alpha - (V'_n - V')^2,$$

де $\beta = m_{ef} / m$ – коефіцієнт приєднаних мас ($\beta \approx 1,5 \dots 2,0$).

Розв'язок наведеного рівняння виконаємо методом Рунге-Кутта [16, 17] або аналітично для спрощеного випадку:

$$V'(t') = V'_n - \sqrt{\beta \cdot \cos \alpha} \cdot \tanh\left(\sqrt{\beta \cdot \cos \alpha} \cdot t' + C\right),$$

де константа C визначається з початкових умов.

Тривалість релаксації, тобто час, за який частка досягає 95% від V_s :

$$\tau_{rel} = \frac{2 \cdot m \cdot V_{sum}}{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2 \cdot V_n} = \frac{4 \cdot r_{q.e} \cdot \rho_3}{3 \cdot C_d \cdot \rho_n \cdot V_n}.$$

Розглянемо переміщення у поперечному напрямку. Оскільки канал нахилений під кутом α , частка відчуває поперечну компоненту сили тяжіння:

$$F_{non} = m \cdot g \cdot \sin \alpha,$$

що призводить до її дрейфу до нижньої стінки сегменту:

$$m \cdot \frac{dV_n}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \alpha - \frac{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2 \cdot V_n^2}{2},$$

з граничною швидкістю:

$$V_{n,max} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha}{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{q.e}^2}} = V_{sum} \cdot \sqrt{\sin \alpha},$$

а тривалість дрейфу до стінки (при ширині каналу d) становитиме:

$$t_{\text{опф}} = \frac{d}{V_{n,\text{max}}} = \frac{d}{V_{\text{сум}} \cdot \sqrt{\sin \alpha}}.$$

Виконаємо аналіз руху в зоні зміни напрямку (зигзагу). При зміні напрямку каналу на кут 2α виникає відцентрова сила:

$$F_{\text{від}} = \frac{m \cdot V^2}{R_{\text{зигз}}},$$

де $R_{\text{зигз}}$ – радіус кривизни траєкторії повітряного потоку в зоні зигзагу;
а величина відцентрового прискорення становитиме:

$$a_{\text{від}} = \frac{V_s^2}{R_{\text{зигз}}}.$$

Частки, що рухаються зі швидкістю V_s , намагаються зберегти прямолінійний рух за інерцією, тоді як повітряний потік змінює напрямок. Це призводить до відхилення траєкторії часток від осі каналу.

Розглянемо перехід між двома сегментами. Повітряний потік змінює напрямок різко (за відстань $\sim (0,5 \dots 1)D$), тоді як частка продовжує рух за інерцією. Радіус інерційного відхилення:

$$\delta_{\text{ін}} = \frac{m \cdot V_s^2}{F_a} = \frac{2 \cdot m \cdot V_s^2}{C_d \cdot \rho_n \cdot \pi \cdot r_{\text{ч.е}}^2 \cdot V_n^2}.$$

З врахуванням $m_n = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{\text{ч.е}}^3 \cdot \rho_z$:

$$\delta_{in} = \frac{8 \cdot r_{ч.е} \cdot \rho_3 \cdot V_s^2}{3 \cdot C_d \cdot \rho_n \cdot V_n^2}.$$

Величина параметра інерційності Стокса [14, 15] матиме значення:

$$Stk = \frac{\tau_{rel} \cdot V_s}{L_{зигз}},$$

де $L_{зигз}$ – характерний розмір зони зміни напрямку.

Критеріями тут виступають наступні умови:

$Stk \ll 1$ – частинка повністю слідує за потоком (легкі домішки);

$Stk \gg 1$ – частинка рухається за інерцією (важкі зерна);

$Stk \approx 1$ – проміжний режим.

Якщо $\delta_{in} > d / 2$, то частка може зіткнутися з зовнішньою стінкою зигзагу, при цьому умова зіткнення матиме вигляд:

$$\frac{8 \cdot r_{ч.е} \cdot \rho_3 \cdot V_s^2}{3 \cdot C_d \cdot \rho_n \cdot V_n^2} > d / 2.$$

При зіткненні відбувається втрата енергії (непружне відбиття), зміна траєкторії руху, обертання частки (виникнення ω).

Аналіз залежностей (рис. 3.2) показує, що легкі домішки (полова, пил, лушпиння), які характеризуються наступними властивостями: $\rho_{л\partial} \approx 100...400 \text{ кг/м}^3$, $r_{л\partial} \approx 0,5...3 \text{ мм}$, $V_{вит,л\partial} \approx 2...5 \text{ м/с}$, через малу масу ($Stk \ll 1$) практично повністю слідує за повітряним потоком, змінюючи напрямок разом з ним. У кожному сегменті виконується умова $V_n > V_{вит,л\partial} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$, тому легкі домішки піднімаються вгору.

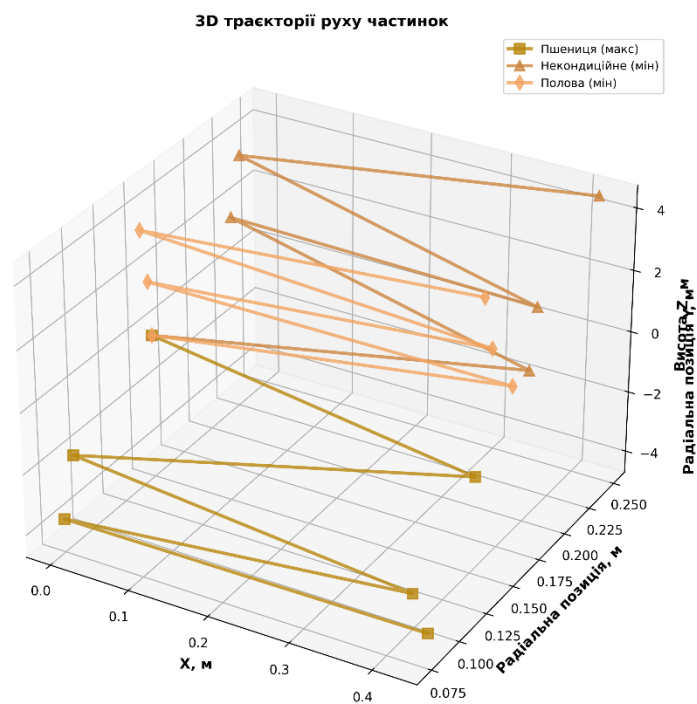
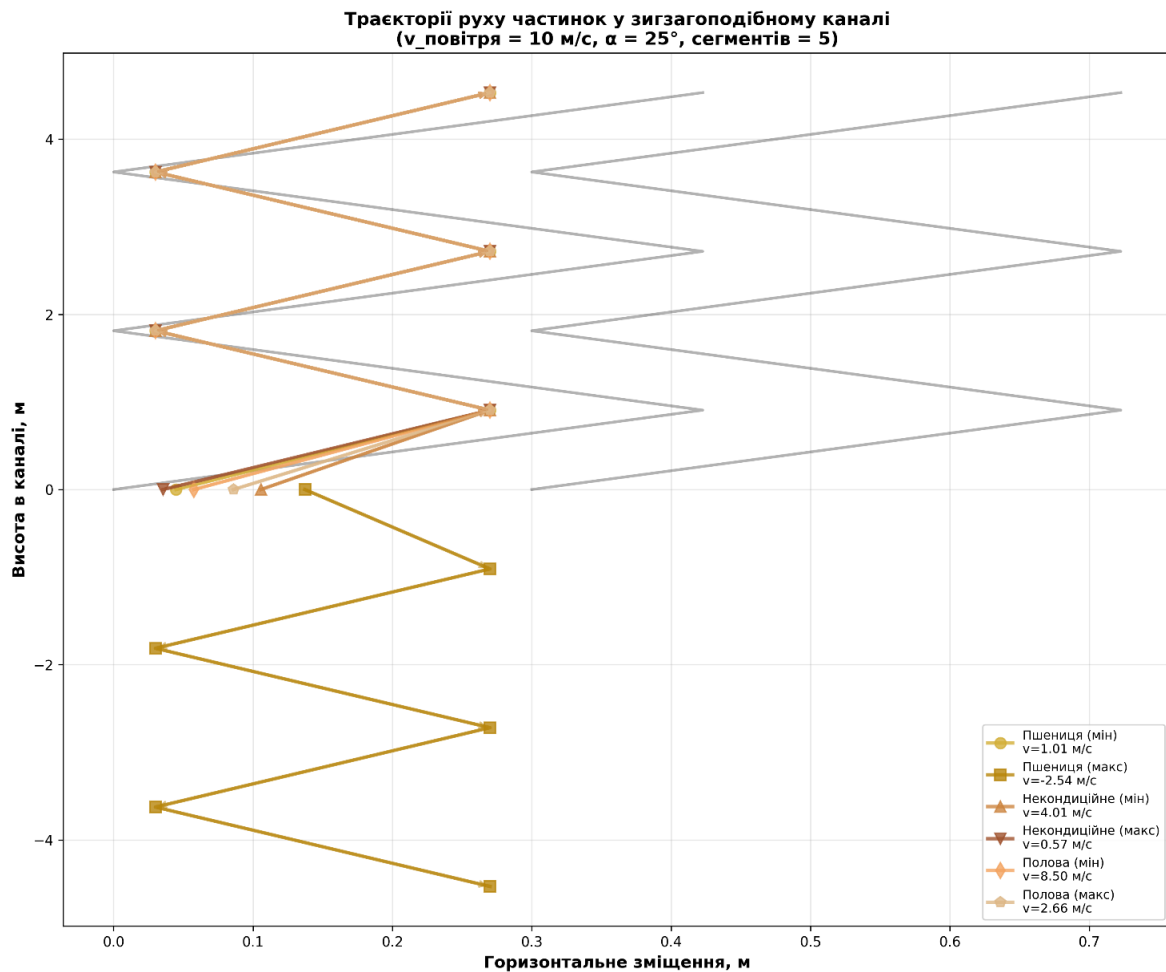


Рис. 3.2. Диференціація частинок у зигзагоподібному каналі

Важкі зернини (пшениця, ячмінь), які мають властивості: $\rho_3 \approx 1200 \dots 1400$ кг/м³, $r_3 \approx 1,5 \dots 3$ мм, $V_{вум,3} \approx 8 \dots 12$ м/с, через велику масу ($Stk > 1$) зберігають напрямок руху при зміні напрямку потоку. Якщо $V_n < V_{вум,3} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$, зернини рухаються вниз, незважаючи на зигзаги.

Введемо коефіцієнт розділення $K_{роз}$ як відношення траєкторій легких та важких частинок:

$$K_{роз} = \frac{\delta_{ін,3}}{\delta_{ін,лд}} = \frac{r_3 \cdot \rho_3}{r_{лд} \cdot \rho_{лд}},$$

величина якого для типових значень становитиме:

$$K_{роз} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1300}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 300} \approx 8,7.$$

Це означає, що важкі зернини відхиляються майже у 9 разів більше, ніж легкі домішки, що забезпечує ефективне розділення.

Дослідимо вплив кута нахилу стінок зигзагоподібного каналу α на траєкторію руху (рис. 3.3).

З рівняння $V_s = V_n - V_{вум} \cdot \sqrt{\cos \alpha}$ бачимо, що:

$$\frac{dV_s}{d\alpha} = \frac{V_{вум} \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \sqrt{\cos \alpha}}.$$

При збільшенні α швидкість зернини зростає (за умови $V_n = \text{const}$), що призводить до: зменшення часу перебування в сегменті, збільшення інерційного відхилення.

Критерієм оптимальності є максимізація різниці траєкторій при мінімізації гідравлічних втрат.

Аналіз показує (рис. 3.3), що при $\alpha < 15^\circ$ спостерігається малий ефект розділення, при $\alpha = 20...25^\circ$ матимемо оптимальне розділення та помірні гідравлічні втрати.

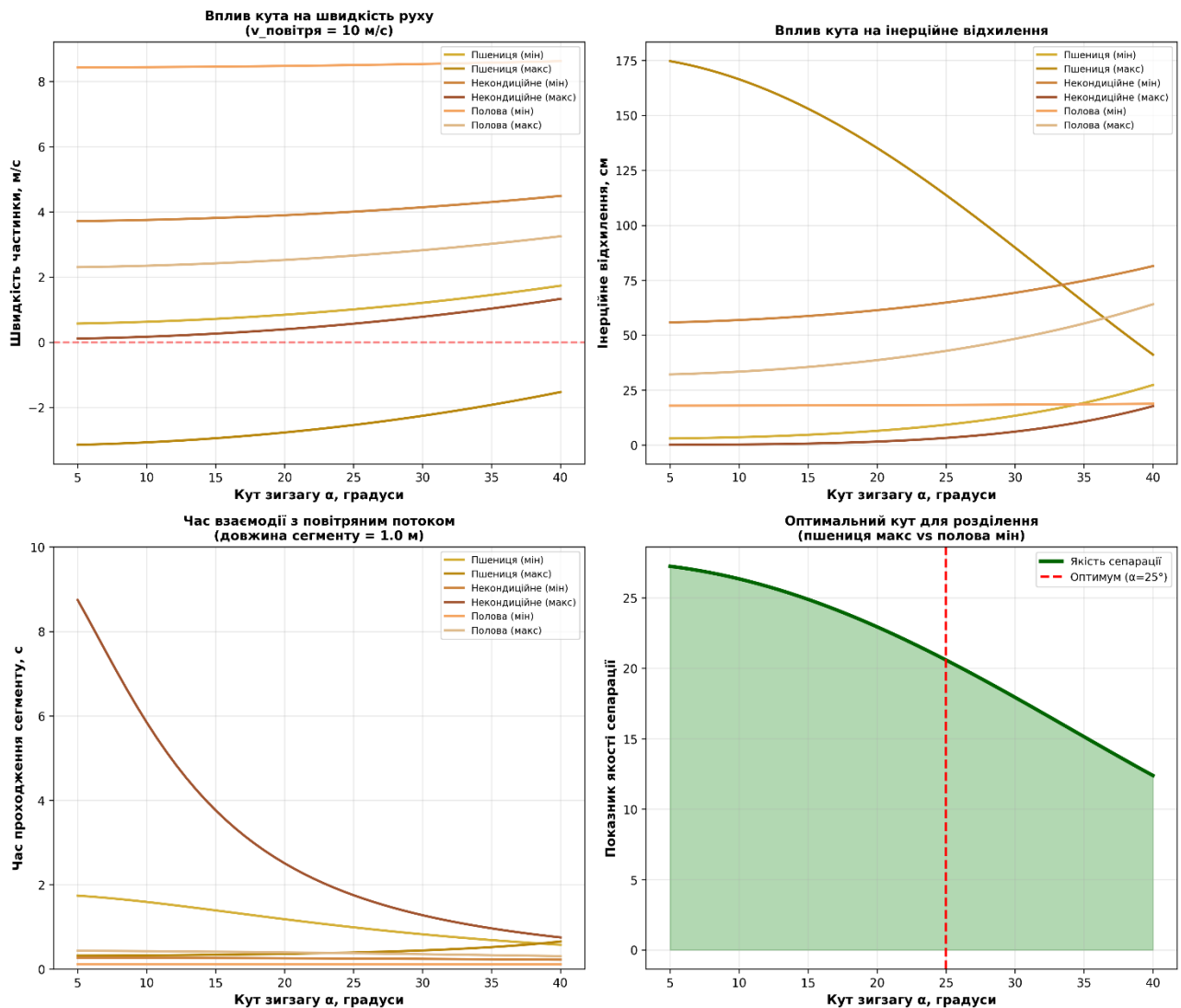


Рис. 3.3. Залежність кута нахилу стінок зигзагоподібного каналу α на траєкторію руху та якість сепарації

При $\alpha > 30^\circ$ спостерігаються надмірні втрати тиску, можливе зіткнення зернин зі стінками, а турбулентність стає надто інтенсивною.

Далі проаналізуємо вплив параметрів зигзагоподібного пневмоканалу на тривалість взаємодії зерноsumіші з повітряним потоком (рис. 3.4).

У прямому вертикальному каналі висотою H зерноsumіш проходить шлях $L_{np} = H$, у зигзагоподібному каналі з n сегментами:

$$L_{зигз} = n \cdot L_{сезм} = \frac{n \cdot H}{n \cdot \cos \alpha} = \frac{1}{\cos \alpha} H.$$

Таким чином, одержимо збільшення шляху на величину:

$$\Delta L = L_{зигз} - L_{пр} = H \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right),$$

що, наприклад, для кута $\alpha = 25^\circ$ становитиме $\Delta L = 0,104 \cdot H$, тобто 10% висоти каналу (рис. 3.4).

Тривалість руху в каналі для важких часток (зернин що рухаються вниз) (рис. 3.4):

$$t_3 = \frac{L_{зигз}}{V_3} = \frac{H}{V_3 \cdot \cos \alpha},$$

$$\text{де } V_3 = V_{вит,з} \cdot \sqrt{\cos \alpha} - V_n.$$

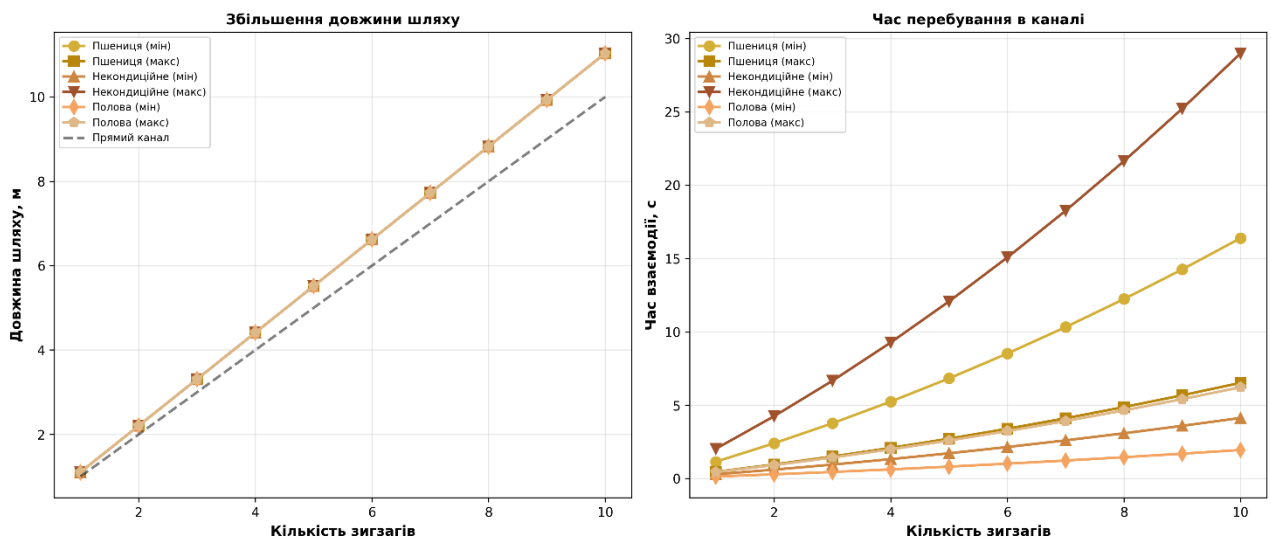


Рис. 3.4. Залежність тривалості взаємодії зерноsumіші з повітряним потоком від параметрів зигзагоподібного пневмоканалу

Відносне збільшення часу становитиме:

$$\frac{\Delta t}{t_{np}} = \frac{1}{\cos \alpha} - 1,$$

і для $\alpha = 25^\circ$ становитиме $\Delta t \approx +10\%$.

Також в зонах зміни напрямку сегменту спостерігається додатковий ефект турбулізації, через що у цих зонах виникає додаткова затримка через утворення вихорів – частинка може потрапити у вихор і затриматися, зміну швидкості – при зміні напрямку потік сповільнюється, зіткнення – непружні зіткнення гальмують рух. Це додає ще 5...8% до часу взаємодії, тому загальне збільшення тривалості взаємодії становитиме 15...18%.

Далі розглянемо розподіл концентрації частинок по перерізу каналу, для чого використаємо рівняння конвективної дифузії.

Для розподілу концентрації $C(r, z, t)$ використаємо рівняння [10, 14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_n \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - V_{oc} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D_{турб} \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right),$$

де V_n – швидкість повітряного потоку,

V_{oc} – швидкість осідання частинок;

$D_{турб}$ – коефіцієнт турбулентної дифузії.

Дослідимо вплив зигзагів і їх кількості на розподіл фракцій (рис. 3.5).

Для зигзагоподібного каналу збільшення коефіцієнта турбулентної дифузії становитиме:

$$D_{турб, зигз} = D_{турб, пр} \cdot (1 + k_{турб} \cdot \sin 2\alpha),$$

де $k_{турб} \approx 0,3 \dots 0,5$ – емпіричний коефіцієнт [14].

При кожній зміні напрямку відбувається «перемішування», яке вирівнює концентрацію:

$$C(r, z_{i+1}) = C_{cep} + \lambda \cdot (C(r, z_i) - C_{cep}),$$

де $\lambda < 1$ – коефіцієнт збереження градієнта ($\lambda \approx 0,6 \dots 0,8$).

Після проходження n зигзагів будемо спостерігати:

$$\sigma_{C, zigz} = \sigma_{C, поч} \cdot \lambda^n,$$

де σ_C – стандартне відхилення концентрації.

Для $n = 4$ і $\lambda = 0,7$:

$$\sigma_{C, zigz} = 0,24 \sigma_{C, поч},$$

тобто нерівномірність зменшується у близько 4 рази.

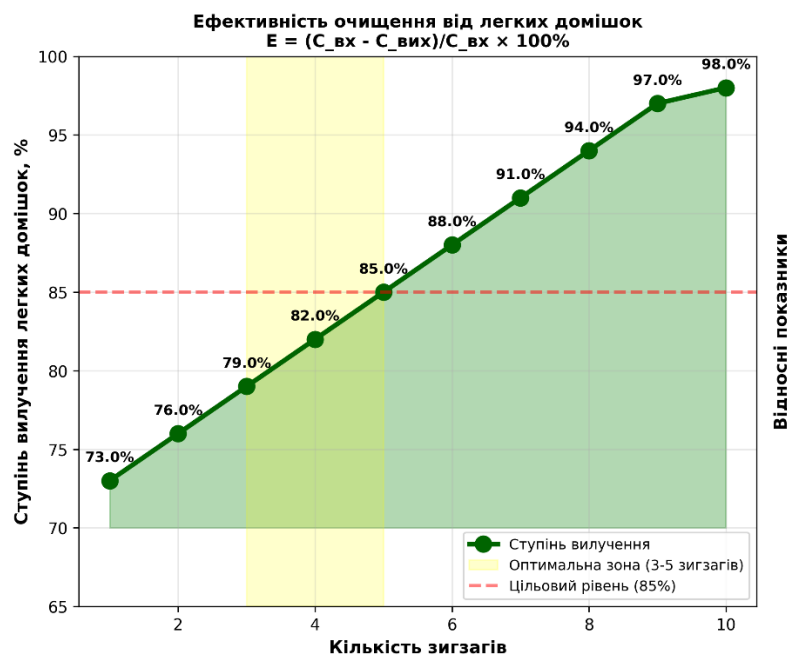


Рис. 3.5. Ефективність очищення зерноsumіші від легких домішок у зигзагоподібному каналі

Таким чином, проаналізувавши залежності (рис. 3.5), можемо констатувати, що розділення на фракції відбувається за рахунок різниці інерційних відхилень ($K_{роз} \approx 9$), багаторазової сепарації (n зигзагів), рівномірнішого розподілу по перерізу, при цьому раціональний кут нахилу

сегментів становить $\alpha = 22...25^\circ$, а ефективність очищення зростає на 12...18% порівняно з прямим каналом (3.6).

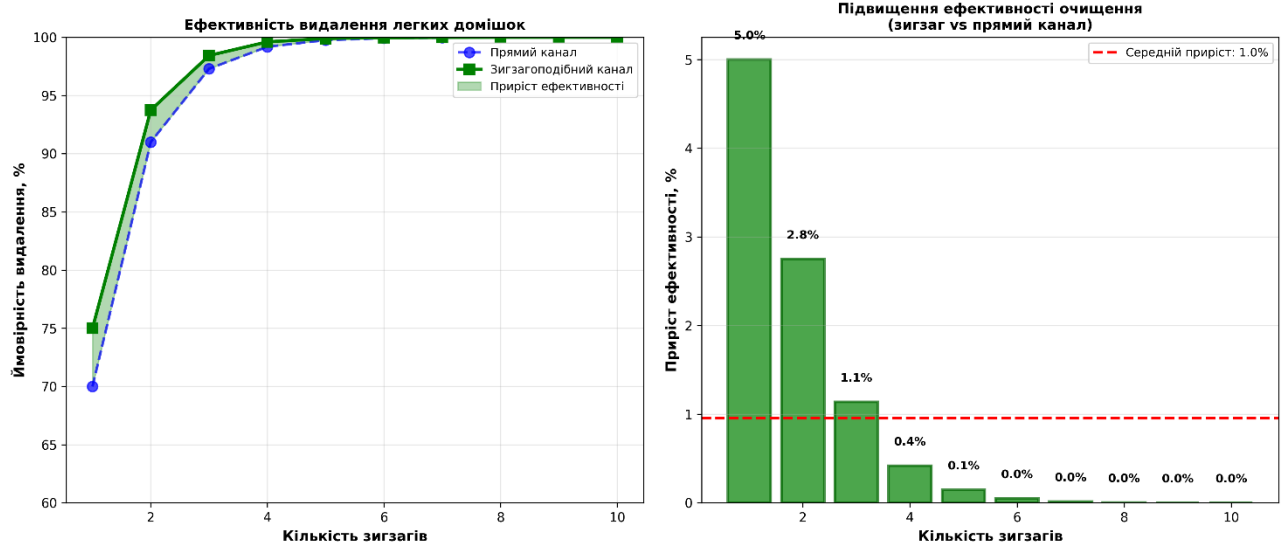


Рис. 3.6. Порівняльна характеристика ефективності видалення домішок у кільцевому пневмоканалі зигзагоподібної і прямої форми

Висновки по розділу

На основі проведеного комплексного теоретичного аналізу динаміки двофазного потоку в кільцевому зигзагоподібному каналі можна сформулювати наступні висновки.

Розроблена диференціальна модель руху враховує не лише базові сили тяжіння та аеродинамічного опору, а й специфічні складові: силу Магнуса (обумовлену самообертанням зерна), силу Бассе (враховує нестационарність процесу) та вплив приєднаних мас. Це дозволяє з високою точністю описувати траєкторію часток у зонах різкої зміни напрямку потоку, де виникають значні градієнти швидкостей.

Встановлено, що ключовим параметром розділення суміші є інерційність часток, яка описується числом Стокса. Для легких домішок їх частки практично миттєво адаптуються до зміни вектора швидкості повітря, рухаючись по викривленій траєкторії каналу без зіткнень зі стінками, а для важких зерен переважають сили інерції, що призводить до відхилення від ліній току повітря та циклічних зіткнень із зовнішніми стінками сегментів.

Коефіцієнт розділення підтверджує, що інерційне відхилення зерна майже вдесятеро перевищує аналогічний показник для легких фракцій, що створює передумови для чіткої диференціації потоків.

Аналіз впливу конструктивних параметрів показав, що раціональним діапазоном кута нахилу зигзагів є $22 \dots 25^\circ$. При $\alpha < 15^\circ$ ефект зигзага нівелюється, а при $\alpha > 30^\circ$ різко зростають гідравлічні втрати та турбулізація, що може призвести до винесення повноцінного зерна у відходи.

Зигзагоподібна форма збільшує шлях і час взаємодії часток з повітрям на $15 \dots 18\%$ порівняно з прямими каналами за рахунок геометричного фактору та зон локальних вихорів.

Застосування рівняння конвективної дифузії дозволило довести, що кожен перегин каналу виконує роль «змішувача», який вирівнює концентрацію зерна по перерізу. Встановлено, що при кількості сегментів $n = 4$ нерівномірність розподілу часток зменшується у 4 рази, що запобігає утворенню застійних зон та підвищує ймовірність винесення легкої домішки з об'єму зернового шару.

Теоретично обґрунтовано, що використання зигзагоподібної конфігурації забезпечує приріст ефективності очищення зерноsumіші на $12 \dots 18\%$ відносно базових вертикальних пневмосепаруючих каналів при збереженні стабільних енергетичних витрат.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Конструкторський розрахунок геометричних параметрів

Вихідними даними для розрахунку приймемо наступні:

- продуктивність по зерну: $G_z = 5 \text{ т/год} = 1,39 \text{ кг/с}$;
- кут нахилу сегментів: $\alpha = 25^\circ$;
- швидкість витання пшениці: $V_{vit,z} = 10 \text{ м/с}$;
- швидкість витання легких домішок: $V_{vit,ld} = 3,5 \text{ м/с}$;
- робоча швидкість повітряного потоку: $V_n = 6 \text{ м/с}$;
- кількість сегментів: $n = 4 \text{ шт.}$

Площа перерізу каналу для кільцевого каналу, щоб уникнути забивання та забезпечити розрахункову швидкість становитиме:

$$A = \frac{G_z}{\rho_z \cdot V_n \cdot \psi},$$

де $\rho_z = 750 \text{ кг/м}^3$ – насипна щільність зерноsumіші;

$\psi = 0,05 \dots 0,1$ – коефіцієнт заповнення перерізу.

Приймемо ширину кільцевого зазору $\delta = 0,05 \text{ м}$, тоді площа для проходу повітря при зовнішньому діаметрі $D_2 = 0,4 \text{ м}$ [21, 22]:

$$A = \pi \cdot D_{сер} \cdot \delta = 3,14 \cdot 0,35 \cdot 0,05 = 0,055 \text{ м}^2.$$

Розрахуємо параметри зигзагів, враховуючи висоту сепарувальної частини $H = 1,2 \text{ м}$:

- довжина шляху повітряного потоку:

$$L_{зигз} = \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{1,2}{\cos 25} = 1,32 \text{ м};$$

- довжина одного сегмента:

$$L_{сегм} = \frac{1,32}{4} = 0,33 \text{ м.}$$

4.2. Аеродинамічний розрахунок

Витрата повітря Q [21]:

$$Q = 3600 \cdot A \cdot V_n = 3600 \cdot 0,055 \cdot 6 = 1200 \text{ м}^3/\text{год} = 0,33 \text{ м}^3/\text{с.}$$

При розрахунку втрат тиску будемо розраховувати опір пневмоканалу без навантаження та окремо додамо вплив зерноsumіші.

Опір тертя:

$$\Delta P_m = \nu \cdot \frac{L_{заг}}{D_{екв}} \cdot \frac{\rho_n \cdot V_n^2}{2} = 0,03 \cdot \frac{1,32}{0,1} \cdot \frac{1,2 \cdot 6^2}{2} = 8,5 \text{ Па.}$$

Місцеві опори зигзагів для 4-х поворотів на кут $2\alpha = 50^\circ$, при коефіцієнті опору повороту $\zeta = 0,4$:

$$\Delta P_{mic} = \mu \cdot \zeta \cdot \frac{\rho_n \cdot V_n^2}{2} = 4 \cdot 0,4 \cdot \frac{1,2 \cdot 6^2}{2} = 35 \text{ Па.}$$

Опір зернового навантаження у зигзагоподібних каналах через інерційні удари значний, при концентрації $\sigma = 3 \text{ кг/кг}$:

$$\Delta P_3 = \sigma \cdot \Delta P_y \cdot \kappa = 3 \cdot 43,5 \cdot 1,5 = 195 \text{ Па.}$$

Повний тиск:

$$\Delta P_{нов} = (43,5 + 195) \cdot 1,2 = 286 \text{ Па.}$$

4.3. Енергетичний розрахунок вентилятора

Використовуємо відцентровий вентилятор середнього тиску (наприклад, серії ВЦ 4-75).

Визначимо потужність на валу N , враховуючи ККД вентилятора $\eta_e = 0,7$ та ККД передачі $\eta_n = 0,95$ [22]:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P_{нов}}{1000 \cdot \eta_e \cdot \eta_n} = \frac{0,33 \cdot 286}{1000 \cdot 0,7 \cdot 0,95} = 0,142 \text{ кВт.}$$

Потужність електродвигуна $N_{дв}$ з урахуванням пускових моментів та запасу ($k_3 = 1,2$):

$$N_{дв} = N \cdot k_3 = 0,142 \cdot 1,2 = 0,17 \text{ кВт.}$$

Таблиця 4.1 – Підсумкова таблиця результатів конструкторських розрахунків

Параметр	Значення	Примітка
Діаметр зовнішній/внутрішній	400/300 мм	Забезпечує стабільне кільце
Кількість сегментів	4 шт.	Оптимально для очищення
Робоча витрата повітря	1200 м³/год	Для винесення пилу та лушпиння
Необхідний повний тиск	286 Па	Враховуючи опір зернового шару
Рекомендований двигун	0,25...0,37кВт	Найближчий стандартний номінал

4.4. Ефективність впровадження запропонованого сепаратора

Зважаючи на проведені дослідження і розрахунки, порівняємо прямий та зигзагоподібний кільцеві пневмоканали (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Техніко-економічне порівняння каналів

Показник	Прямий пневмоканал	Зигзагоподібний канал	Ефект / Різниця
Ефективність виділення домішок	75...82%	92...96%	+12...18% до якості очищення
Час контакту зерноsumіші з повітрям	t (базовий)	$1,15...1,18 \cdot t$	Більш тривала сепарація
Чутливість до перевантаження	Висока (утворення перевантажених зон)	Низька (саморозпушення)	Стабільність при коливаннях подачі
Питомі витрати енергії	1,0 кВт/т	1,12...1,15 кВт/т	Незначне зростання витрат
Висота установки (габарити)	100%	85...90%	Компактність при кращій якості
Вартість виготовлення	Базова	+20...30%	Дорожче у виробництві

Висновки по розділу

За результатами інженерно-конструкторських розрахунків, які є логічним продовженням наукових досліджень встановлено, що у прямому каналі частка має лише один шанс бути винесеною потоком. Якщо вона знаходиться всередині щільного зернового шару, вона осяде разом із зерном. У зигзагоподібному каналі на кожному вигині потік змінює напрямок, що призводить до механічного розпушення шару, а це дозволяє повітрю підхопити легку домішку, яка раніше була затінена зернинами.

Як було розраховано, важке зерно за інерцією б'ється об стінки зигзагів, що призводить до гальмування зерна, при цьому воно довше перебуває в зоні

сепарації. При ударі об стінку від зернівки відокремлюються дрібні частки, які миттєво підхоплюються повітрям.

Недоліком прямих кільцевих каналів часто є нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку. Зигзаги працюють як турбулізатори, вирівнюючи швидкість повітря по всьому перерізу.

Тому, хоча конструкція зигзагоподібного каналу дорожча у виготовленні (через складність зварювальних робіт та розкрою металу) і потребує на 15% потужнішого вентилятора, вона окупається за рахунок: зменшення втрат цінного зерна; вищого відсотка видалення домішок, що дозволяє отримати зерно вищої якості за один прохід, виключаючи потребу в повторній сепарації; зменшення габаритів, оскільки при меншій висоті машини досягається та ж чистота матеріалу.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Забезпечення безпечних умов праці під час роботи з турбінними сепараторами базується на ідентифікації та мінімізації впливу специфічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів: механічного травмування рухомими частинами, високої концентрації органічного пилу та акустичного навантаження [24].

До експлуатації допускається обладнання, що пройшло первинне технічне посвідчення та перевірку опору ізоляції електромережі. Корпус сепаратора, електродвигуни та шафи управління повинні мати надійне заземлення згідно з ДСТУ EN 62305:2012, ДСТУ Б В.2.5-82:2016 та ПУЕ [24].

З огляду на високі оберти турбіни та наявність вібраційних живильників, машина має бути встановлена на демпфувальні опори для запобігання передачі вібрації на міжповерхові перекриття. Усі ремінні передачі, муфти та вали ротаційних розподільників мають бути закриті суцільними металевими кожухами, пофарбованими у сигнальний жовтий колір.

Зерновий пил є вибухонебезпечним середовищем. Турбінні сепаратори, особливо з відкритим циклом, потребують суворого контролю герметичності. Забороняється робота сепаратора при несправній системі пиловловлювання або розгерметизації осаджувальних камер.

У зоні встановлення агрегату необхідно використовувати двигуни та пускову апаратуру у вибухозахищеному виконанні.

Пил, що осідає на корпусі сепаратора, має видалятися безпиловим методом (пилососом або вологим прибиранням) для недопущення утворення пилоповітряних сумішей.

Сепаратор повинен бути оснащений системою блокування, що унеможливорює запуск двигуна при відкритих оглядових люках або знятих огородженнях.

Очищення аспіраційних каналів або накопичувальних бункерів від завалів продукту дозволяється лише після повної зупинки агрегату та вивішування попереджувальної таблички «Не вмикати! Працюють люди».

Обслуговуючий персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту: протишумові навушники (через аеродинамічний шум турбіни), респіратори та спецодяг, що щільно прилягає до тіла. До роботи з турбінними сепараторами допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли: медичний огляд (відсутність протипоказань до роботи в запилених приміщеннях); вступний та первинний інструктаж на робочому місці; навчання та перевірку знань з електробезпеки (не нижче II групи допуску).

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне теоретичне обґрунтування та аналіз функціонування модернізованого пневмосепаратора, що дозволило сформулювати наступні наукові та практичні результати.

Аналіз конструкцій провідних виробників (DAMAS, Kongskilde, «ОЛІС») підтвердив, що традиційні вертикальні пневмосепараційні канали (ПСК) кільцевого перерізу при збільшенні продуктивності втрачають ефективність через зростання товщини зернового шару та дефіцит часу експозиції часток у повітряному потоці. Запропоновано перехід до кільцевого зигзагоподібного каналу, що забезпечує інтенсифікацію процесу сепарації.

Математично доведено, що геометричний фактор зигзага збільшує шлях та час взаємодії часток з повітряним середовищем на 15...18% порівняно з прямолінійними аналогами при ідентичних габаритах машини. Розроблена диференціальна модель руху враховує не лише базові гравітаційні та аеродинамічні сили, а й вплив сил Магнуса, Бассе та приєднаних мас. Це дозволило з високою точністю встановити, що інерційне відхилення зерна майже вдесятеро перевищує аналогічний показник для легких фракцій, створюючи умови для прецизійної диференціації потоків.

Встановлено, що оптимальний кут нахилу сегментів каналу α становить 22...25°. Відхилення від цього діапазону призводить або до нівелювання ефекту розпушення ($\alpha < 15^\circ$), або до критичного зростання гідравлічного опору та ризику винесення кондиційного зерна у відходи ($\alpha > 30^\circ$).

Доведено ефект механічної активації шару, оскільки зигзагоподібна конфігурація виконує роль інерційного «змішувача». Кожен перегин каналу забезпечує переорієнтацію зернівок, що дозволяє повітряному потоку вилучати легкі домішки, які у прямих каналах залишаються «затіненими» всередині щільного шару. При кількості сегментів $n = 4$ нерівномірність розподілу продукту зменшується у 4 рази.

Попри певне ускладнення конструкції та необхідність збільшення потужності вентилятора на 15%, модернізований сепаратор забезпечує приріст чистоти зерноsumіші на 12...18% за один прохід. Це виключає потребу в повторній сепарації, зменшує втрати цінного зерна та дозволяє зберегти компактність обладнання.

Результати роботи свідчать, що запропонована модернізація ПСК є ефективним інструментом підвищення якості післязбиральної обробки зерна, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності та технологічної гнучкості.

Список використаної літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Ефективність розділення зернового матеріалу на фракції турбінним сепаратором / Д. І. Петренко, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, О. В. Нестеренко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 43. Ч. 2. 2013. С. 230-236.
3. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / С.П. Степаненко // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – С. 59 - 65.
4. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. 2018. Вип. № 8 (107). С. 80-88.
5. Каталог продукції фірми Tornum AB. Air Aspirator Damas Pulco. URL: <https://www2.tornum.com/product/damas-pulco/>.
6. Каталог продукції фірми Kongskilde. Aspirators – KF. URL: <https://kongskilde-industries.com/grain/usa/product/aspirators-kf/>
7. Каталог продукції компанії ТОВ «ОЛІС». Повітряний сепаратор СВО-1. URL: <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/povitryany-separator-svo-1/>.
8. Степаненко, С. П., Котов, Б. І., Спірін, А. В. (2017). До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу. Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія:

- Механізація сільськогосподарського виробництва, 180, С. 330-339.
9. Котов, Б. І., Степаненко, С. П. (2020). Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 50, С. 122-133.
 10. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. 10 (4). P. 137-143.
 11. Недельський Д.С., Петренко Д.І. Мехатронні принципи керування зерноочисними сепараторами. Вісник Степу. Науковий збірник ІСГС НААН. Вип. 22. Вінниця : НІЛАН-ЛТД, 2025. С. 84-86.
 12. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневному введенні в пневмосепаруючий канал. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 111-116. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>.
 13. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., & Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 53(3), 65-70.
 14. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2018). Pneumofractionation of grain materials in air streams of variable structure. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. ТЕКА, 18(2), 69-74.
 15. Абдуєв М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей : автореф. дис...канд. техн. наук / ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2007. 20 с.
 16. Колодій О.С. Методика дослідження впливу геометричного положення насіння в просторі, при потраплянні у вертикальний аспіраційний канал

- сепаратору. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Мелітополь, 2013. Вип. 13, т. 3. С. 124 -129.
17. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
 18. Підручник дослідника : навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, К. В. Васильковська, Д. І. Петренко. Кіровоград : Мачулін, 2016. 204 с.
 19. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки. : навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків : Мачулін, 2019. 164 с.
 20. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посібник. Київ : НУХТ, 2022. 385 с.
 21. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин / П.М. Заїка. Харків: Око, 2006. 407 с.
 22. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
 23. Чисельні методи. Чисельне інтегрування функцій : навчальний посібник / Л. В. Крилик, І. В. Богач, А. І. Лісовенко. Вінниця : ВНТУ, 2019. 74 с.
 24. Войналович О. В. Охорона праці у сільському господарстві: навч. підруч. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 690 с.