НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет **Конструювання та дизайну**

ПОГОДЖЕНО	**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Декан факультету Конструювання та дизайну	**Завідувач кафедри Надійності техніки**
(назва факультету(ННІ))	(назва кафедри)
Іван РОГОВСЬКИЙ	Андрій НОВИЦЬКИЙ
(підпис) (ПІБ)	(підпис) (ПІБ)
“___”_____20___р.	“___”_____20___р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Підвищення механізму розподілу насіння грунтообробного посівного агрегату АППА 6-02 конструкторсько-технологічними методами

Спеціальність Галузеве машинобудування
(код і найменування)

Освітня програма Технічний сервіс машин та обладнання сільськогосподарського виробництва
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент _____ **Андрій НОВИЦЬКИЙ**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент _____ **Павло ПОПИК**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

асистент _____ **Руслан КУЛЬПІН**
(науковий ступінь та вчене звання) _____(підпис)_____ (ПІБ)

Виконав _____ **Назар МІЩЕНКО**
(підпис) (ПІБ здобувача)

КИЇВ 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет **Конструювання та дизайну**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри **Надійності техніки**

к.т.н., доцент _____ Андрій НОВИЦЬКИЙ

(науковий ступінь вчене звання) (підпис) (ПІБ)

“___” _____2025р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Міщенку Назару Олександровичу

(прізвище, ім’я, по батькові)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(код і найменування)

Освітня програма Технічний сервіс машин та обладнання сільськогосподарського виробництва

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Підвищення механізму розподілу насіння грунтообробного посівного агрегату АППА 6-02 конструкторсько-технологічними методами

Затверджена наказом від “16” грудня 2024р. № 2266 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 10 листопада 2025 р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи. 1. Дисертаційні дослідження та монографії (2020-2024). 2. Сівалка пневматична АППА 6-02 детальні технічні характеристики: ширина захвату, кількість сошників, тип висівного апарату, принцип роботи розподільної головки. 3. Фізико-механічні властивості основних культур для посіву. 4. Фактичні показники нерівномірності висіву сівалки АППА 6-02, а також дані про швидкість повітряного потоку та тиск у розподільній системі Кресленики та схеми існуючої розподільної головки (дифузора). Каталоги сучасних полімерних матеріалів для елементів, що контактують з насінням. 6. Українські державні стандарти.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз сучасних конструкцій пневматичних розподільників (дифузорів) та методів підвищення рівномірності висіву у 2020-2025 роках. Обґрунтувати вибір напрямку вдосконалення.
2. Обґрунтувати фактори, що суттєво впливають на надійність елементів пневмопідвіски автобусів.
3. Встановити та обґрунтувати ключові конструктивні (геометрія дифузора, кути) та технологічні (швидкість повітряного потоку, тертя) фактори, що найбільше впливають на коефіцієнт нерівномірності розподілу насіння
4. Розробити методики та оцінку ефективності (експериментальний/економічний розділ)

Дата видачі завдання “10” жовтня 2024 р.

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Павло ПОПИК**

(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ **Руслан КУЛЬПІН**

(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ **Назар МІЩЕНКО**

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота включає в себе пояснювальну записку, яка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Пояснювальна записка магістерської кваліфікаційної роботи містить 80 аркушів друкованого тексту.

У першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи проведено огляд технологій посіву зернових культур та розглянуто агротехнічні вимоги до сівби зернових культур і основні фізико-механічні властивості насіння.

У другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи проведено визначення можливості математичного опису технологічного процесу роботи пневматичних систем сівалок у вигляді течії газу з частинками та розроблено математичну модель технологічного процесу роботи.

У третьому розділі проведена перевірка адекватності моделі. Також в даному розділі проведено розрахунок розподільника насіння та встановлено його оптимальні параметри для найраціональнішого розподілу насіння по сошниках.

У четвертому розділі наведена економічна ефективність використання сівалки з експерементальною пневматичною сиситемою

Ключові слова: розподільник, пневмосистема, грунтообробний посівний агрегат, математична модель, економічна ефективність.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОХНАЧЕНЬ…….. 6
ВСТУП…… 7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СПОСОБІВ ДЛЯ СІВБИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР……. 10
1.1. Основні технології для посіву сільськогосподарських культур……... 10
1.2. Основні вимоги до посіву сільськогосподарських культур та їх основні фізико-механічні…….. 14
1.3. Аналіз існуючих конструкцій розподільних систем ґрунтообробних посівних агрегатів……. 17
1.4. Аналіз процесу розподілу насіннєвого матеріалу в ґрунтообробних широкозахватних посівних комплексах……. 26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС РОЗПОДІЛЬНОЇ СИСТЕМИ ГРУНТОБРОБНОГО ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ……. 30
2.1 Математичне моделювання технологічного процесу роботи пневматичної системи посівного комплексу у вигляді течії газу з частинками…… 30
2.2. Вибір і уточнення основних рівнянь математичної моделі……... 37
2.3. Визначення початкових та граничних умов моделі технологічного процесу…….. 45
2.4.Числова реалізація моделі …… 51
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ…….. 53
3.1. Результати досліджень по визначенню фізико-механічних властивостей насіння……... 53
3.2. Обґрунтування форми бічних стінок розподільника……. 57
3.3. Обґрунтування форми поверхні стінки та довжини розподільника…….. 58
3.4. Обґрунтування форми вихідної стінки розподільника……... 61
3.5. Перевірка адекватності моделі……. 65
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ З ДОСЛІДЖУВАНОЮ ПНЕВМАТИЧНОЮ СИСИТЕМОЮ……. 67
4.1. Визначення економічної ефективності вдосконаленого комплексу АППА-6-02…… 67
ВИСНОВКИ…… 71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…… 73
ДОДАТКИ…… 78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПА - посівний агрегат;

ГТ - ґрунтообробна частина;

МРН - механізм розподілу насіння;

ВА - висівний апарат;

КВВ - коефіцієнт варіації висіву;

НВ - норма висіву;

ДП - діаметр патрубка.

ВСТУП

Актуальність теми. Рівень продовольчої безпеки держави значною мірою корелює з обсягами валового збору зернових. Зерно є стратегічною сировиною, що формує насіннєві фонди, забезпечує населення продуктами харчування, а галузь тваринництва – необхідним зернофуражем. В умовах стабільності посівних площ, пріоритетними шляхами нарощування виробництва зерна стають підвищення врожайності культур та мінімізація втрат на всіх стадіях технологічного циклу.

Збільшення валової продукції в агросекторі можливе, головним чином, за рахунок інтенсифікації виробництва, що передбачає впровадження інноваційних науково-технічних досягнень та передових практик. Це, у свою чергу, ставить перманентне завдання щодо підвищення експлуатаційної ефективності сільськогосподарських машин та знарядь. Важливе місце в системах механізації посідають зернові посівні агрегати, якість роботи яких безпосередньо впливає на кінцевий результат.

Ефективність функціонування зернових сівалок детермінується якістю дистрибуції насіннєвого матеріалу, що забезпечується конструкцією висівної системи. Значна частина існуючих конструкцій є технічно та морально застарілими. Серед запропонованих інноваційних рішень найбільшу увагу привертають системи, що базуються на принципах централізованого дозування та пневматичного транспортування насіння. Такі системи дозволяють впроваджувати сучасні ресурсно- та енергозберігаючі технології. Проте, поширені пневматичні системи з розподільниками вертикального типу або індивідуальним дозуванням не позбавлені суттєвих недоліків: вони є порівняно енергоємними, характеризуються збільшеними габаритами та не завжди забезпечують належну якість висіву при роботі з насінням, що має гетерогенні фізико-механічні властивості.

Найбільш перспективними вважаються одноступінчасті пневматичні системи, що реалізують групове дозування насіння та використовують розподільники горизонтального типу. Такі конструкції володіють перевагами у

вигляді нижчої енерго- та матеріалоємності. Однак і вони не завжди здатні забезпечити необхідний рівень рівномірності розподілу насіннєвого потоку між окремими сошниками.

Подальше вдосконалення розподільних систем неможливе без глибокого теоретичного розуміння процесів аеродинамічної взаємодії у потоці «повітря-насіння», з урахуванням фізико-механічних властивостей останнього. Для цього необхідно розробити адекватну модель процесу переміщення насіння у повітряному потоці, що забезпечить можливість наукового обґрунтування технології руху повітряно-зернової суміші та раціональних конструктивних параметрів розподільчої системи.

У зв'язку з цим, науково-технічне завдання, спрямоване на підвищення якості дистрибуції насіння по насіннєпроводах шляхом обґрунтування конструктивних і технологічних параметрів розподільчого пристрою (на основі моделювання руху повітряно-зернової суміші в розподільнику горизонтального типу), є беззаперечно актуальним.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка методики підвищення якості розподілу насіння шляхом вдосконалення розподільної системи ґрунтообробного посівного агрегату.

Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати такі завдання:

- здійснювати огляд та аналіз агротехнічних вимог до сівби зернових культур та основні фізико-механічні властивості насіння.
- визначення можливості математичного опису технологічного процесу роботи пневматичних систем сівалок у вигляді течії газу з частинками.
- розробити математичну модель технологічного процесу роботи розподільної системи сівалки з пневматичним транспортуванням насіння. Обґрунтувати прийняті спрощення і припущення.
- розробити методику економічної ефективності використання сівалки з експериментальною пневматичною системою.

Об’єктом магістерської кваліфікаційної роботи є технологічний процес розподілу насіння повітряним потоком в розподільчій системі зернової сівалки

Предметом магістерської кваліфікаційної роботи є закономірності технології руху повітряно-зернової суміші і впливу конструктивно-технологічних параметрів розподільного пристрою на якість розподілу насіння.

Методи дослідження є теоретичні дослідження з використанням методики механіки двофазних середовищ «газ - тверді частинки» і методи класичної гідродинаміки. Експериментальні дослідження в лабораторних і виробничих умовах виконані з використанням стандартних і приватних методик із застосуванням методів планування експерименту.

Практична цінність отриманих у ході проведених експериментально-теоретичних досліджень отримали практичну реалізацію у вдосконаленні посіву зернових культур. Посів ґрунтообробним посівним агрегатом з експериментальною пневматичною висівною системою забезпечує нерівномірність розподілу насіння по сошниках не більше 5%, замість 13% у серійного.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи доповідались на щорічних науково-практичних конференціях студентів факультету конструювання та дизайну. Опубліковано тези доповідей у збірнику наукових тез на тему «Підвищення надійності механізму розподілу насіння ґрунтообробного посівного агрегату шляхом інтеграції технології «цифрового двійника» та адитивного виробництва».

Структура та обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг магістерської кваліфікаційна роботи становить 80 с., із них 78 с., основного тексту, у тому числі 16 ілюстрацій і 11 таблиць. Список використаних джерел містить 49 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СПОСОБІВ ДЛЯ СІВБИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

1.1 Основні технології для посіву сільськогосподарських культур

Урожайність є похідною двох ключових компонентів: густоти стояння рослин на одиниці площі та їхньої середньої індивідуальної продуктивності. Хоча підвищення врожайності можна досягти шляхом збільшення густоти рослин, цей підхід ефективний лише до певного оптимального значення, специфічного для кожної культури. При подальшому загущенні посівів середня продуктивність кожної окремої рослини різко знижується, і приріст валового збору припиняється. Така стратегія призводить до нераціонального зростання витрат насіннєвого матеріалу, який, особливо на ранніх стадіях репродукції, є цінним потенціалом, що вимагає максимальної ефективності використання. Відповідно, пріоритетним завданням стає підвищення середньої продуктивності рослин через створення сприятливих умов для їх росту та розвитку, що досягається шляхом їх раціонального розподілу по площі поля.

Для забезпечення умов, необхідних для нормального росту та розвитку рослин, до процесу посіву висувається низка чітких агротехнічних вимог. Дотримання цих вимог спрямоване на оптимізацію забезпечення кожної рослини поживними речовинами, сонячним світлом та повітрям. Найважливішою з цих вимог є досягнення рівномірного розподілу рослин по одиниці площі, що реалізується шляхом застосування різних способів посіву.

На даний момент часу існують різні способи посіву (рис. 1.1): рядковий (з розміщенням насіння паралельними рядками); перехресний (рядковий у двох пересічних напрямах); звичайний рядковий (з міжряддям 10–25 см); смуговий (з розташуванням насіння смугами шириною не менше 10 см); вузькорядний (з міжряддям не більше 10 см); широкорядний (з міжряддям не менше 45 см); пунктирний (з одиночним рівномірним розподілом насіння в рядках);

гніздовий; квадратний; квадратно-гніздовий; стрічковий (де два або більше рядків утворюють стрічки, що чергуються з широкими міжряддями) [14].

Рядковий посів залишається найбільш поширеним методом для зернових, технічних та овочевих культур. При стандартній ширині міжрядь (12,5–21 см), відстань між насінинами в рядку варіюється залежно від культури та норми висіву. Це формує площу живлення рослин у вигляді видовженого прямокутника [9], де співвідношення сторін може сягати від 1:6 до 1:10. Така конфігурація площі живлення провокує надмірне загущення в рядках, що призводить до зниження індивідуальної продуктивності, появи недогону та випадіння рослин.

Застосування вузькорядного посіву (з міжряддям 7,5 см) дозволяє оптимізувати конфігурацію площі живлення при збереженні її загального розміру. Наприклад, прямокутник 15х1,66 см (при рядковому) трансформується у 7,5х3,33 см. У низці зон обробітку цей метод забезпечує прибавку врожайності, причому найбільший ефект досягається при одночасному збільшенні норми висіву на 10–15% [16].

Перехресний посів, що виконується у двох взаємно перпендикулярних напрямках (з половинною нормою висіву в кожному), також покращує конфігурацію площі живлення, збільшуючи відстань між насінням у рядку вдвічі порівняно зі звичайним рядковим [18]. Хоча цей метод сприяє підвищенню врожаю, він має суттєві недоліки: збільшення тривалості посівної кампанії та непродуктивні витрати енергії і ПММ.

Для просапних культур переважно застосовують широкорядний посів. Ширина міжрядь (від 45 до 110 см) обирається з урахуванням біологічних особливостей культури та необхідності проведення механізованого міжрядного обробітку. Пунктирний посів є різновидом широкорядного (міжряддя 45–90 см залежно від культури) і використовується для тих самих культур, але з ключовою вимогою – забезпеченням точного, рівномірного розподілу окремих насінин на заданій відстані (крок пунктиру). Гніздовий посів також використовується для просапних культур з аналогічною шириною міжрядь, але

передбачає розміщення кількох насінин у "гніздах", відстань між якими варіюється від 15 до 25 см і більше.

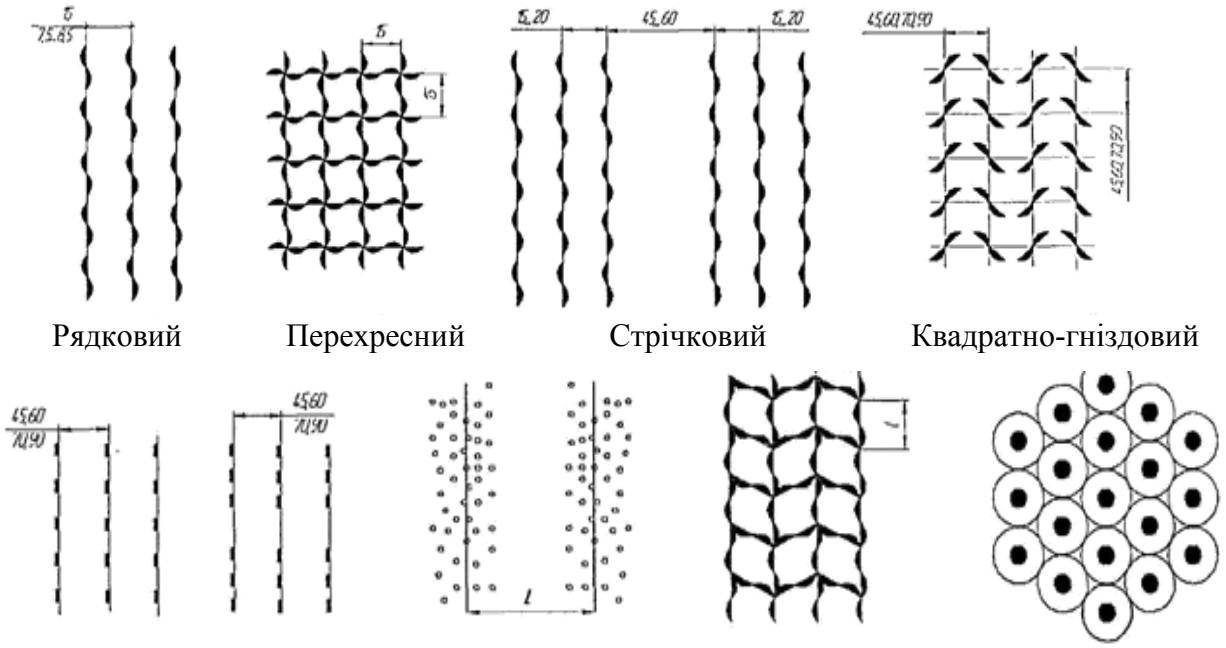


Рис. 1.1. Способи посіву сільськогосподарських культур

Квадратно-гніздовий посів полягає у розміщенні насіння у вузлах (перетинах) взаємно перпендикулярних уявних ліній. Ключовою перевагою цього методу є можливість проведення механізованої культивації міжрядь як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках, що забезпечує вищий ступінь контролю над бур’янами.

Пунктирно-перериний посів наразі перебуває на стадії наукового вивчення, переважно для технологій вирощування цукрових буряків. Цей метод комбінує пунктирний висів (із заданим кроком) із технологічними пропусками. Параметри "букета" (кількість насінин та крок між ними) та довжина пропуску залежать від необхідної густоти стояння рослин та заданої норми висіву. Даний метод вважається перспективним для цукрових буряків та інших просапних культур [10], оскільки він потенційно дозволяє досягти оптимальної густоти рослин із заданою дистанцією між ними, незалежно від посівних якостей насіннєвого матеріалу.

Розкидний посів є найдавнішим методом, який у сучасному агровиробництві зберігся переважно для поверхневого внесення насіння трав та рису. Разом з тим, тривають науково-дослідні роботи з розробки робочих органів для реалізації підґрунтового розкидного посіву зернових культур.

З точки зору агротехнічної вимоги щодо рівномірного розподілу насіння зернових на одиниці площі, найкращі результати демонструють смуговий та стрічковий способи посіву.

Стрічковий посів застосовується переважно в овочівництві. Технологія передбачає висів насіння у кілька близьких рядків (наприклад, з відстанню 20 см), що утворюють "стрічку", яка чергується зі значно ширшим міжряддям (наприклад, 45 см). Кількість рядків у стрічці може варіюватися. Цей спосіб також демонструє ефективність при вирощуванні пшениці, створюючи оптимальну густоту стояння та сприятливі умови для розвитку рослин [8].

Дослідження підтверджують високу ефективність смугового посіву, особливо в посушливих умовах степової та лісостепової зон. Насіння, рівномірно розподілене в межах посівної смуги, отримує найбільш сприятливі (комфортні) умови для проростання та розвитку завдяки оптимізації площі живлення, а також кращому доступу до вологи та тепла. Для максимальної ефективності необхідний раціональний розподіл насінин по всій площі смуги. Вибір оптимального способу посіву та якість його виконання значною мірою визначають ступінь реалізації генетичного потенціалу культури. Для кожної культури існує оптимальна густота стояння, що обґрунтовується за результатами досліджень і враховує не лише індивідуальну продуктивність рослини, але й сумарну врожайність з площі.

Смуговий спосіб також ефективний при посіві зернових культур по стерні, де насіння закладається у ґрунт за допомогою стрілчастої лапи-сошника [16]. Цей метод (з міжцентровою відстанню смуг 23 см) також застосовують для столових коренеплодів, цибулі та інших овочів. При дотриманні оптимальних строків сівби, даний спосіб забезпечує значне підвищення врожайності у широкому діапазоні норм висіву та ширини смуги. Оптимальною

визнано схему, що чергує 8 см посівної смуги та 8 см незасіяного проміжку; збільшення ширини смуги до 12 см призводить до зниження врожайності.

Таким чином, максимальна врожайність за будь-яких умов досягається при оптимальній густоті посіву, що є результатом взаємодії двох факторів: густоти стояння (кількості рослин) та енергії кущіння (індивідуальної продуктивності). Найкраще ці умови реалізуються саме при смуговому способі посіву. Формування необхідної ширини смуги вимагає певної швидкості вильоту насіння з насіннєпроводів у під сошниковий простір. У механічних сівалках, де насіння рухається виключно під дією гравітації, забезпечити необхідну швидкість для розсіву складно. Для цих цілей найкраще придатні сівалки з пневматичною системою розподілу. У таких системах насіння транспортується комбінованим впливом сили тяжіння та повітряного потоку, що дозволяє досягти необхідної швидкості вильоту насіння у під сошниковий простір шляхом регулювання параметрів повітряного потоку [25].

1.2 Основні вимоги до посіву сільськогосподарських культур та їх основні фізико-механічні.

Якість проведення посівних чи посадкових робіт є одним із ключових факторів, що визначають майбутню врожайність сільськогосподарських культур. Для забезпечення оптимального росту та розвитку кожній рослині необхідна певна площа живлення. Це зумовлює агротехнічну вимогу щодо внесення на кожен гектар науково обґрунтованої кількості кондиційного насіння оброблюваної культури.

Недотримання норми висіву в бік зменшення (недосів) призводить до зниження густоти стояння рослин, що безпосередньо спричиняє падіння врожайності та, водночас, створює сприятливі умови для інтенсивного розвитку бур’янів. І навпаки, перевищення рекомендованої норми веде до надмірного загущення посівів, нераціональних витрат цінного насіннєвого матеріалу та, в кінцевому підсумку, може також призвести до зниження валового збору.

Виходячи з вищезазначеного, до технологічних процесів посіву та посадки висуваються три основні агротехнічні вимоги:

- оптимальне розміщення заданої кількості насіння на одиниці площі поля;
- рівномірне розподілення на одиниці площі, що буде посіяна;
- рівномірність розподілу на певну глибину.

Для цього агротехнічні вимоги [3,6] встановлюють жорсткі допуски: відхилення загальної норми висіву від заданої не повинно перевищувати 3%. Середня нерівномірність розподілу між окремими висівними апаратами допускається в межах 3% для зернових та 4% для бобових культур. Коливання ширини міжрядь регламентовані наступним чином: для основних – не більше ±1 см, для суміжних сівалок – не більше ±2 см, а для суміжних проходів – до ±5 см. Відхилення від заданої глибини загортання насіння обмежується ±15%. Кількість пропусків не повинна перевищувати 2% від загальної кількості висіяного насіння.

Процес удосконалення робочих органів машин для зернового виробництва вимагає глибокого технологічного обґрунтування конструктивних елементів. Це обґрунтування повинно базуватися на врахуванні властивостей посівного матеріалу, які, у свою чергу, визначаються його морфологічною будовою та фізико-механічними характеристиками.

Фізико-механічні властивості насіння не є константними; вони характеризуються широким діапазоном мінливості та залежать від значної кількості чинників. Їх описують безліччю показників, ключовими з яких є: лінійні габарити, аеродинамічні властивості, щільність, пружність, а також форма та стан поверхні.

Насіння являє собою складну біологічну систему, окремі компоненти якої мають різні механічні властивості (здатність чинити опір деформації та руйнуванню). Форма та стан поверхні насінини є різноманітними і, як правило, слугують характерними ознаками для конкретної культури, виду та сорту.

Проте, навіть у межах одного сорту, ці характеристики можуть значно варіюватися під впливом умов вирощування та інших факторів. Існує багато класифікацій форми зерна, однак дослідники найчастіше оперують поняттям типу та форми [28]. Виділяють п’ять узагальнених типів, що описують геометричну конфігурацію насіння:

— кулеподібна: довжина, ширина та товщина практично ідентичні або мало відрізняються (горох, просо, сорго).

— сочевицеподібна: ширина та довжина майже рівні, але товщина значно менша (сочевиця).

— еліптична: товщина дорівнює ширині, але довжина значно більша (соя, інше зерно бобових).

— подовжена: всі три виміри суттєво відрізняються (пшениця, жито, ячмінь, кукурудза).

— трикутноподібна: насінина має тригранну форму (гречка) [28].

Хоча насіння більшості культур не має ідеальної геометричної форми, наведені групи дозволяють класифікувати переважну частину польових культур.

Поверхня насіння (гладка, глянцева, ребриста, шорстка, зморщена) є важливою характеристикою, що впливає на процеси його транспортування та взаємодію з робочими органами машин. Ця властивість, як і крупність, залежить не лише від сортових особливостей, але й від зовнішніх умов. Крупність, яка змінюється навіть більшою мірою, ніж форма, визначається лінійними розмірами (довжина, ширина, товщина). Термін "крупність" є виключно розмірною характеристикою і його не слід ототожнювати з масою (вагою), хоча ці показники корелюють. Найбільш стабільним лінійним розміром є довжина; товщина та ширина є більш лабільними та змінюються під впливом зовнішніх факторів. Зі зміною вологості лінійні розміри насіння також змінюються, причому нерівномірно.

Аеродинамічні властивості (або "парусність") характеризують поведінку насіння при взаємодії з повітряним потоком. Насіння з високим

аеродинамічним опором буде повільніше переміщатися відносно повітря. Ключовими показниками тут є коефіцієнт аеродинамічного опору та критична швидкість (або швидкість витання). Остання визначається як швидкість висхідного (вертикального) повітряного потоку, за якої насінина переходить у завислий стан (витає).

Основні фізико-механічні властивості для культур, які вирощуються в Україні, зведені у таблицю 1.1. Дані таблиці 1.1 ілюструють, що насіння зернових культур характеризується значною варіативністю як геометричних розмірів, так і фізико-механічних властивостей, що існують у широких межах.

Таблиця 1.1. Основні фізико-механічні властивості сільськогосподарських культур

Назва культури	Товщина, мм	Ширина, мм	Довжина, мм	Критична швидкість, м/с	Щільність, кг/м^3	Маса 1000 шт, гр.
Пшениця	1,8... 3,5	1,7…4,1	3,0…8,6	8,6…11,4	1320…1550	23…42
Жито	1,4... 3,6	1,5…3,4	4,0…10	8,2…10,3	1280…1230	15…35
Ячмінь	1,3... 4,3	2,2…5,6	6,0…14,6	8,5…10,7	1240…1420	33…53
Овес	1,1... 3,8	1,5…4,2	7,0…18,6	8,3…9,2	1150…1300	21…44

З огляду на це, процес проектування та вдосконалення розподільних систем ґрунтообробних посівних агрегатів вимагає обов'язкового врахування значної варіативності зазначених фізико-механічних параметрів.

1.3. Аналіз існуючих конструкцій розподільних систем ґрунтообробних посівних агрегатів.

У сучасному агровиробництві, поряд із традиційними механічними агрегатами, широкого розповсюдження набули пневматичні ґрунтообробні посівні комплекси. Їхня конструкція базується на принципі централізованого дозування з подальшим пневматичним транспортуванням насіннєвого матеріалу до сошників [29]. Практичний досвід експлуатації довів, що найбільша ефективність цього принципу досягається при реалізації у

широкозахватних посівних комплексах. Завдяки використанню єдиного централізованого бункера, суттєво скорочується час, необхідний для заправки та технічного обслуговування агрегата, що створює передумови для підвищення продуктивності праці під час посівної.

Пневматичні сівалки виробляються більшістю провідних компаній Європи, Канади, США та Австралії. На вітчизняному ринку експлуатуються моделі СЗС-14, СЗПЦ-12, ССНП-16, Червона Зірка а також посівні комплекси «АППА», «GASPARDO» та інші. Більшість цих агрегатів оснащені оригінальними висівними системами, що різняться між собою як загальними технологічними схемами, так і конструктивним виконанням ключових вузлів.

Стандартна посівна система включає бункер, дозуючий апарат, пневмотранспортуючу систему (з джерелом потоку – вентилятором), розподільчу систему, а також механізми приводу дозатора та вентилятора. На схемі рис. 1.2 наведено узагальнену класифікацію основних типів посівних систем, що застосовуються у зернових та зерно-тукових пневматичних сівалках. Ключовими вимогами до пневматичних посівних систем є зручність в експлуатації, забезпечення високої продуктивності (відповідно до ширини захвату), висока точність висіву без пошкодження насіння та гарантування рівномірного його розподілу.

На схемі рис. 1.2 також проілюстровано технологічні схеми висівних систем найбільш поширених моделей пневматичних комплексів, акцентуючи увагу на способах введення насіння у повітряний потік. Забезпечення оптимальних умов для захоплення дозованого потоку зерна повітрям відіграє критичну роль. Це пов'язано з тим, що струмінь повітря, який надходить від вентилятора під надлишковим тиском, створює опір, що прагне «відкинути» насіння назад у дозуючий елемент [29]. При відсутності оптимальних умов для підхоплення зерна повітряним потоком, виникає ризик порушення синхронізації між процесом подачі насіння дозуючим апаратом та його транспортуванням пневмосистемою.

Усі пневматичні посівні системи класифікують за двома основними типами: ті, що працюють з надлишковим тиском (з надувом), та безнапірні (без надуву).

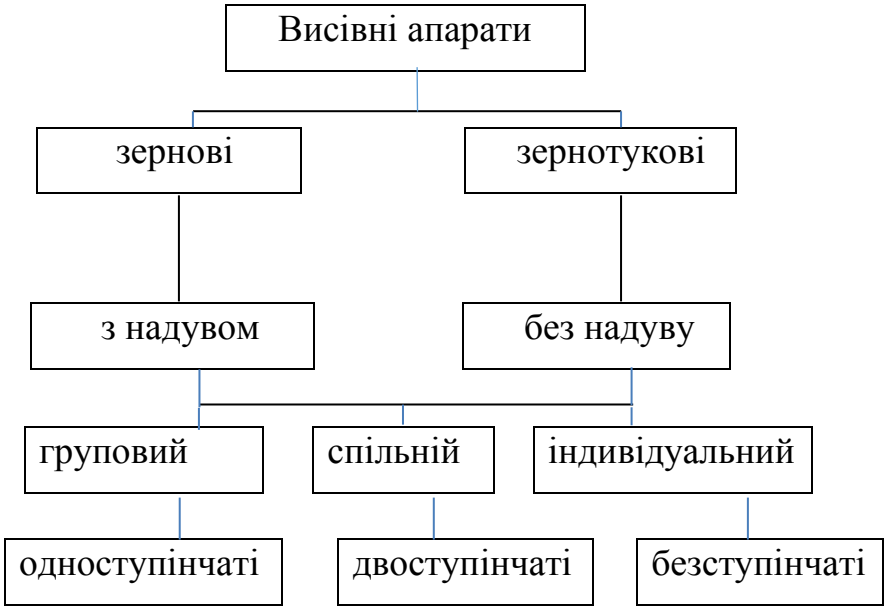


Рис. 1.2. Типи висівних систем пневматичних комплексів

Системи першого типу (з надувом) конструктивно передбачають наявність герметизованого бункера, який з'єднаний з магістральним пневмопроводом або напряму, або через приймальну камеру дозуючого апарата (рис. 1.2, а). Завдяки вирівнюванню тиску над насіннєвим матеріалом у бункері та в зоні його підхоплення повітряним потоком, дозований потік зерна гарантовано відбирається від дозатора та транспортується пневматичною магістраллю до сошників [29].

У безнапірних системах, які використовують не герметизований бункер, для забезпечення повного захоплення насіння та запобігання зворотному прориву повітря, застосовуються спеціальні живильники або шлюзові затвори (рис. 1.3, б).

Посівні системи, що працюють під тиском, є більш складними у виробництві, що зумовлено технологічною необхідністю забезпечення повної герметизації бункера. Додатковим експлуатаційним недоліком є обмежені габарити завантажувальних люків, що ускладнюють процес заправки сівалки. Також відзначається, що при зміні рівня заповнення бункера насінням,

стабільність процесу висіву може погіршуватися. Функціонування таких систем вимагає додаткових витрат повітряного потоку.

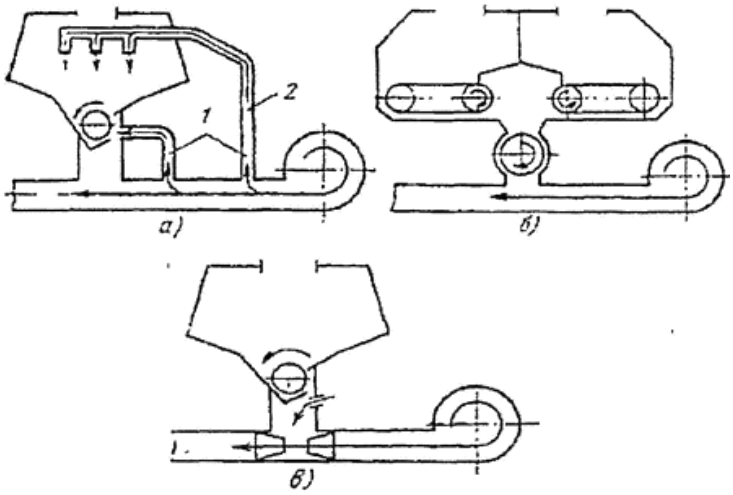


Рис. 1.3. Технологічні схеми висівних систем

а - з наддувом; *б* - без наддуву з шлюзовим затвором; *в* - з забором повітря з атмосфери; 1 - рух повітря в бункер та приймальну камеру; 2 - рух повітря в бункер.

Конструктивно, шлюзовий затвор (також відомий як повітряний замок) являє собою ротор (котушку), що обертається всередині прецизійного корпусу (рис. 1.3, б). Забезпечення герметичності вузла досягається за рахунок високої точності виготовлення компонентів (котушки та корпусу) та мінімізації технологічних зазорів між ними. Проте, суттєвим недоліком таких затворів є їх висока чутливість до абразивного зносу робочих поверхонь пари «котушка–корпус». Цей знос призводить до втрати герметичності, що, у свою чергу, спричиняє порушення стабільності та синхронності процесу подачі.

У більшості закордонних комплексів, а також у вітчизняних моделях (СЗС-14, АППА-6-02, GASPARDO), перевага надається ежекторним живильникам (рис. 1.3, в). Їхня конструкція базується на поєднанні конфузора та дифузора, які розташовані на певній відстані один від одного. Ця відстань формує робочу зону (камеру), де відбувається підхоплення (захват) насіннєвого матеріалу. Перевагою таких систем є відсутність потреби у додаткових витратах повітря на герметизацію (надув). Їхні негерметизовані бункери

оснащені завантажувальними люками великого розміру, що забезпечує сумісність із високопродуктивними завантажувальними засобами.

Конфігурації висівних та розподільчих систем у пневматичних комплексах є взаємопов'язаними. Їх вибір детермінується шириною захвату сівалки та специфічними умовами її експлуатації. За принципом дії дозуючі апарати класифікують на пристрої індивідуального, групового та загального висіву.

Комплекси, які реалізують індивідуальний та груповий висів, найчастіше є котушкового типу (з використанням жолобчастих або штифтових котушок) і різняться конструктивним виконанням та габаритними характеристиками (рис. 1.4). Як приклад, компанія Gaspardo використовує штифтові котушки, що компонуються у набірні блоки по декілька штук у кожен.

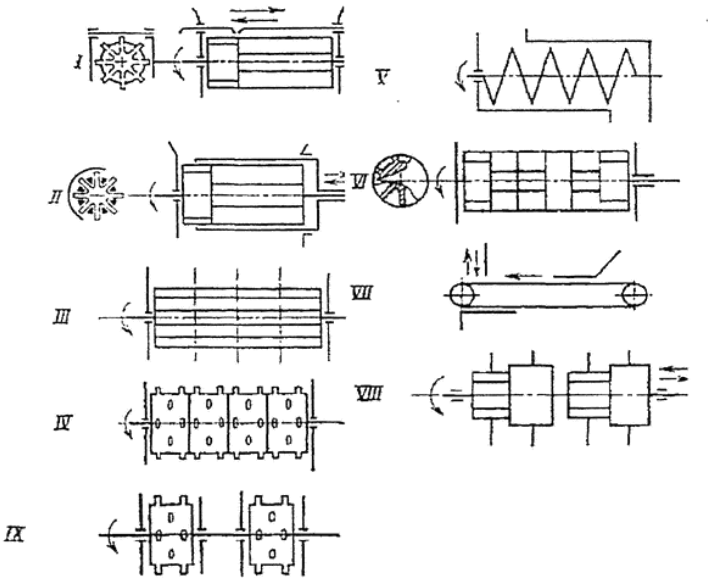


Рис. 1.4. Висівні апарати посівних комплексів

Для висіву насіння, що відрізняється за розмірами та нормами, переважно використовуються котушкові дозатори. Це можуть бути як традиційні конструкції з дворядним розташуванням (для зернових), так і комбіновані – з однорядним розташуванням штифтів та гладкими циліндричними муфтами (для дрібно насіннєвих культур, наприклад, ріпак чи просо).

Регулювання норми висіву в апаратах індивідуального та групового типу реалізується двома основними методами:

1. Зміною робочої довжини жолобчастих котушок (наприклад, у сівалках «Accord» це досягається циліндричною заслінкою, а в АС-570 – зміщенням котушки).
2. Зміною частоти обертання котушок з постійною робочою довжиною (наприклад, у «John Deere», Tive 4006 та Morris).

Для адаптації до дрібного насіння застосовуються спеціальні рішення: у сівалках «Tive» використовуються накладки, що зменшують висоту штифтів, а в «Accord» – вкладиші, що зменшують об’єм жолобків.

Аналіз показує, що найбільш раціональними є полімерні висівні апарати котушкового типу з комбінованою котушкою, де норма регулюється зміною робочої довжини, оскільки вони не вимагають складних приводних механізмів. Для гранульованих добрив більш доцільними є апарати з котушкою постійної довжини, де норма висіву контролюється частотою обертання (як у СЗПЦ-12).

Підсумовуючи аналіз висівних систем, можна констатувати, що найбільш перспективними є пневматичні системи з надувом (під тиском) та котушковим дозатором. Однак при їх роботі виникає проблема зворотного прориву частини повітря через шар насіння в бункер, що спричиняє втрати тиску. Цей процес необхідно враховувати при моделюванні пневмосистеми.

Розподільні системи пневматичних копмлексів (рис. 1.5) класифікуються за кількістю ступенів поділу повітряно-насіннєвого потоку.

У системах з індивідуальним висівом (де число дозаторів дорівнює числу сошників) поділ потоку відсутній. Такі системи застосовуються в посівних комплексах шириною захвату до 9 м (при малих міжряддях), оскільки подальше збільшення ширини призводить до надмірного зростання габаритів бункера та сівалки.

У системах з груповим висівом потік ділиться за одноступеневою схемою. Одна розподільча головка обслуговує групу з 5–12 сошників. У системах загального (централізованого) висіву поділ потоку реалізується за одно- або двоступеневою схемою. Одноступеневі схеми зазвичай застосовуються в агрегатах із шириною захвату до 8 м, тоді як двоступеневі – у

широкозахватних. У двоступеневих розподільчих системах використовуються ділильні головки двох типів: круглі та плоскі. Круглі головки, як правило, монтуються на вертикальній колоні, винесеній за межі бункера (за винятком моделі Chinook 1203, де головка інтегрована в основу колони). Плоскі головки конструктивно об'єднані з відвідним плоским трубопроводом і розміщуються безпосередньо на виході з бункера (наприклад, у системах «Leon» та «Symonds»). Подача насіння до ділильних головок другого ступеня може здійснюватися як зверху, так і знизу.

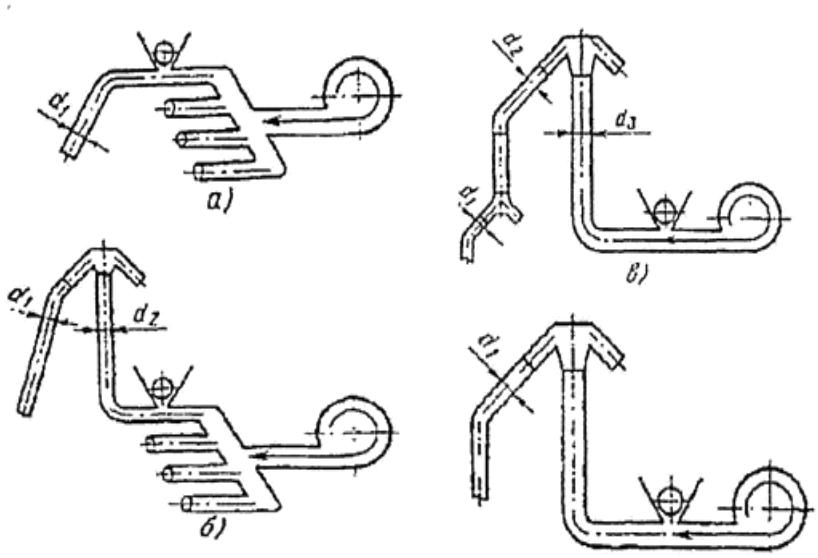


Рис. 1.5. Системи пневматичних комплексів: *а* - індивідуального; *б* - групового; *в* - загального висіву.

Ключовими недоліками розглянутих розподільчих систем є їхня недостатня пропускна здатність та низька рівномірність дистрибуції насіннєвого матеріалу до сошників. Проведені в нашій країні випробування сівалок низки зарубіжних фірм продемонстрували їхню нездатність забезпечити необхідні (прийняті у вітчизняній агротехнології) норми висіву для ячменю, вівса та пшениці. Показник нерівномірності розподілу зерна в таких комплексах сягав 16–19%. Це пояснюється, по-перше, використанням трубопроводів (насіннєпроводів) малого діаметру, а по-друге, недостатньою продуктивністю вентиляторів для роботи з високими нормами висіву.

З аналізу відомих досліджень рішення, що базуються на єдиному принципі (ударне відбивання), мають спільні системні недоліки. Серед них

варто виділити високу енергоємність процесу розподілу в ділильній головці, оскільки при лобових зіткненнях з перешкодами частинки (насіння) значно втрачають свою кінетичну енергію (швидкість). Окрім цього, такий інтенсивний ударний вплив призводить до пошкодження (травмування) насіння. Попри численні спроби вдосконалення, багато авторів фіксують недостатньо високу рівномірність розподілу таких розподільників – на рівні 4–8 %. Важливо зазначити, що ці показники досягаються лише за умови суворо вертикального положення трубопроводу. Нахил комплексу до 15° у будь-якому напрямку призводить до критичного погіршення показника нерівномірності – до 12–18% і вище.

Аналіз конструктивних недоліків розподільників вертикального типу та складнощів, пов'язаних з їхнім удосконаленням, стимулював дослідників до вивчення альтернативних схем – з розподілом повітряно-зернової суміші у горизонтальній площині. Незважаючи на існування багатьох типів висівних систем, їхні порівняльні показники енергоємності досі не були систематично визначені. При створенні сівалок основна увага традиційно приділялася забезпеченню стабільності процесу пневмотранспортування та рівномірності розподілу зерна. Проте, сучасні вимоги щодо скорочення енергоспоживання диктують необхідність детального аналізу енергоємності пневматичних сівалок. Якщо умовно припустити однакову робочу швидкість для всіх типів посівних комплексів, знаючи їхню ширину захвату, можна розрахувати секундну подачу насіннєвого матеріалу. Це дозволяє ввести порівняльний показник питомих енерговитрат. Вихідні дані та розрахункові питомі енерговитрати для декількох систем наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Загальні енергетичні показники посівних комплексів

Тип системи	Ширина захвату комплексу, м	Подача посівного матеріалу, кг/с	Необхідна потужність, кВт	Питомі енерговитрати, кВт(кг/с)
Груповий висів:				
Без надуву	10,7…19,5	1,0…1,3	13,2..20,0	12,0…15,0
З надувом	До 17,2	1,0…2,2	15,0..20,0	9,0…15,0

Змішаний висів:				
Без надуву	6,0…14,4	0,5…12	4,5…15,4	9,8…19,0
З надувом	До 9,5	1,0…1,5	8,0…22,0	8,0…15,0
Індивідуального висіву без надуву	6,0…9,0	0,4…0,6	9,5…13,0	До 23,0

Зниження ефективності в таких системах є наслідком розсинхронізації (неузгодженості) у роботі між ежекторною системою та котушковим дозатором. Це призводить до відхилення норми висіву зерна на рівні 2,9% та характеризується нестабільним (змінним) характером подачі насіннєвого матеріалу до пневмопроводу.

1.4. Аналіз процесу розподілу насіннєвого матеріалу в ґрунтообробних широкозахватних посівних комплексах.

Процес дистрибуції зернового матеріалу по патрубках є фізично складним, з чим і пов'язана відносно невелика кількість теоретичних досліджень, присвячених закономірностям поділу потоку частинок. Здебільшого, наявні дослідження розподільників зводяться до емпіричного визначення нерівномірності (як ключового показника якості) або до спроб вдосконалення окремих конструктивних елементів та параметрів роботи.

Одні з перших детальних досліджень розподільчої головки вертикального типу («Accord») показали, що додаткова примусова турбулізація суміші (шляхом встановлення гофрованого циліндра) дозволяє суттєво покращити якість розподілу, знизивши коефіцієнт варіації з 15–27% до 4,5–6,5%, що було визнано допустимим результатом.

У низці подальших закордонних досліджень було детально вивчено вплив конфігурації підвідного трубопроводу. Встановлено, що наявність вигину (коліна) безпосередньо перед розподільником провокує сепарацію (розшарування) твердих частинок у потоці, що призводить до критичного погіршення якості: коефіцієнт варіації зростає з 5,3–6,7% до 21,0–32,3%.

Автори цих досліджень рекомендують обов'язкову наявність стабілізуючої прямолінійної ділянки довжиною не менше 20 діаметрів трубопроводу[31].

Також було доведено, що будь-яке відхилення підвідного трубопроводу від суворо вертикального положення негативно впливає на рівномірність розподілу, збільшуючи коефіцієнт варіації. Це погіршення є більш вираженим при збільшенні маси частинок (насіння) та при зменшенні швидкості транспортуючого повітряного потоку.

Тенденції щодо нестабільності вертикальних розподільників підтверджують і вітчизняні вчені. За результатами досліджень в реальних умовах експлуатації нерівномірність розподілу добрив у таких розподільниках зростає з 4–11% до 10–15%. Досліджуючи комплекс з розподільником (оснащеним центратором та напрямлячем) у польових умовах, також зафіксували нерівномірність на рівні 3,6–11,8%.

Важливим фактором також є аеродинамічний опір відвідних патрубків. Доведено, що найкраща дистрибуція потоку досягається за умови абсолютної ідентичності аеродинамічного опору всіх відвідних каналів.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що розподільник вертикального типу не гарантує стабільно високої рівномірності розподілу по відводним патрубкам. Складність вирішення цієї проблеми конструктивними методами стимулювала посилення наукового інтересу до розподільників горизонтального типу. Такі пристрої мають низку переваг: вони менш енергоємні, простіші за конструкцією та дозволяють розташовувати відвідні патрубки лінійно (в ряд).

На рис. 1.6 представлено схеми існуючих розподільних систем горизонтального типу. На основі їх аналізу, ми умовно класифікували їх на три типи, залежно від наявності та розташування внутрішніх вставок чи пристосувань: 1) з розподільчими пристроями на вході; 2) з розподільчими пристроями на виході; 3) розподіл за рахунок самої конструкції, без додаткових вставок. За результатами проведеного аналізу встановлено, що серед існуючих конструкцій, найбільш перспективним для подальшого вдосконалення є

горизонтальний розподільник. (рис. 1.6, а 4). Його ключові переваги включають конструктивну простоту, задовільні якісні показники роботи, компактність та високу монтажну придатність.

Водночас, незважаючи на вказані переваги, дана конструкція потребує подальшого вдосконалення. Залишається недостатньо вивченим питання впливу конфігурації (форми) верхньої стінки та кутів нахилу вихідних стінок розподільника на рівномірність дистрибуції.

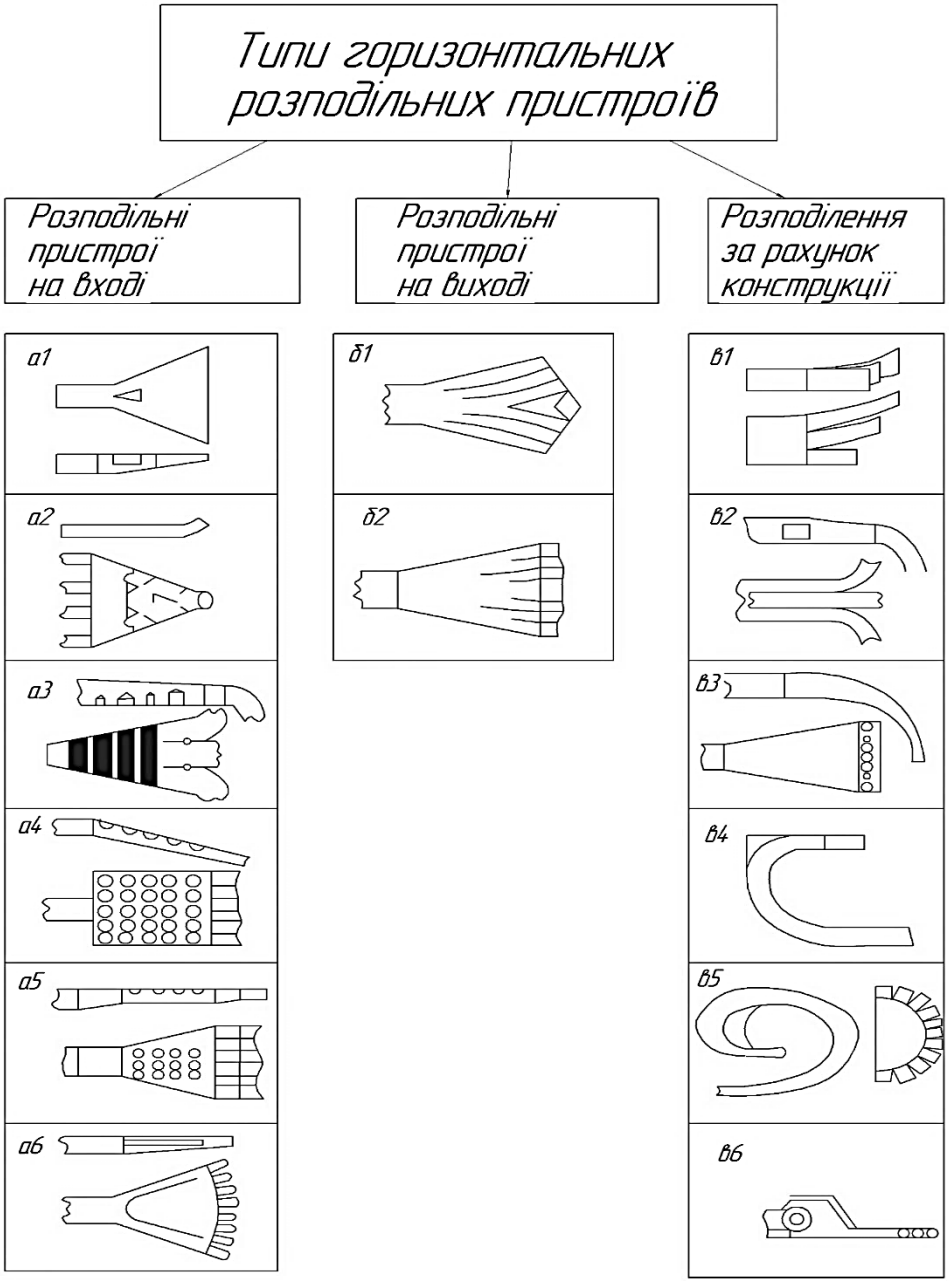


Рис. 1.6. Розподільники горизонтального типу

Аналогічно, відсутні системні дослідження, що встановлюють залежність між якістю розподілу повітряно-зернової суміші та геометричними параметрами (формою, кутами) і місцем розташування (установки) додаткових внутрішніх вставок у розподільнику посівного комплексу.

Таким чином, пріоритетним завданням є підвищення рівномірності дистрибуції зернової суміші по ширині розподільника, яке може бути досягнуто шляхом вирівнювання поля тиску повітряно-зернової суміші в його розтрубах.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС РОЗПОДІЛЬНОЇ СИСТЕМИ ГРУНТОБРОБНОГО ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1 Математичне моделювання технологічного процесу роботи пневматичної системи посівного комплексу у вигляді течії газу з частинками.

Транспортування насіннєвого матеріалу в розподільчих системах зернових пневматичних сівалок здійснюється за допомогою повітряного потоку. Цей процес, по суті, являє собою взаємодію між газоподібним середовищем («газом») та твердою фазою («твердими частинками»).

Опис даного процесу взаємодії методами механіки суцільних середовищ, тобто розгляд його як гетерогенного двофазного потоку «газ – тверді частинки», є коректним лише за дотримання низки специфічних умов. Ці умови стосуються типу (режиму) течії, концентрації частинок, інертності процесу їх переміщення, а також характеру їхньої аеродинамічної взаємодії з повітрям.

Для ідентифікації типу гетерогенного потоку та визначення можливості його адекватного математичного опису, використовують комплексну класифікацію. Ця класифікація базується на двох ключових параметрах: об’ємній концентрації частинок та числу Стокса. Значення цих критеріїв дозволяють оцінити наявність та інтенсивність основних міжфазових взаємодій серед повітря та частинок.

На рис. 2.1 представлено класифікацію різновидів потоків із частинками залежно від їхньої об’ємної концентрації.

У випадку незначної об’ємної концентрації твердої фази (дисперсної домішки) (а $<10^{-6}$) її усереднений за часом зворотний вплив на динаміку несучого середовища (газової фази) є несуттєвим, що дозволяє ним нехтувати в подальших розрахунках. При зростанні об'ємного вмісту ($10^{-6} <$ а $<10^{-3}$) дисперсная домішка в свою чергу починає давати зворотний вплив на несуче

середовище. Зі збільшенням концентрації (а> 10^{-3}) на придачу до вже описаних взаємодій між зваженими частинками і несучої фазою додається взаємодія частинок між собою.

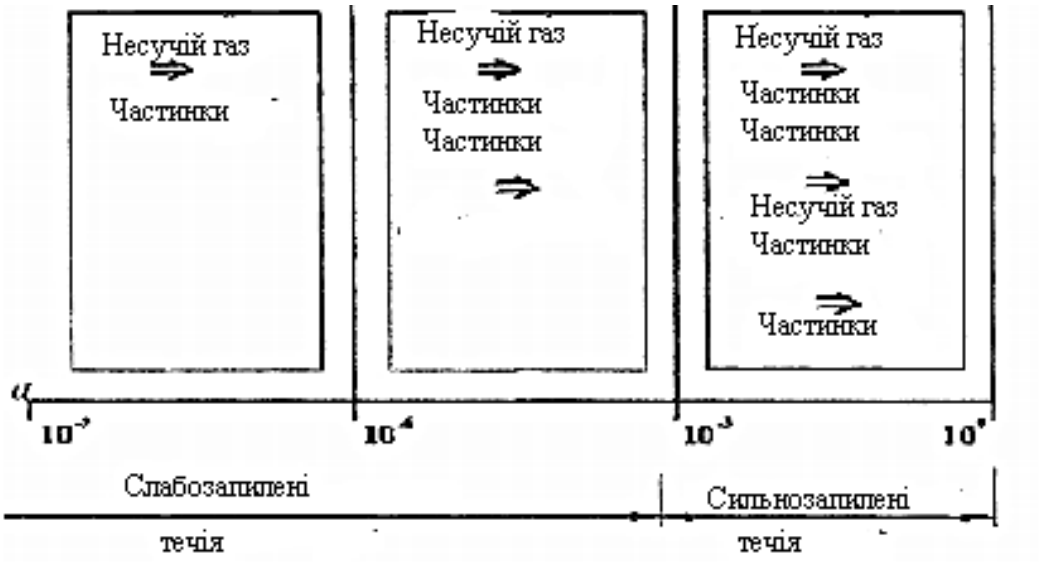


Рис. 2.1. Різновид потоків за об'ємної концентрації частинок

Для коректної ідентифікації режиму течії та визначення інтенсивності міжфазової взаємодії в пневматичній системі комплексу, необхідно розрахувати показники об'ємної та масової концентрації повітряної суміші.

Об'ємна концентрація домішки визначається зі співвідношення:

$$\alpha = \frac{V_p}{V_g} \qquad (2.1)$$

де Vp - об’єм, займаний частинками в елементарному об’ємі і потоці за одиницю часу, м/с;

Vg – об’єм повітря поданого за одиницю часу, м/с.

Для того, щоб визначити об’єм, який займає тверда частинка в елементарному об'ємі потоку, необхідно спершу розрахувати масову витрату насіннєвого матеріалу за одиницю часу. Цей показник визначається, виходячи з ключових експлуатаційних параметрів комплексу. Базуючись на відомих значеннях ширини захвату сівалки B_p (м) та її робочої швидкості V_c (м/с), визначається площа посіву, оброблена за одиницю часу.

$$S = B_p \cdot V_c \ . \qquad (2.2)$$

Витрата насіння q_p (кг/с) за одиницю часу по заданій нормі висіву насіння Q (кг/га) визначитися як

$$q_p = \frac{S*Q}{10000}, \quad (2.3)$$

де 10000 – 1 гектар, м^3.

З урахуванням (2.2) і виразу (2.3) маємо наступний вид:

$$q_p = \frac{B_p V_v Q}{10000}. \quad (2.4)$$

Витрата насіння за одиницю часу $q_{шт}$ (шт/с), з урахуванням маси 1000 штук насіннєвого матеріалу m визначитися наступним чином:

$$q_{шт} = \frac{q_p * 1000}{m_{1000}}. \quad (2.5)$$

Для визначення об’єму, обіймаючого частинками в об'ємі потоку (V_p) необхідно знати обсяг насіння. Ґрунтуючись на отримані результатів щодо визначення обсягу насіннєвого матеріалу і знаючи значення обсягу 1000 шт. насіння V_{1000} визначимо об’єм V_p (м^3/с), зайнятий частками в об’ємі потоку за одиницю часу:

$$V_p = \frac{q_{шт} \cdot V_{1000}}{1000}. \quad (2.6)$$

З урахуванням об’єму одиничних насінин, їх маси, норми висіву Q, ширини захоплення $У_p$ і робочої швидкості V_c комплексу, об'ємна концентрація для пневматичних систем зернових сівалок визначиться за такою формулою:

$$\alpha = 10 \frac{B_p Q V_{1000} q_g V_c}{m_{1000}}. \quad (2.7)$$

Масова концентрація суміші α_m визначається як співвідношення між кількістю матеріалу q (кг/с), що виходить за 1 с, і кількістю повітря q_g (кг/с), що подається за той же час в пневматичну систему:

$$\alpha_m = \frac{q_p}{q_g}. \quad (2.8)$$

Якщо повітря розглядати як суцільне середовище і виділити з нього деякий об’єм Vg, масу якого позначити mg, то з відношення $q_g = pVg$ можливо визначити масу повітря в певному об’ємі. А знаючи продуктивність вентилятора визначити кількість повітря q_g, що подається за одиницю часу в пневматичну систему комплексу тоді:

$$\alpha_m = \frac{S \cdot Q}{1000 \cdot q_g \cdot V_g}. \quad (2.9)$$

Використовуючи залежність (2.7), розраховано показники об'ємної концентрації насіння для різних типів розподільчих систем, що застосовуються у посівних комплексах. Результати проведених розрахунків, виконаних для насіннєвого матеріалу зернових, внесено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Об'ємна концентрація насіння в пневматичних системах зернових сівалок

Типи системи	Подача висівного матеріалу, кг/с	Продуктивність за матеріалом, $м^3/с$	Продуктивність за повітрям, $м^3/с$	Об'ємна концентрація, α
Групового посіву				
Без надува	1,2…1,5	88,2…114,6*10^5		
З надувом	1,1…2,3	88,2…193,9*10^5	0,47…1,15	1,68…1,87 *10^3
Загального висіву				
Без надува	0,6…1,4	44,1…105,8*10^5		
З надувом	1,2…1,6	88,2…132,3*10^5	0,52…1,07	1,24…1,69 *10^3
Індивідуального висіву				
Без надува	0,5…0,7	35,3…55,9*10^5		
З надувом	0,07…0,13	5,8…9,7*10^5	0,125…0,236	4,11…4,16 *10^3

Аналіз даних, наведених у таблиці 2.1, свідчить, що для розподільників систем посівних комплексів розрахункові значення об'ємної концентрації насіння варіюються в межах $\alpha \approx 10^{-3} \ldots 10^{-6}$.

Процес математичного моделювання руху дисперсних сумішей, як правило, базується на двох основних припущеннях:

1. Розміри включень або неоднорідностей в суміші (наприклад, діаметр дисперсних частинок) у багато разів перевершують молекулярно кінетичні розміри (відстані між молекулами);

2. Розміри включень або неоднорідностей в суміші у багато разів менше відстаней, на яких макроскопічні параметри фаз змінюється істотно (наприклад, довжина або ширина пневмопроводів розподільника).

Окрім цих двох фундаментальних припущень, які дають змогу застосовувати принцип суцільного середовища як для аналізу макроскопічних процесів гетерогенної суміші, так і для процесів на рівні окремих неоднорідностей, в модель вводяться також додаткові, більш вузькі допуски, які в подальшому будуть математично описані.

Відповідно, проведемо аналіз дотримання цих припущень стосовно пневматичних систем посівних комплексів:

1. Форму висівного матеріалу приймаємо кулясту, рівних діаметрів;

2. Кількість висівного матеріалу, який надходить в пневматичну систему сівалки за об'ємної концентрації не значна;

3. Значення щільності зернового матеріалу рівне p_p= 1356,0 кг/м, а значення щільності повітря p_g - l, 25 кг/м;

4. Висівний матеріал - насіння вважаємо нестисливим;

5. Зерновий матеріал має однакову температуру по всьому об'ємі;

6. Потік зернового матеріалу, що транспортується повітряним потоком не змінює горизонтального напрямку;

7. Дроблення насіння незначне менше 1%;

8. Режим обтікання частинки: довжина вільного пробігу молекул повітря становить Lпр = 10^{-7}м. Частинки обтікаються суцільними потокам, оскільки довжина вільного пробігу частинок між зіткненням не перевищує характерного розміру течії;

9. Тиск, що створюється частками: вважаючи, що частки знаходяться в тепловій рівновазі з повітрям. Оцінимо тиск, що створюється частинками:

Із закону Дальтона маємо:

$$p = \left(n + n_p\right)kT \ , \tag{2.10}$$

де n – число молекул повітря в одиниці об’єму суміші

($n = 1.67 \cdot 10^{25}$м$^{-3}$);

n_p – число частинок в одиниці об’єму, м$^{-3}$;

Т – нормальна температура, 273К;

k- універсальна газова стала, спільна для всіх газів.

10. Газо-суспензії як системи характеризуються суттєвою відмінністю у фізичній щільності між несучою (повітряною) та дисперсною фазами. Відносний об’єм, який безпосередньо займає дисперсна фаза, визначається як:

$$\frac{V_{p\Sigma}}{V_{g\Sigma}} = \frac{p_g m_{p\Sigma}}{p_p m_{g\Sigma}}, \quad (2.11)$$

де $V_{p\Sigma}$ - об’єм займаний частинками, м^3;

$V_{g\Sigma}$ - об’єм зайнятий повітрям, м^3;

p_g, p_p- щільність газової та дисперсної фаз, кг/м^3;

$m_{p\Sigma}$, $m_{g\Sigma}$ - витрати частинок і повітря, кг. За умови, що витрата часток не перевищує витрати повітря більш ніж на порядок, об’єм, який вони обіймали частинками, на два порядки менше об’ємів, займаного повітря.

Мала об'ємна частка частинок у суміші зумовлює низьку ймовірність їхньої взаємної гідродинамічної взаємодії, а також дозволяє нехтувати передачею імпульсу в дисперсній фазі, що відбувається через їхні прямі контакти;

11.Зворотній вплив домішки: приймаючи допущення про нестисливість несучої фази, розглянемо рівнянням, що описує зміну кількості руху:

$$p_g \frac{dV_g}{dt} = -\nabla p - F_p, \quad (2.12)$$

де F_p - сила міжфазної взаємодії, яка припадає на одиницю об'єму суміші.

Вона представляється у вигляді:

$$F_p = \alpha f_p, \quad (2.13)$$

де f_p – сила, що діє на одну частинку.

Перейдемо в рівнянні (2.12) до безрозмірних змінних. Віднесемо змінні з розмірністю довжини до характерного масштабу задаймо L, змінна з розмірністю швидкості - до характерної швидкості течії v, час - до L/v, тиск - до p_{gv}, силу міжфазної взаємодії - до p_g v^2/ L. З огляду на моделі міжфазної взаємодії лише як силу гідродродинамічного опору перепишемо у рівнянні (2.12) в вид:

$$p_g \frac{dV_g}{dt} = -\nabla p - \frac{\tau p_p}{\tau_p p_g}(V_g - V_p), \quad (2.14)$$

Де $\tau, \tau p_p$ - час теплових змін і характерний час прогріву частки,с.

З рівняння (2.14) випливає, що вплив частинок на перебіг газової фази визначається відношенням наведених щільності фаз, ставленням характерного часу релаксації до характерного часу задання і швидкістю відносного руху повітряної і дисперсної фаз;

12. Зіткнення часток: розв'язок, отриманий для ідеалізованих умов (тобто, розрахований за відсутності зворотного впливу насіння на повітряний потік та без урахування межнасіннєвих зіткнень), по суті, являє собою той граничний випадок, до якого повинні прямувати розв'язки повних рівнянь.

13. Роль зіткнень між частинками: частота міжнасіннєвих зіткнень є комплексною величиною, що де термінується концентрацією дисперсної фази, гранулометричним складом, кінематичними параметрами, а також гідродинамічним режимом течії.

Для оцінки частоти зіткнень між насінням розглянемо модель двофракційну розряджену систему частинок, що містить частинки масою m_{p1} з концентрацією n_{p1} і частки маси m_{p2} з концентрацією n_{p2}. За час Δt довільна частка маси m_{p1}з ймовірністю p_{12} зіткнеться з тими частинками маси m_{p2}, центри яких знаходяться в циліндрі з площею підставки $\pi(r_{p1} + r_{p2})$ і утворює $|V_{p1} - V_{p2}|\Delta t$.

Введемо константу взаємодії:

$$\mathrm{K}_{12} = \pi\sigma^2 |\mathrm{V}_{\mathrm{p1}} - \mathrm{V}_{\mathrm{p2}}| \mathrm{p}_{12}\ , \quad (2.15)$$

де $\sigma^2 = r_{p1} + r_{p2}$.

Для частинок фракцій m_{p1} і m_{p2} частота зіткнень в одиниці об'єму обчислюється за формулою:

$$\mathrm{V}_{12} = \mathrm{K}_{12}\alpha_{\mathrm{p1}}\alpha_{\mathrm{p2}}, \quad (2.16)$$

Для дрібних насіннин значення має Броунівський рух. Оцінка для частоти зіткнення має вигляд:

$$V_{12} = \frac{2kT}{3\mu}\sigma^2 \frac{\alpha_{p1}\alpha_{p2}}{\tau_{p1}\tau_{p2}}, \quad (2.17)$$

де μ в'язкість повітря, м^2/с.

У крайовому шарі враховується вплив зсуву du/dy. Для обчислення частоти зіткнень насіння використовується співвідношення:

$$V_{12} = 1.33\sigma^3 \alpha_{p1}\alpha_{p2} \left|\frac{du}{dy}\right|. \quad (2.18)$$

Порівняємо середню відстань, яку проходить насіння розміром r_{p1} до зіткнення з насінням розмірами r_{p2}. Враховуючи, що частота зіткнень насіння масою m_{p1} з усім насінням, має масу m_{p2}, дорівнює $К_{12}n_{p2}$, для довжини вільного проходу отримаємо співвідношення:

$$\lambda_1 = |V_{p1} - V_{p2}|\tau = \frac{1}{\pi\sigma^2\alpha_{p2}}. \quad (2.19)$$

Довжина обчислюється за допомогою співвідношення:

$$\lambda_2 = \frac{2r_{p1}^2 Q}{9V}|U_{p1} - U_{p2}|. \quad (2.20)$$

В результаті отримаємо співвідношення:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{6vQr_{p2}^3}{r_{p1}^2 Q^2 |U_{p1} - U_{p2}\alpha_{p2}|}. \quad (2.21)$$

де Q – відношення густини повітря до дисперсних фаз.

Проведені оцінки показують, що при α_{p2} <10^{-3} зіткненнями частинок можна знехтувати. Дана умова для пневматичних систем зернових сівалок дотримується, тому що концентрація частинок α варіює в межах 10^{-3} ... 10^{-6}.

Наведені вище обґрунтування дозволяють зробити висновок, що для повітряно-зернової суміші є припустимим прийняття необхідних допущень та спрощень при її математичному моделюванні з використанням механізму механіки «двофазних середовищ».

2.2. Вибір і уточнення основних рівнянь математичної моделі

Задачі, що стосуються математичного опису течії газів, зазвичай розв'язуються наближеними методами. Цей підхід базується на спрощенні

фундаментальних рівнянь Нав'є-Стокса, що досягається шляхом відкидання (нехтування) тими членами рівнянь, що за певних конкретних умов є малими величинами порівняно з іншими та їхній внесок можна вважати несуттєвим.

Розглянемо рух малої частинки маючу первісну форму паралелепіпеда (рис.2.2). Грані частинки, які мають на початку руху форму прямого паралелепіпеда з ребрами dx, dy, dz. Складові швидкості руху частинки в точці а рівні u, v, ω. тоді складові швидкості:

в точці b рівні:

$$u + \frac{\partial u}{\partial y} dy, \qquad v + \frac{\partial v}{\partial y} dy, \qquad \omega + \frac{\partial \omega}{\partial y} dy;$$

в точці d

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} dx, \quad v + \frac{\partial v}{\partial x} dx, \quad \omega + \frac{\partial \omega}{\partial x} dx;$$

в точці e

$$u + \frac{\partial u}{\partial z} dz, \quad v + \frac{\partial v}{\partial z} dz, \quad \omega + \frac{\partial \omega}{\partial z} dz;$$

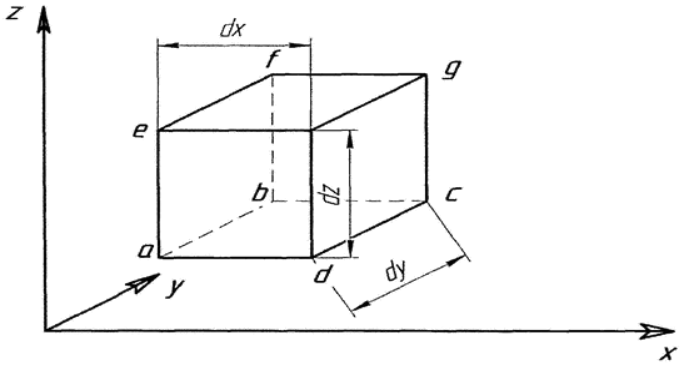


Рис. 2.2. Елементарний паралелепіпед в газовому потоці

Запишемо диференціальне рівняння руху газу Нав'є-Стокса. Наприклад, для руху паралельно осі x:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{dy} \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z}\right)\right] +$$

$$+ \quad \frac{\partial}{\partial t}\left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] \quad + \quad \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right].$$

(2.22)

Після нескладних перетворень у разі незмінного значення в'язкості у всій області потоку (μ = const) маємо:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} =$$

$$= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \frac{1}{3}\mu \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z}\right). \qquad (2.23)$$

Обравши позначення для формули Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2.24)$$

та дивергенції вектора швидкості

$$divW = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad (2.25)$$

Опишемо рівняння (2.23) в більш компактній формі:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} (divW), \quad (2.26а)$$

аналогічно для руху в напрямі осей y і z

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} = Y - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta v + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} (divW), \quad (2.26б)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = Z - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta \omega + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} (divW). \quad (2.26в)$$

У векторній формі рівняння Нав'є-Стокса зведемо до одного виду

$$\rho \frac{dW}{dt} = R - grad\, \rho + \mu \Delta W + \frac{1}{3} \mu\, grad(divW), \quad (2.27)$$

де R- вектор напруги об'ємних сил;

W- вектор швидкості;

В суцільному нестисливому середовищі (p=const) об’єм частинок не змінюється, отже, отримуємо:

$$divW = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \quad (2.38)$$

Як наслідок ці рівняння приймають більш простий вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u,$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = Y - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta v, \quad (2.28а,б,в)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} == Z - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta \omega.$$

У формі вектору:

$$\rho \frac{dW}{dt} = R - grad\, \rho + \mu \Delta W. \quad (2.29)$$

Отримана система, яка побудована з трьох рівнянь, які містять чотири невідомих величини p, u = vx, v=vy, ω = vz. Для отримання замкненої системи рівнянь, необхідної для розв'язання задачі, потрібно залучити, наприклад, рівняння нерозривності. Однак, це призводить до введення в модель ще однієї

невідомої величини – густини. Як наслідок, для повного замикання системи виникає необхідність у двох додаткових співвідношеннях. У якості таких замикаючих рівнянь доцільно використовувати рівняння збереження маси для всієї повітряно-зернової суміші та рівняння збереження імпульсу.

Рівняння збереження маси для повітряно-зернової суміші запишемо наступним чином:

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha_1)}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\rho_g v_g \alpha_1\right) = \overrightarrow{\nabla}\cdot\left(\left(\rho_g D_1 + \frac{\mu t}{Sc_t}\right)\vec{\nabla}\,\alpha_1\right) + Q^p_{mass}, \qquad (2.30)$$

де ρ_g - щільність несучої фази, кг / м^3;

V - лапласіан;

u_g - швидкість несучої фази, м / с;

Q^p_{mass} - джерело маси частинок, кг / м·с.

α_1 - концентрація повітряно-зернової суміші;

D_1 - коефіцієнт дифузії;

μ_t- турбулентна динамічна в'язкість, кг / м·с;

Sct - турбулентне число Шмідта

$$Sc_t = \frac{\mu t}{\rho_g D_t} = 1. \qquad (2.31)$$

Джерело маси за рахунок частинок:

$$Q^p_{mass} = \sum\left(m_{p,\text{вх}} - m_{p,\text{вих}}\right)\frac{N_{pj}}{j\,\Omega_{cell}}, \qquad (2.32)$$

де $m_{p.\text{вх}}, m_{\text{р.вих}}$ - маса зернового матеріалу на вході і виході, кг;

Npj-число часток, що пролітають за секунду по траєкторії j, с$^{-1}$;

Ω_{cell} - обсяг розрахункової комірки, м^3.

Докладніше запишемо рівняння (2.35) для пневматичної системи посівного комплексу:

$(m_{\text{р.вх}}\text{-}m_{\text{р.вих}})_f$ - даний вираз приймається як витрата насіння q (кг/с) за одиницю часу;

Npj - витрата насіння за одиницю часу $q_{\text{шт}}$, (шт/с);

Ωcell - Обсяг аналізованої області Vроз, м^3.

Підставивши в рівнянні (2.35) прийняті вирази, маємо формулу джерела мас для пневматичних систем посівних комплексів:

$$Q_{mass}^{p} = q\frac{q_{\text{шт}}}{V_{\text{розр}}} \tag{2.33}$$

Масову концентрацію. повітря знайдемо з рівняння:

$$\alpha + \alpha_1 = 1 \tag{2.34}$$

Рівняння збереження імпульсу запишемо як:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{g}} v_{\text{g}})}{\partial_t} + \overrightarrow{\nabla}\cdot\left(\rho_{\text{g}} v_{\text{g}} \otimes v_{\text{g}}\right) = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla}\cdot\tau_{\text{g}}, \alpha\beta + \rho_{E\text{g}}\,\text{g}, \tag{2.35}$$

де P - відносний тиск, Па;

g - прискорення вільного падіння, м/с;

$$\tau_{\text{g},\alpha\beta} = -\frac{2}{3}\rho_{\text{g}} k_{\text{g}}\delta_{\alpha\beta} + \mu_{\text{g},eff}\left(\frac{\partial v_{\text{g}\beta}}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial v_{\text{g}\alpha}}{\partial x_\beta}\right) - \frac{2}{3}\mu_{\text{g},eff}\frac{\partial v_{\text{g}\gamma}}{\partial x_\gamma}\delta_{\alpha\beta}, \tag{2.36}$$

де kg - турбулентна енергія несучої фази, м^2/с^2.

Ефективна в'язкість несучої фази визначамо наступним чином:

$$\mu_{\text{g},eff} = \mu_{\text{g}} + \mu_t, \tag{2.37}$$

де μg- динамічна в'язкість несучої фази, кг/м·с;

μt - турбулентна в'язкість, кг/м·с.

Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial\left(\rho_{\text{g}} h_{\text{g}}(T_{\text{g}})\right)}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\rho_{\text{g}} v_{\text{g}} h_{\text{g}}(T_{\text{g}})\right) = -\vec{\nabla}\left\{-\left(-\left(\frac{\lambda_{\text{g}}}{cp_{\text{g}}} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\vec{\nabla}h_{\text{g}}(T_{\text{g}})\right)\right\}, \tag{2.38}$$

де Tg - відносна температура несучої фази, К;

ʎg - коефіцієнт теплопровідності несучої фази, кг·м/с^3 ·К;

Cpg - питома теплоємність несучої фази, Дж/кг·К.

Турбулентне число Прандтля рівне одиниці:

$$Pr_t = \frac{\mu_t cp_{\text{g}}}{\lambda_t} = 1, \tag{2.39}$$

Рівняння твердої фази (рівняння руху зерна) записується наступним чином:

$$\frac{dX_p}{dt} = u_p, \tag{2.40}$$

де Xp - положення частинки, м;

t- час, с;

В загальному вигляді останнє рівняння запишеться так:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi d_{p^2}}{\text{gm}} C_D \rho_{\text{g}} |v_r| v_r + \text{g} \left(1 - \frac{\rho_{\text{g}}}{\rho_{\text{g}}}\right),$$

(2.41)

де d_p - діаметр частинки, м;

C - коефіцієнт опору;

m - маса частинки, кг;

p_p - щільність частинки, кг/м^3;

v_r - швидкість частинки відносної несучої фази, м/с.

Підставляючи в рівняння значення еквівалентного діаметра, що приймається для розрахунків, опишемо кінцеву залежність у наступному вигляді:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi(\varphi \cdot d_{\text{ш}})^2}{\text{gm}} C_D \rho_{\text{g}} |v_r| v_r + \text{g} \left(1 - \frac{\rho_{\text{g}}}{\rho_\rho}\right),$$

(2.42)

Тоді загальна система рівнянь течії двофазного середовища «повітря - зерно» з урахуванням рівнянь та еквівалентного діаметра запишеться наступним чином:

$$\left\{\begin{array}{c} \rho\frac{\partial u}{\partial t} = \mathrm{X} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\Delta u, \\ \rho\frac{\partial v}{\partial t} = \mathrm{Y} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\Delta v \\ \rho\frac{\partial \omega}{\partial t} == \mathrm{Z} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\Delta\omega \\ \frac{\partial(\rho_g\alpha_1)}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\rho_g v_g \alpha_1\right) = \overrightarrow{\nabla}\cdot\left(\left(\rho_g D_1 + \frac{\mu t}{Sc_t}\right)\vec{\nabla}\,\alpha_1\right) + Q^p_{mass} \\ \frac{\partial(\rho_{\mathrm{g}} v_{\mathrm{g}})}{\partial_t} + \overrightarrow{\nabla}\cdot\left(\rho_{\mathrm{g}} v_{\mathrm{g}} \otimes v_{\mathrm{g}}\right) = -\vec{\nabla}P + \vec{\nabla}\cdot\tau_{\mathrm{g}}, \alpha\beta + \rho_{E\mathrm{g}}\,\mathrm{g} \\ \frac{\partial\rho_{\mathrm{g}}}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\rho_{\mathrm{g}}\tau_{\mathrm{g}}\right) = Q^p_{mass} \\ Q^p_{mass} = q\,\frac{q_{\text{шт}}}{V_{\text{розр}}} \\ \frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi(\varphi\cdot d_{\text{ш}})^2}{\mathrm{gm}} C_D\rho_{\mathrm{g}}|v_r|v_r + \mathrm{g}\left(1 - \frac{\rho_{\mathrm{g}}}{\rho_\rho}\right) \\ d_p = d_{\text{эк}} = \varphi\cdot d_{\text{ш}} \end{array}\right. \quad (2.43)$$

Для розв'язання даної системи рівнянь необхідно задати значення усіх величин, що входять до системи, у початковий момент часу (t=0), а також визначити межі розрахункової області. Цей процес називається постановкою початкових та граничних умов задачі. Під час руху частка (насінина) зазнає впливу опору з боку несучого середовища, який кількісно визначається силою аеродинамічного опору. Виникнення цієї сили є прямим наслідком наявності відносної швидкості, тобто різниці між швидкістю повітряного потоку та швидкістю руху самої частки (рис. 2.3). Вплив сили аеродинамічного опору призводить до зміни кінематичних параметрів частки: до її прискорення (за умови U > V) або, навпаки, до її гальмування (за умови U < V). Величина цієї сили значною мірою детермінується значенням коефіцієнта аеродинамічного опору частки CD.

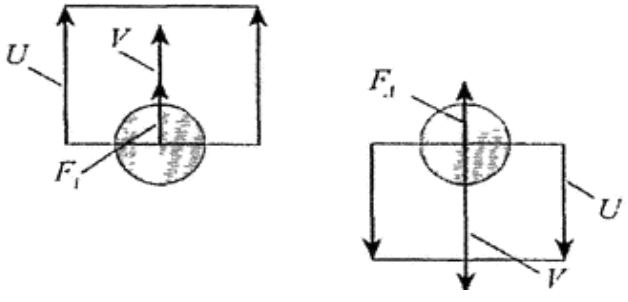


Рис. 2.3. Схема руху частки під дією повітряного потоку

Коефіцієнт опору частинки CD для більшості двофазних середовищ визначається згідно кривої Релея в залежності від числа Рейнольдса Re (CD = =f(Re) (рис. 2.4).

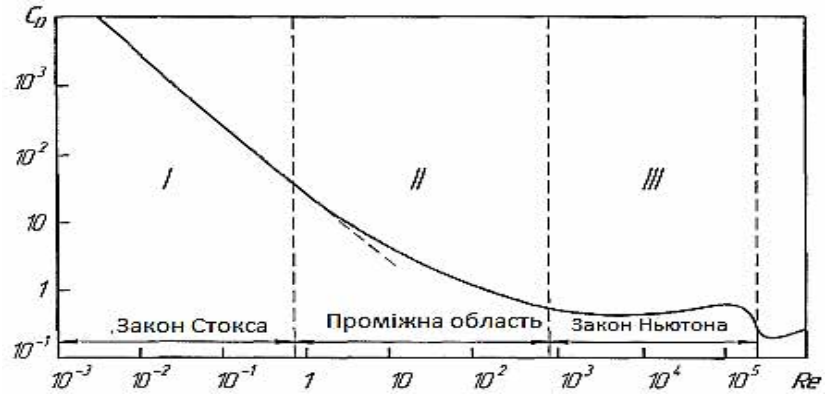


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнта опору кулькової частинки CD від критерію Re (крива Релея).

Число Рейнольдса, що характеризує стан потоку в'язкого середовища (повітря) можна визначити як:

$$R_e = \frac{d_p v_r}{v} = \frac{d_p v_r \rho}{\eta}, \tag{2.44}$$

де v - кінематична в'язкість повітря, м/с;

ŋ- динамічна в'язкість повітря, Н·с/м^2 ;

р - щільність середовища (р = 1,225).

υ_r- швидкість частинки відносно несучої фази, визначається як:

$$v_r = v_g - v_p,$$

(2.45)

Якщо характерний розмір тіла прийнятий рівним еквівалентному діаметру l = dp, то отримаємо діапазон можливих чисел Рейнольдса для пневматичної системи комплексу:

$$R_e = \frac{(2{,}2-2{,}5)1{,}225}{1{,}8} 10^2 v_r = (149 \dots 170) v_r$$

(2.46)

В умовах ламінарного режиму обтікання частинки значення коефіцієнта CD можуть бути визначені з використанням класичної теоретичної формули

Стокса, яка є загальновідомою та має надійне експериментальне підтвердження:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \quad ,$$

(2.47)

Область застосування закону Стокса практично визначається розмірами частинок і необхідною точністю: при $1{,}6 \cdot 10^4 < dp < 3 \cdot 10^4$ мм, неточність становить 1%; при $1{,}6 \cdot 10^4 < dp < 7 \cdot 10^4$ мм - 10%

Для проміжної області кривої Релея були апроксимовані різні аналітичні залежності. Водночас, реальні умови руху частки в суцільному середовищі суттєво відрізняються від тих ідеалізованих умов, за яких було отримано криву Релея (тобто, стале ламінарне обтікання ідеальної сфери потоком з рівномірним полем швидкостей). Це призводить до того, що експериментально визначені значення CD можуть кардинально – «на кілька тисяч відсотків» – відхилятися від значень стандартної кривої.

Такі значні розбіжності зумовлені комплексом факторів: відмінністю реальної форми частинки від ідеально сферичної, наявністю шорсткості її поверхні, нерівномірністю руху (наявністю прискорення), обертанням частинки навколо власної осі, та, особливо, початковою турбулентністю самого набігаючого потоку.

Для випадків обтікання частинки ламінарним потоком за умов, коли Re > 0,5, достатньо надійних та точних теоретичних формул у науковій літературі не існує. У таких інженерних задачах на практиці змушені покладатися на емпіричні дані. Ці дані отримують, зокрема, з використанням апроксимуючих формул, запропонованих різними авторами, а також на основі численних експериментів, проведених для умов усталеного падіння сфери у нерухомому середовищі (повітрі) або при обтіканні сфери ламінарним потоком у аеродинамічній трубі (тунелі).

Згідно з виразом нами встановлено, що для пневматичної системи посівного комплексу числа Рейнольдса знаходяться в діапазоні $8 \cdot 10^2 < Re < 10^5$. Даний режим течії відповідає області розвитої турбулентності, де опір

характеризується законом Ньютона. На цій ділянці коефіцієнт опору CD автомоделей щодо числа Рейнольдса показана залежність CD від Re виражається прямою ділянкою у логарифмічних координатах. Але, дана закономірність справедлива тільки для округлих частинок. Для насіння сільськогосподарських культур що має складну геометричну форму, залежність CD = f(Re) необхідно визначати експериментальним шляхом.

2.3. Визначення початкових та граничних умов моделі технологічного процесу

Технологічний процес функціонування пневматичного зернового комплексу реалізується за наступним алгоритмом (рис. 2.5): обертальний рух від приводного колеса передається через трансмісійну систему, приводячи в дію дозуючу котушку висівного апарату. Насіннєвий матеріал надходить самопливом із завантажувального бункера безпосередньо на цю котушку.

Контроль за нормою висіву (витратою) посівного матеріалу здійснюється шляхом регулювання активної довжини дозуючої котушки. Для унеможливлення неконтрольованого просипання насіннєвого матеріалу, а також для запобігання його механічного пошкодження краї котушки оснащені спеціальним гумовим ущільнювачем та нейлоновою щіткою. Під час функціонування вентилятора передача енергії повітряному потоку відбувається в момент його проходження через лопаткові канали робочого колеса. Аналітичне визначення тиску, що генерується вентилятором, вимагає детального розгляду динаміки повітряного потоку в цих міжлопаткових каналах.

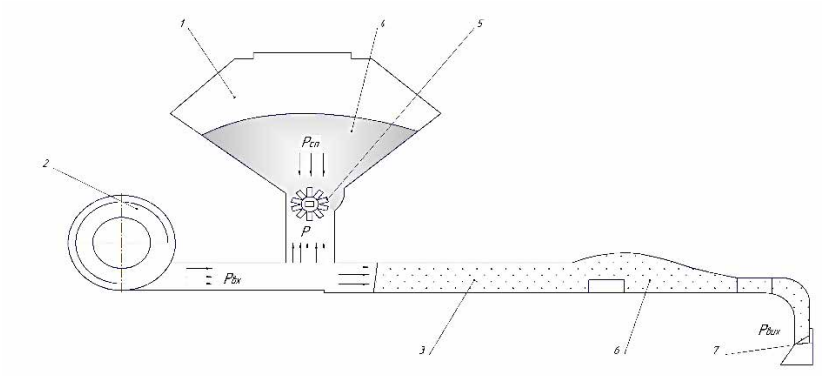


Рис. 2.5. Технологічна схема посівного комплексу

1- бункер; 2 - вентилятор; 3 - пневмопровід; 4 - насіння; 5 – котушка висівного апарату; 6 - розподільний пристрій;7 - сошник.

Теоретичний розрахунок величини повного тиску вентилятора базується на запровадженні низки допущень, а саме:

- щільність повітря незмінна;

- витрата повітря через робоче колесо дорівнює витраті повітря через вентилятор;

- повітряний потік, що проходить через вентилятор, тільки набуває енергію;

- число лопаток робочого колеса нескінченно велика та траєкторія витання повітря збігається із профілем лопатки;

- всі лопатки колеса працюють однаково.

На рисунку 2.6, а, представлено трикутники швидкостей, що характеризують рух частинки повітря в точках входу на лопатку (1) та сходу з неї (2). На схемі прийняті наступні умовні позначення:

u - переносна або окружна швидкість, спрямована по дотичній до даної точці кола;

ω - відносна швидкість, спрямована по дотичній до лопатки в даній точці;

с - абсолютна швидкість, рівна геометричній сумі швидкостей u і ω.

Індекс «1» віднесений до вхідного перетину міжлопатевого каналу, а індекс «2» - до вихідного перетину.

Повний тиск, якого набуває повітряний потік під час проходження крізь робоче колесо (вентилятор), визначається як різниця повних тисків на виході з колеса та на вході до нього, тобто:

$$\mathrm{H_T} = \mathrm{H_н} - \mathrm{H_B}$$

або

$$\mathrm{H_T} = \mathrm{H_{C2}} + \frac{PgC_2^2}{2} - \mathrm{H_{C1}} - \frac{PgC_1^1}{2}, \qquad (2.48)$$

де $\mathrm{H_C}$ – статичний тиск;

$\frac{PgC_2^2}{2}$ – динамічний тиск;

Pg - густина,кг/м^3.

Приріст енергії повітряного потоку відбувається уздовж всієї довжини лопатки, отже, можна записати:

$$\mathrm{H_{C2}} = \frac{\mathrm{P}\omega_2^2}{2} = \mathrm{H_{C1}} + \frac{\mathrm{P}\omega_1^2}{2} + \mathrm{A}, \qquad (2.49)$$

де A - повна питома енергія, отримана повітряним потоком від лопатки за рахунок відцентрових сил інерції;

ω – відносна швидкість, м/с.

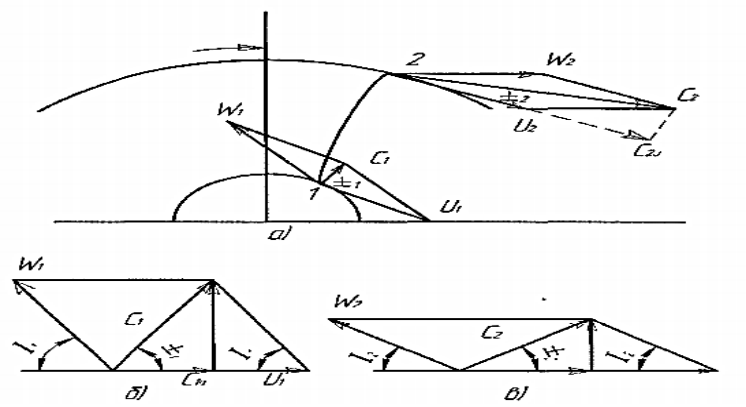


Рис. 2.6. Трикутники швидкостей повітря при вході і виході з лопаток робочого колеса: а) лопатки загнуті вперед; б) вхід на лопатку загнуту назад; в) вихід з лопатки, загнутої назад.

Відцентрова сила буде рівною:

$$\mathrm{P_C} = m\omega^2 r, \qquad (2.50)$$

де ω – кутова швидкість, рад/с.

Розділивши силу Рс на об’єм V=$\frac{m}{Pg}$, отримуємо відцентрову силу, відношення до одиниці об'єму.

Роботу сили Рс на шляху руху повітря в міжлопатевому каналі можна визначити за формулою:

$$A = \int_{r1}^{r2} P_g \omega^2 r dr.$$

Після інтегрування замінивши $\omega^2 r^2 = u^2$ отримаємо:

$$A = \frac{P_g u_2^2}{2} - \frac{P_g u_1^2}{2}, \quad (2.51)$$

де u – переносна швидкість, м/с.

Підставивши значення А з рівняння (2.51) в рівняння (2.49), отримаємо:

$$\mathrm{H_{C2}} - \mathrm{H_{C1}} = \frac{P_g}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) + \frac{P_g}{2}(u_2^2 - u_1^2). \quad (2.52)$$

Замінивши $\mathrm{H_{C2}} - \mathrm{H_{C1}}$ в рівнянні (2.48) їх величиною з рівняння (2.52), отримуємо теоретичну величину повного тиску, що розвивається відцентровим вентилятором:

$$\mathrm{H_T} = \frac{P_g}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) + \frac{P_g}{2}(u_2^2 - u_1^2) + + \frac{P_g}{2}(\mathrm{c}_2^2 - \mathrm{c}_1^2). \quad (2.53)$$

де с – абсолютна швидкість, м/с.

Розглядаючи трикутники швидкостей на вході і виході потоку повітря з робочого колеса, знаходимо на підставі теореми косинусів (для косокутних трикутників):

$$\omega_1^2 = u_1^2 - c_1^2 - 2u_1 c_1 cos\alpha_1;$$
$$\omega_2^2 = u_2^2 - c_2^2 - 2u_2 c_2 cos\alpha_2.$$

Тоді рівняння (2.53) можна записати у вигляді:

$$\mathrm{H_T} = P_g(u_2 c_2 cos\alpha_2 - u_1 c_1 cos\alpha_1). \quad (2.54)$$

де $\mathrm{c}_u = \mathrm{c} * cos\alpha$ – швидкість закручування; $\frac{C_u}{u} = \varphi$ – коефіцієнт закручування.

Тому рівняння (2.49) може мати вигляд:

$$H_T = P_g(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}), \quad (2.55)$$

або

$$H_T = P_g(\varphi_2 u_2 - \varphi_1 u_1) \quad (2.56)$$

де φ_1, φ_2 – коефіцієнти закручуваня.

Середня швидкість повітряного потоку над шаром знаходиться з виразу:

$$v_{\text{сер}} = K_m V_m \frac{d_c^2}{d_c^2}. \quad (2.57)$$

Для теоретичного визначення критичної швидкості фільтрації повітряного потоку більшість авторів застосовують критерій Рейнольдса.

$$u_{np} = \frac{vRe}{d_{\text{ек}}\varphi}, \quad (2.58)$$

де v = 0,0000156 м^2/с - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря.

Залежність аеродинамічного опору шару від швидкості повітряного потоку є нелінійною та змінюється залежно від стадії псевдозрідження. В початковому інтервалі швидкостей фільтрації ця залежність апроксимується як близька до прямолінійної.

Теоретично опір псевдозрідженим шаром виражається залежністю у вигляді:

$$\Delta P_{\text{ф}} = (p_p - p_g)(1 - \varepsilon)hg. \quad (2.59)$$

де $\Delta P_{\text{ф}}$ - гідродинамічний опір псевдозрідженим шаром, Н/м^2;

p_g - щільність повітря, дорівнює $p_в$ = 1,225 кг/м^3;

p_p - відносна щільність зернівок, визначається як відношення середньої щільності матеріалу до щільності стандартного речовини. за стандартну речовину прийнята вода при температурі 4°С, має щільність 1000 кг/м^3;

h - висота псевдозрідженного шару, м;

e - пористість шару насіння.

Відносна щільність (безрозмірна величина) визначається по формулі:

$$P_p = \frac{P_{\text{зернини}}}{P_{\text{води}}}. \quad (2.60)$$

У нашому випадку щільність зернового матеріалу (пшениці) Рзернини = 1.366 кг/м^3. Значить Рр= 1.366 кг/м^3.

Для коректної постановки задачі розрахункова область була декомпозована (розділена) на чотири основні границі: вхідний переріз повітряного потоку (від вентилятора), зона подачі насіннєвого матеріалу (з

дозуючої котушки), внутрішні робочі поверхні (стінки) пневмосистеми та вихідні перерізи (на виході з сошників).

Сукупність цих поверхонь визначає межі розрахункової області. Відповідно, математична модель, що описує рух повітряно-зернової суміші в розподільній системі зернової пневматичної сівалки, визначається наступним набором граничних умов (рис. 2.7):

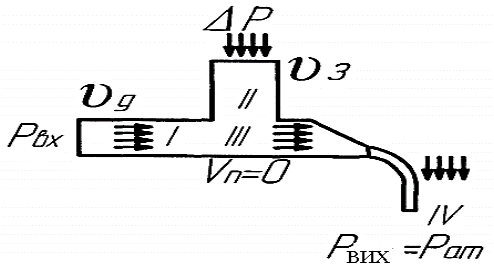


Рис. 2.7. Граничні умови функціонування моделі: *I* – вхід повітря з вентилятора; *II*-вхід насіннєвого матеріалу з котушки; *III*-внутрішні робочі поверхні пневмосистеми; *IV*-вихід насіння з сошників.

- вхід повітря (вхід повітря з вентилятора) задається як нормальна швидкість з тиском, що розраховується за формулою 2.51. Задаються величинами або швидкість (Vg) або тиск (Рв);

- стінка (внутрішні робочі поверхні пневмосистеми) – визначається параметрами швидкість і тиск. На стінці для ідеального повітря задається умова

непроникності для нормальної швидкості (Vn=0).

Закон взаємодії частинок зі стінкою характеризується коефіцієнтами відновлення нормальної v_{2n} і тангенціальною швидкості v_{2t}:

$$v_{2n} = -K_n v_{1n}, \quad v_{2t} = -K_t v_{1t}. \tag{2.61}$$

де K_n, K_t коефіцієнти відновлення швидкості після і до удару;

v_{1n}, v_{1t} - швидкість частинок до удару об стінку.

При К ≈ 1 зіткнення частинки зі стінкою називається пружним.

Після зіткнення частинки зі стінкою без ковзання швидкості частинки v_{p2} знаходяться із співвідношень:

$$v_{\text{p2}} = \frac{1}{7}(5v_{p1} + 2r_p\omega_{p1}), \tag{2.62}$$

$$v_{\text{p2}} = -k_n v_{p1}, \tag{2.63}$$

$$\omega_{\text{p2}} = \frac{v_{\text{p2}}}{r_p}. \tag{2.64}$$

- вільний вихід (вихід насіння з сошників). Дана гранична умова дотримується параметром «нульового тиску». Це пов'язано з тим, що тимчасовий матеріал потрапляє в простір відкритий сошником, де існує тільки атмосферний тиск. В результаті чого отримуємо Р = Ратм.

- вхід насіннєвого матеріалу (вхід насіннєвого матеріалу з котушки). Визначеним параметром є тиск і кількість насіннєвого матеріалу. Тиск шару фільтрації насіннєвого матеріалу замінюється тиском $\Delta P_{\Phi} = \Delta P$, що розраховується за формулою (2.59), а кількість насіннєвого матеріалу встановлюється відповідно до виразу (2.3).

Повний набір початкових та граничних умов, прийнятих для коректного функціонування моделі, що описує рух повітряно-зернової суміші в розподільчій системі зернової сівалки, зведено до таблиці 2.4.

Таким чином, у контексті моделювання двофазної течії «повітря-зерно», граничні умови по суті є математичним описом конструктивних параметрів пневматичної системи та технологічних параметрів її функціонування. Початкові умови, в свою чергу, визначають вихідні фізичні характеристики компонентів потоку – повітряного середовища та насіннєвого матеріалу.

2.4. Числова реалізація моделі

Чисельна реалізація розробленої моделі, що описує рух повітряно-зернової суміші в розподільчих пристроях пневматичних сівалок, була здійснена із застосуванням програмного комплексу Autodesk. Цей програмний продукт є сучасним та потужним інструментом для дослідження складних гідрогазодинамічних процесів, а також вирішення інших задач, що описуються системами диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Його функціонал істотно розширює можливості аналізу, оскільки дозволяє отримувати не лише інтегральні, але й диференціальні характеристики

потоку, зокрема: поля швидкостей, тисків, температур, а також візуалізувати лінії струму та траєкторії руху частинок.

Необхідною передумовою для проведення чисельних розрахунків є створення тривимірної твердотільної моделі геометрії розподільника, збереженої у форматі *.stl* або *.vrml* (рис. 2.8). Для вирішення цього завдання (побудови 3D-моделі) було використано програмний продукт Inventor. Створена твердотільна модель імпортується безпосередньо в програмний комплекс

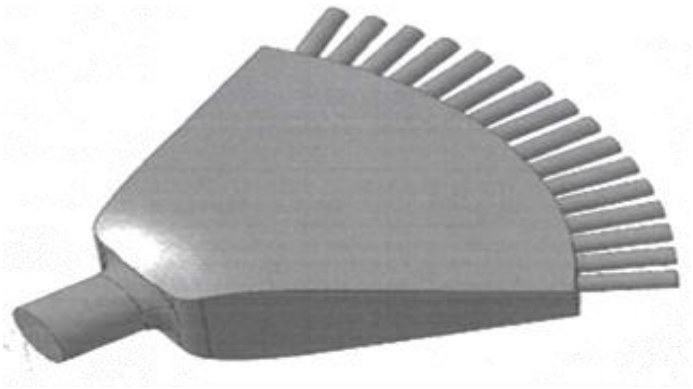


Рис. 2.8. Твердотільна модель розподільника насіння пневматичного посівного комплексу

На першому кроці необхідно створити розрахункову область, встановити початкові і граничні умови функціонування моделі.

Для цього за допомогою програмного забезпечення вибираємо математичну модель «нестисливої рідини» і вводимо необхідні фізичні параметри:

• опорні величини (температура 293К, тиск 101330 Па);

• параметри моделі - стандартна «к-е» модель турбулентності;

• речовина - повітря, вибираємо з бази даних програми;

• частинка - зерно вводимо параметри в базу даних програми і вибираємо її для розрахунків

Наступним етапом є визначення граничних умов для розрахункової області обраної математичної моделі. У випадку, що розглядається, було встановлено чотири типи граничних умов. Наступним кроком є побудова розрахункової сітки. Програмний комплекс використовує для розв'язання

рівнянь математичної моделі технологію прямокутної адаптивної локально подрібненої сітки.

Можливість адаптації цієї сітки дозволяє коректно враховувати дрібні деталі геометрії розрахункової області та описувати зони з високими градієнтами розрахункових величин. Сутність технології полягає у наступному: спочатку у всій розрахунковій області вводиться початкова прямокутна сітка. Потім виділяються специфічні підобласті (наприклад, з особливостями геометрії або течії), де потрібна вища точність розрахунку. У цих підобластях сітка автоматично подрібнюється.

У задачі, що розглядається, було встановлено початкову розрахункову сітку розмірністю 100x50x50, що після адаптації склала 87610 розрахункових осередків.

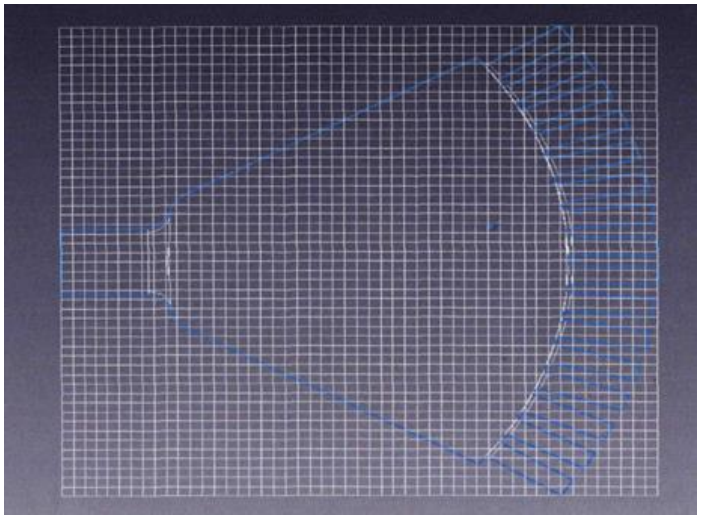


Рис. 2.9. Розрахункова сітка

Далі проводиться розрахунок.

Отже, застосування програмного комплексу відкриває можливість для розрахунку та подальшої оптимізації моделі пневматичного розподільника. Це дозволяє отримувати розрахункові дані, що демонструють високий ступінь кореляції з реальними конструктивно-технологічними параметрами.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Результати досліджень по визначенню фізико-механічних властивостей насіння

Коефіцієнт аеродинамічного опору CD є ключовою фізико-механічною властивістю насіння, яка надає комплексну (інтегральну) оцінку характеру його руху під впливом повітряного потоку. Було проведено серію лабораторних експериментів. Дослідження проводилися на вітрильному класифікаторі Petkus K293 з метою встановлення емпіричної залежності коефіцієнта опору CD від числа Рейнольдса Re для різних зернових культур. Розрахунок коефіцієнта опору CD та числа Рейнольдса – за формулою (2.22). Еквівалентний діаметр частинок d_p, що є параметром у зазначених формулах, визначався на основі об'єму зернівки. Цей об'єм, у свою чергу, був встановлений експериментально за методикою, детально описаною відомими дослідниками. Експериментальні значення об'ємів для насіння пшениці, жита та ячменю наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Статистичні характеристики обсягу зерна

Насіння культур	Середній об’єм 1000шт. зерен, $м^3$	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації
Пшениця	$27{,}0*10^{-6}$	0,10	0,03
Жито	$22{,}6*10^{-6}$	0,10	0,04
Ячмінь	$38{,}4*10^{-6}$	0,29	0,07

Експериментально встановлені кореляції між коефіцієнтом аеродинамічного опору та числом Рейнольдса для насіння досліджуваних культур представлені у таблиці 3.3.

Окрім цього, в таблиці зведено розрахункові значення еквівалентного діаметра частинок (d_p). Ці значення були визначені з використанням модифікованих залежностей (формула 6, таблиця 2.1), які інтегрують

коефіцієнт форми та реальний (експериментально визначений) об'єм одиничного насіння пшениці, жита і ячменю.

Аналіз отриманих залежностей підтверджує фундаментальну фізичну закономірність: частинки, що створюють більший аеродинамічний опір, за умови дії однакових рушійних сил повітряного потоку, переміщуються з меншою швидкістю відносно цього потоку, аніж частинки з нижчим коефіцієнтом опору.

По виду кривих залежності $C_D = f(Re)$ схожі з залежністю (2) зони Релея (рис. 2.4), де вона описується законом Ньютона. Однак аппроксимації отриманих нами залежностей законом Ньютона, як і було, припущено, дають неприпустимі похибки.

В рамках даного дослідження, кореляція між коефіцієнтом опору насіння та числом Рейнольдса апроксимується експоненційною залежністю наступного виду:

$$C_D = A \cdot e^{-bRe}, \tag{3.1}$$

де A,b - емпіричні коефіцієнти, що залежать від культури.

При цьому рівень значущості становить 0,95.

У таблиці 3.2 наведені значення емпіричних коефіцієнтів для насіння різних культур.

Отримана функція (3.1) повинна бути включена в отриману систему рівнянь динаміки (2.41) замість стандартних виразів визначення C_D з урахуванням коефіцієнтів A і b залежно від виду розглянутої культури.

Таблиця 3.2. Значення емпіричних коефіцієнтів для формули 3.1

Емпіричні коефіцієнти	Культури		
	Пшениця	Ячмінь	Жито
A	4,27	4,42	4,10
b	0,001	0,001	0,001

Таблиця 3.3. Експериментальні значення коефіцієнта опору від числа Рейнольдса

Тип культури											
Пшениця				Жито				Ячмінь			
D_P	Vg	Re	C_D	D_P	Vg	Re	C_D	D_P	Vg	Re	C_D
0,0025	3	625	4,041	0,0024	3	600	3,902	0,0026	3	650	4,203
0,0025	4	833,3	2,273	0,0024	4	800	2,191	0,0026	4	866,7	2,364
0,0025	5	1042	1,455	0,0024	5	1000	1,405	0,0026	5	1083	1,513
0,0025	6	1250	1,01	0,0024	6	1200	0,976	0,0026	6	1300	1,051
0,0025	7	1458	0,742	0,0024	7	1400	0,717	0,0026	7	1517	0,772
0,0025	8	1667	0,568	0,0024	8	1600	0,549	0,0026	8	1733	0,591
0,0025	9	1875	0,449	0,0024	9	1800	0,434	0,0026	9	1950	0,467
0,0025	10	2083	0,364	0,0024	10	2000	0,351	0,0026	10	2167	0,378
0,0025	11	2292	0,301	0,0024	11	2200	0,29	0,0026	11	2383	0,313
0,0025	12	2500	0,253	0,0024	12	2400	0,244	0,0026	12	2600	0,263
0,0025	13	2708	0,215	0,0024	13	2600	0,208	0,0026	13	2817	0,224
0,0025	14	2917	0,186	0,0024	14	2800	0,179	0,0026	14	3033	0,193
0,0025	15	3125	0,162	0,0024	15	3000	0,156	0,0026	15	3250	0,168
0,0025	16	3333	0,142	0,0024	16	3200	0,137	0,0026	16	3467	0,148
0,0025	17	3542	0,126	0,0024	17	3400	0,122	0,0026	17	3683	0,131
0,0025	18	3750	0,112	0,0024	18	3600	0,108	0,0026	18	3900	0,117

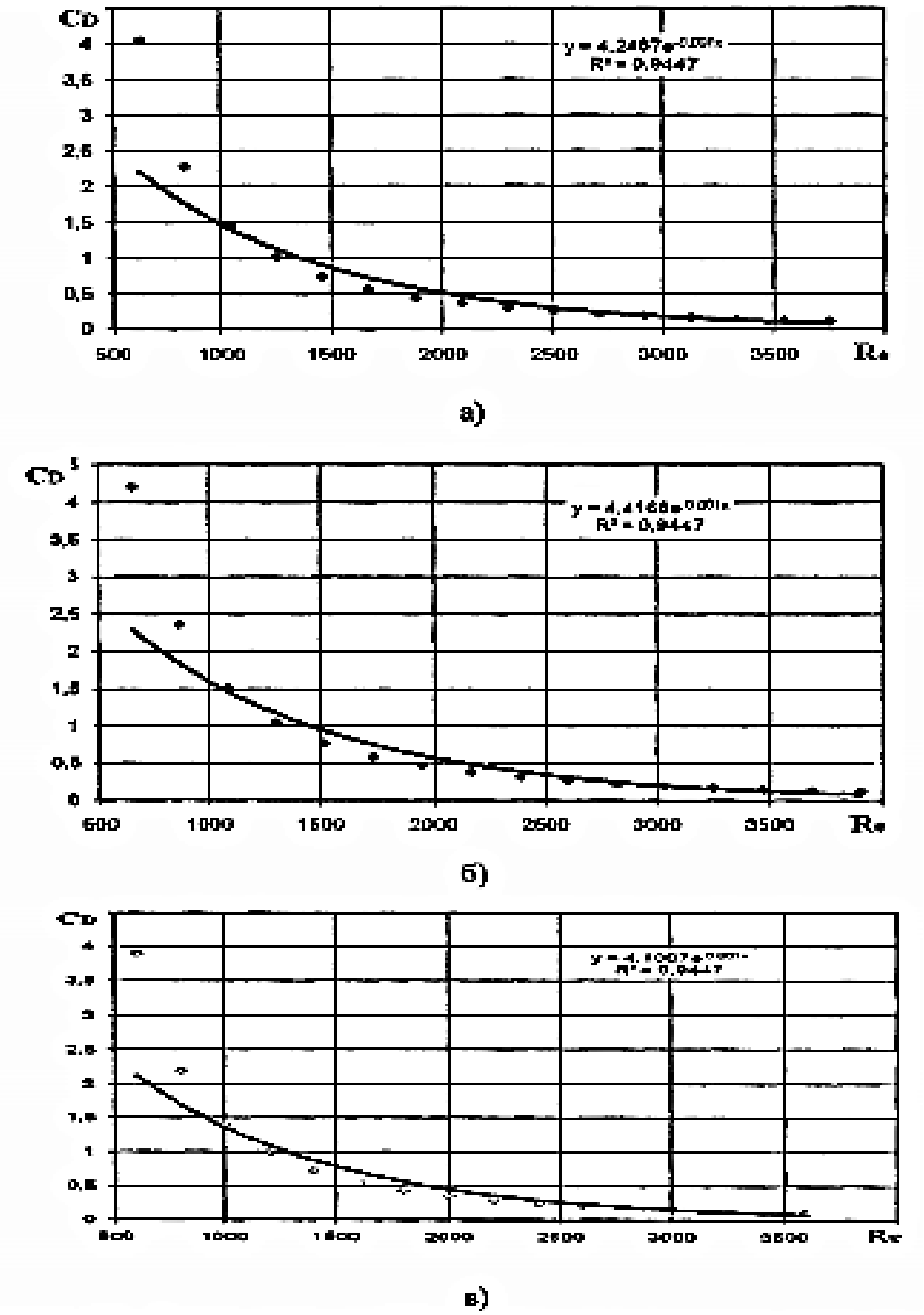


Рис. 3.3. Залежності коефіцієнтів опору насіння від числа Рейнольдса для насіння пшениці (а), ячменю (б), жита (в)

3.2. Обґрунтування форми бічних стінок розподільника

Наукове обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів розподільчої системи сівалки вимагає детального аналізу динаміки руху повітряно-зернової суміші.

Об'єктом дослідження є рух повітряного потоку, що виходить із патрубка круглого перерізу, діаметр якого відповідає вихідному отвору вентилятора. Як було встановлено раніше, ключовими технологічними параметрами, що визначають роботу розподільника, є швидкість повітряного потоку та норма подачі насіння. З огляду на це, обґрунтування параметрів розподільника проводилося шляхом варіювання вхідної швидкості повітряного потоку.

У ході чисельного моделювання було виявлено, що на виході з патрубка повітряно-зернова суміш зазнає різкого розширення, при цьому потік відхиляється на певний кут, величина якого залежить від швидкості руху повітря v_g. У рамках дослідження були визначені кутові відхилення векторів швидкості повітряно-зернової суміші від початкового напрямку руху та розраховані їхні статистичні характеристики (дисперсія $Д\gamma$, середньоквадратичне відхилення $\sigma\gamma$, варіація $v\gamma$).

Таблиця 3.4. Статистичні характеристики кута відхилення векторів повітряного потоку

Значення	Швидкість повітряного потоку vg, м/с					
	10	12	14	15	16	18
Середнє значення кута γ	33,3	33,8	34,3	34,6	35,1	36
Дисперсія, $Д\gamma$	42,45	73,73	49,34	76,71	64,99	67,55
Середнє квадратичне відхилення, $\sigma\gamma$	6,51	8,58	7,02	8,76	8,06	8,232
Варіація, $v\gamma$%	19.57	25.40	20.48	25.31	22.973	22.836

Як показали розрахунки, повітряно-зернова суміш при виході з пневмопроводу залежно від швидкості потоку Vg і відхиляється на кут в межах 33,3 ... 36 °.

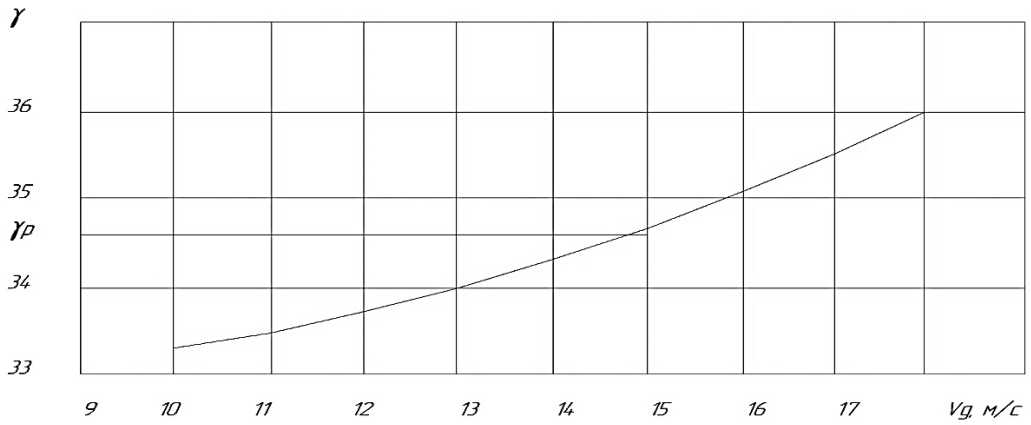


Рис. 3.4. Залежність кута γ руху повітряно-зернової суміші від швидкості повітряного потоку V_g.

3.3. Обґрунтування форми поверхні стінки та довжини розподільника

З метою обґрунтування раціональної геометрії (форми профілю та довжини) верхньої поверхні розподільника, було проведено дослідження траєкторій руху повітряно-зернової суміші. Моделювання відтворювало процес виходу потоку з пневмопроводу у розтруб, що різко розширюється, при варіюванні вхідних швидкостей.

Для вирішення цієї задачі була побудована тривимірна твердотільна модель. На її основі, шляхом розв'язання відповідних рівнянь було проведено чисельне моделювання руху повітряної суміші. Застосування даної геометрії дозволило визначити ключові кінематичні параметри, зокрема максимальну висоту підйому частинок, їхні індивідуальні траєкторії та дальність польоту на виході з пневмопроводу.

Наступний етап полягав у детальному моделюванні процесу руху повітряно-зернової суміші у поздовжньо-вертикальній площині при різних значеннях швидкості повітряного потоку. На рисунку 3.5 представлено візуалізацію отриманих траєкторій руху насіння пшениці.

Аналіз даних (рис. 3.5) демонструє, що повітряно-зернова суміш на виході з пневмопроводу рухається за параболічними кривими. Частинки спочатку піднімаються вгору, а потім, під домінуючим впливом гравітаційних сил, опускаються на нижню стінку (дно) розтруба. На основі цього зроблено висновок: для мінімізації аеродинамічного опору, який чинить верхня стінка потоку, а також для уникнення небажаних зіткнень насіння з нею, форма її поверхні (профіль) повинна описувати усереднену верхню траєкторію руху частинок. На рисунку 3.6 представлений графік, побудований за координатами крайньої верхньої

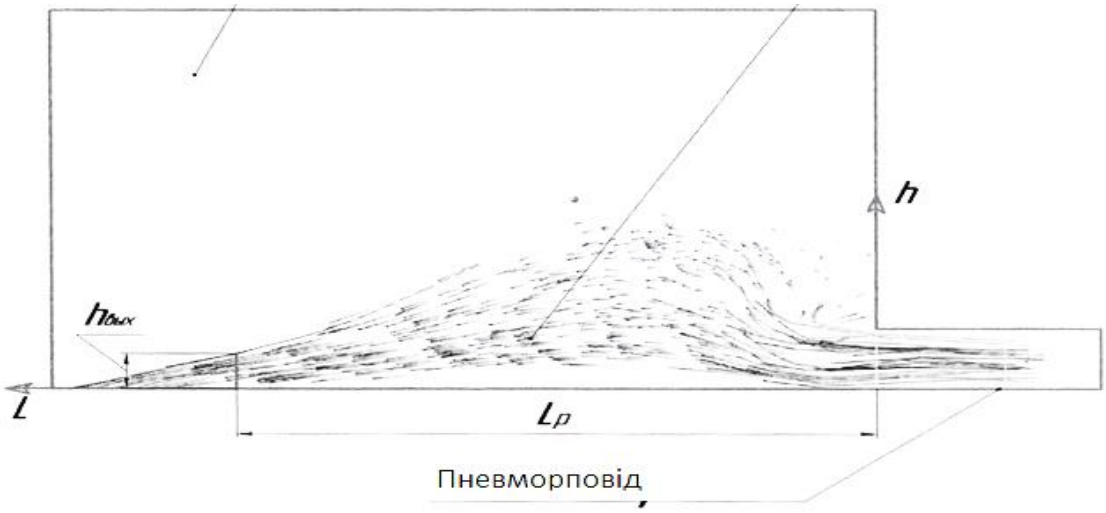


Рис. 3.5. Траєкторії руху повітряно-зернової суміші в поздовжньо-вертикальній площині.

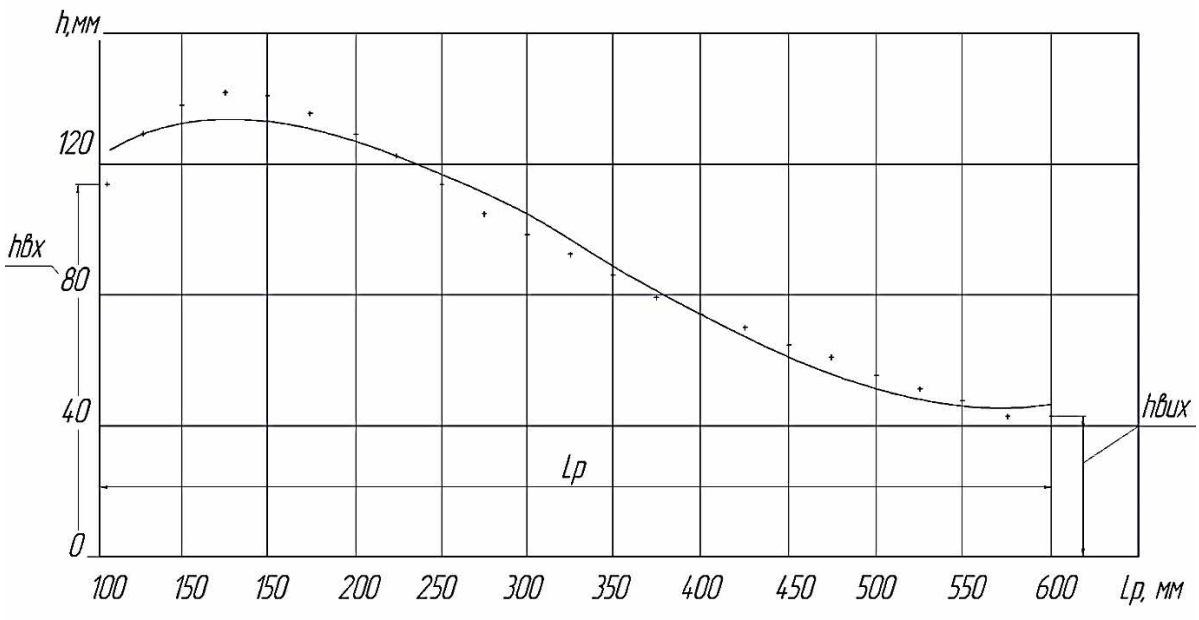


Рис. 3.6. Координати руху верхнього шару насіння

Отриманий графік з найменшою похибкою апроксимується рівнянням параболічного виду третього ступеня:

$$h=a\cdot L^3-в-L^2+cL+d.$$

(3.2)

де a, в, c, d - емпіричні коефіцієнти;

h, L - координати верхньої стінки розподільника, м

Візуалізація руху повітряно-зернової суміші в змодельованому розподільному пристрої з формою верхньої стінки у вигляді параболічної кривої показала, що при підвищенні швидкості повітряного потоку v_g в середині розподільника більше 15 м /с спостерігається виникнення турбулентності потоку (рис. 3.7). А на робочих швидкостях до 15 м / с зернова суміш рухається без завихрень, причому верхні шари описують форму стінки (рис. 3.7а). Дана обставина доводить правильність методики при виборі форми верхньої стінки розподільника. При швидкостях менше 12 м/с насіння падає вниз та вдаряється в нижню стінку. У обох випадках (t> g <12 м/с і t> g> 15 м/с) відбувається порушення технологічного процесу та підвищення руйнування насіння. У зв'язку з цим робочий діапазон швидкості v_g повітряного потоку на вході в розподільник повинен бути в межах 12 ... 15 м/с.

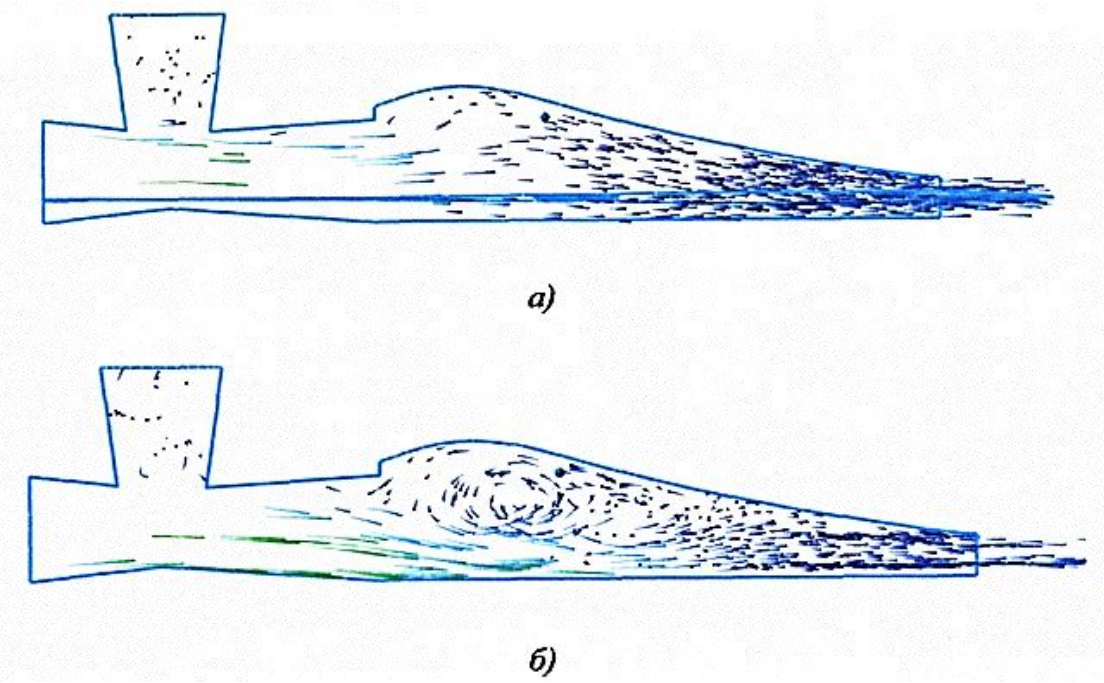


Рис. 3.7. Траєкторія руху повітряно-зернової суміші за різних швидкостей; *а*- при швидкості 15м/с; *б*- при швидкості 18м/с.

Це накладає жорсткі вимоги до проектування: довжина розподільника має бути оптимальною, щоб траєкторії руху насіння завершувалися безпосередньо у вихідних насіннєпроводах, уникаючи зіткнень як з верхньою стінкою, так і з дном. Якщо довжина розподільника буде надмірно великою, насіння падатиме на дно розтруба. Це може призвести, по-перше, до його механічного пошкодження (травмування), а по-друге – до порушення рівномірності розподілу внаслідок неконтрольованих відскоків. У випадку занадто короткого розподільника, навпаки, насіння буде вдарятися об верхню стінку, що також негативно вплине на процес. У зв'язку з цим довжину розподільника необхідно вибирати по максимальній робочій швидкості повітряного потоку ug = 15 м/с. При такій швидкості довжина польоту насіння становить 600 мм. Тоді і довжина розподільника, при якому буде забезпечуватися мінімальний опір стінок і взаємний вплив насіння на характер їх руху, повинна становити 600 мм.

Значення коефіцієнтів a, b, c, d рівняння що описує форму верхньої стінки, при швидкості повітряного потоку на вході в розподільник ug = 15 м/с повинні складати $2\cdot 10^{-6}$; 0,0026; 0,717; 75,826, відповідно.

Після визначення довжини розподільника та конфігурації його верхніх і бічних стінок (отриманих на основі моделювання руху повітряно-зернової суміші), наступним етапом є встановлення геометричних параметрів вихідної стінки розтруба розподільного пристрою.

3.4. Обґрунтування форми вихідної стінки розподільника

Для наукового обґрунтування геометрії вихідної частини розподільника, при вже фіксованих параметрах (форма бічних/верхніх стінок, довжина Lp), було створено низку моделей. Ці моделі відрізнялися геометричною конфігурацією стінки, в якій розташовані вихідні патрубки. В якості граничних (тестових) варіантів для оцінки рівномірності були обрані дві базові

геометричні форми: пласка стінка (площина) та поверхня другого порядку (описана по дузі кола).

Візуалізація результатів чисельного моделювання продемонструвала, що в обох сценаріях поле тиску повітряного потоку всередині розподільника характеризується значною нерівномірністю. Це, у свою чергу, призводить до дестабілізації та порушення технологічного процесу. Застосування напівкруглої конфігурації вихідної стінки дещо покращує загальну картину розподілу тисків, проте не вирішує проблему кардинально і не забезпечує належного рівня рівномірності.

Згідно з отриманими розрахунковими даними, коефіцієнт варіації тиску між вихідними насіннєпроводами для конфігурації з пласкою стінкою сягає 0,25, а для напівкруглої – становить 0,20. Встановлено, що такий рівень нерівномірності тиску повітряного потоку в насіннєпроводах унеможливлює досягнення необхідної (агротехнічної) якості розподілу насіння між сошниками.

В якості критеріїв оцінки якості розподілу насіння в розробленій моделі нами були обрані середньоквадратичні відхилення тиску $P_{СР}$ по виходах і коефіцієнт його варіації v_p. Чим рівномірним буде тиск на виходах розподільника, тим рівномірніше насіння буде розподілятися по насіннєпроводам.

Проектування криволінійних поверхонь, розрахованих на рівномірне навантаження, передбачає використання різноманітних геометричних конфігурацій. Найбільш ефективними при цьому є форми, що утворюються внаслідок природного провисання під дією власної ваги, або ті, що формуються оболонкою, заповненою рідиною. Для фізичного моделювання (отримання) таких поверхонь застосовують гнучкі елементи, як-от рейки, нерозтяжні полотна чи ланцюги.

Конфігурації, отримані методом природного провисання (наприклад, гнучких рейок або заповнених рідиною площ), переважно слугують для розробки складних тривимірних геометричних поверхонь, що знаходить

застосування, наприклад, у проектуванні корпусів плугів або куполів архітектурних споруд.

Для плоских криволінійних фігур, на наш погляд, найбільш фізично обґрунтованою є «ланцюгова лінія», оскільки вона природно формується лише в одній площині. Ланцюгова лінія (назва походить від ланцюга) – це крива, що описує статичну форму гнучкої, однорідної та нерозтяжної нитки (або ланцюга), кінці якої закріплені, і яка знаходиться під дією власної ваги в однорідному полі тяжіння. З математичної точки зору, вона належить до класу плоских трансцендентних кривих. Варто зазначити, що поверхня обертання, утворена цією лінією (катеноїд), є поверхнею мінімальної площі.

У прямокутній декартовій системі координат рівняння ланцюгової лінії має наступний вигляд:

$$y = \frac{a}{2}\left(e^{\frac{x}{a}} + e^{\frac{-x}{a}}\right) = a \cdot ch\frac{x}{a}. \qquad (3.3)$$

де $ch\frac{x}{a}$ - гіперболічний косинус свого аргументу;

а - значення ординати вершини ланцюгової лінії.

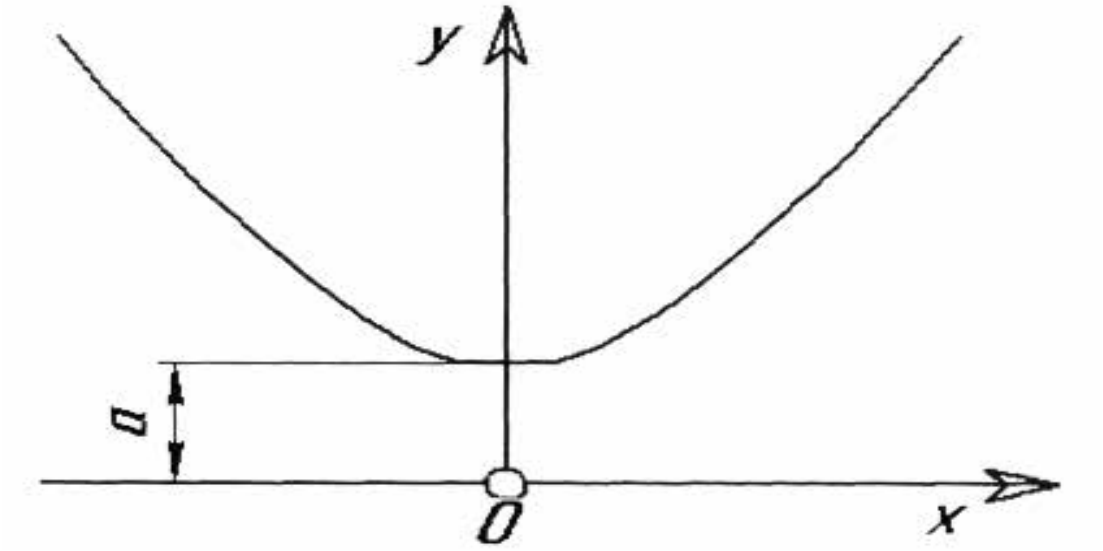


Рис. 3.8. Графік ланцюгової лінії

Радіус кривизни:

$$R = ach^2\frac{x}{a} = \frac{y^2}{a} \qquad (3.4)$$

Площа S, обмеження ланцюгової реакції, двома її ординатами та віссю абсцис:

$$S = a^2\left(sh\frac{x_2}{a} - sh\frac{x_1}{a}\right) = a(\sqrt{y_2^2 - a^2} - \sqrt{y_1^2 - a^2}),$$

(3.5)

За рівнянням ланцюгової лінії (3.2), отримана криволінійна стінка уточненої моделі розподільного пристрою.

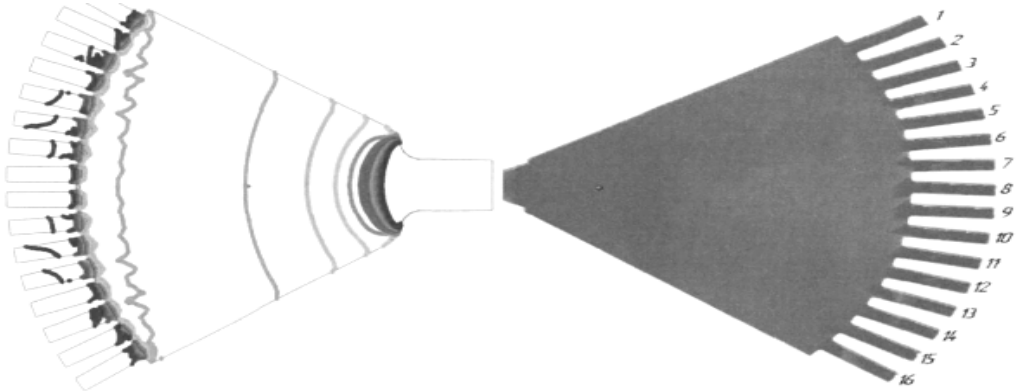


Рис. 3.9. Уточнена модель розподільного пристрою: а) заливка з тиску; б) ізолінії тиску

Результати чисельного моделювання (рис. 3.9) демонструють, що уточнена модель забезпечує більш рівномірну дистрибуцію (розподіл) тиску по вихідних каналах, порівняно з попередньо проаналізованими конфігураціями.

Незважаючи на це покращення, проведені розрахунки засвідчили, що хоча нерівномірність розподілу тиску знижується до 14%, цей показник все ще не відповідає встановленим агротехнічним вимогам (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5. Порівняльні характеристики розподільників

Розподільники	Середнє значення тиску, Па	Середньоквадратичне відхилення тиску, Па	Коефіцієнт варіації,%
Розподільник з напівкруглою формою	298,698	58,24	0,20
Розподільник уточнений	129,99	24,029	0,14

У ході моделювання роботи розподільника було виявлено, що зернова суміш чинить значний зворотний вплив на повітряний потік. Це візуально підтверджується наявністю векторів швидкості, спрямованих у протилежний до основного руху бік. Дане явище провокує інтенсивну турбулентність потоку, що призводить до дестабілізації технологічного процесу та, як наслідок, до нерівномірного розподілу насіннєвого матеріалу по відвідних насіннєпроводах. Для вирішення цієї проблеми низка авторів пропонує конструктивне рішення встановлення додаткових вставок або розсікачів потоку. Їхнє призначення полягає у сприянні вирівнюванню полів тиску та швидкості повітряно-зернової суміші всередині розподільника.

3.5. Перевірка адекватності моделі

Верифікація адекватності розробленої моделі передбачала проведення порівняльного аналізу. Досліджувався параметр швидкості руху повітряно-зернової суміші як функція від швидкості повітряного потоку, що генерується вентилятором. Порівняння здійснювалося між розрахунковими даними та показниками отриманими в каналі вітрильного класифікатора Petkus K293, відповідно до методики, наведеної у другому розділі.

У таблиці 3.6 наведені швидкості повітряно-зернової суміші $v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$, визначені мікроманометром в зоні II парусного класифікатора Petkus K293 і швидкості $v_{\text{вих}}^{\text{теор}}$, визначені в результаті моделювання в програмному комплексі в залежності від швидкості повітряного потоку на вході $v_{\text{ВХ}}$ в канал. Подача зерна q_p вібролотком в пневмоканал, становила в середньому 0.09 кг/с. Це ж значення q_p було встановлено при моделюванні, а діаметр насіння з таблиці 3.5.

Таблиця 3.6 Швидкості повітряно-зернової суміші в пневмоканалі

Вимірюваний параметр	Значення				
$v_{\text{вх}}$, м/с	8,3	8,9	9,9	10,9	11,9
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,23	8,87	9,9	10,86	11,86
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,4	8,7	9,9	11	12,2
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,4	8,9	10,2	11,2	12,2

$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,1	8,9	9,9	11	12
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,1	8,9	9,9	11	11,6
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,4	9,2	9,9	10,4	11,6
$v_{\text{вих}}^{\text{експ}}$,м/с	8,28	8,97	9,97	10,9	11,58
σ_v	0,16	0,15	0,15	0,35	0,3

Грунтуючись на отримані результати (таблиці 3.6), побудовано графік залежності швидкості руху повітряно-зернової суміші $v_{\text{вих}}$ від швидкості повітряного потоку $v_{\text{вх}}$ в пневмоканалі (рис. 3.10).

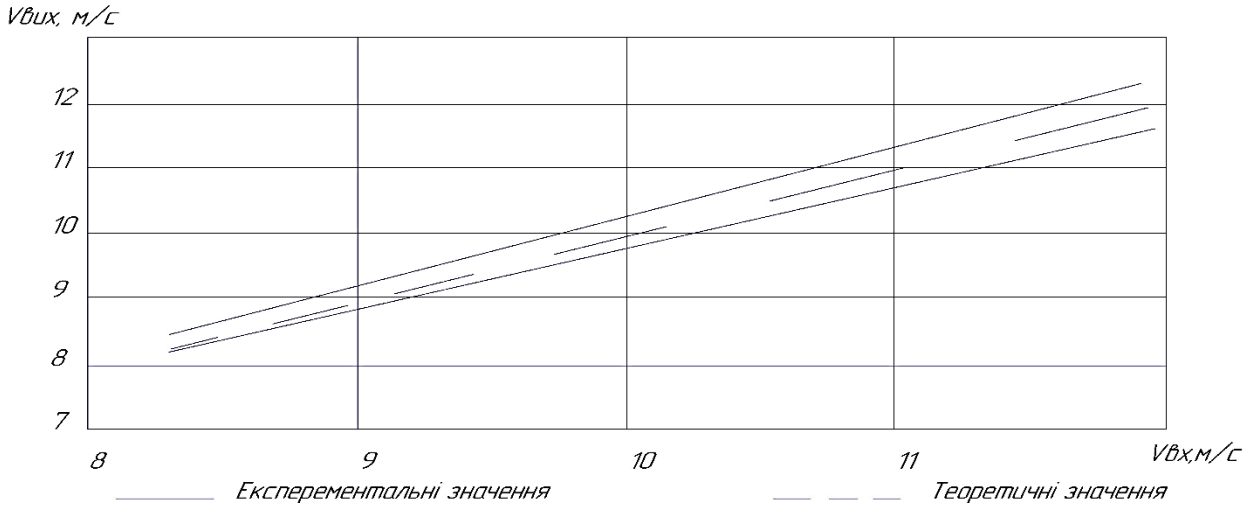


Рис. 3.10. Залежності швидкості руху повітряно-зернової суміші від швидкості повітряного потоку в пневмоканалі.

Графічні дані (рис. 3.10) демонструють, що внаслідок аеродинамічної взаємодії з насіннєвим матеріалом швидкість повітряного потоку дещо знижується. Встановлено, що за умови стабільної (константної) подачі зерна, швидкість потоку на виході з каналу (рис. 3.10) знаходиться у лінійній залежності від початкового напору, що генерується вентилятором (вхідної швидкості).

Результати, отримані шляхом чисельного моделювання, демонструють високу кореляцію та не суперечать отриманим даним. Статистична перевірка за F-критерієм Фішера підтверджує адекватність моделі з рівнем значущості 0,954.

Підтверджена адекватність моделі, яка описує процес руху зернового матеріалу, дозволяє використовувати її як валідний інструмент для наукового обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів розподільних систем посівних комплексів.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОСІВНОГО КОМПЛЕКСУ З ДОСЛІДЖУВАНОЮ ПНЕВМАТИЧНОЮ СИСИТЕМОЮ

4.1 Визначення економічної ефективності вдосконаленого комплексу АППА-6-02.

Для визначення економічної ефективності вдосконаленого агрегату АППА-6-02, за базовий (вихідний) варіант було прийнято серійну модель АППА-6. В основу розрахунку ефективності покладено ключову технологічну перевагу модернізованого зразка. Завдяки конструктивним змінам пневматичної системи, АППА-6-02 забезпечує більш рівномірний розподіл насіннєвого матеріалу по площі живлення, що, відповідно, формує вищий урожай сільськогосподарських культур. Методологія розрахунку базується на положеннях ДСТУ 4397:2005 Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування.

При визначенні економічної ефективності дослідного комплексу необхідно враховувати, що процес модернізації призводить до збільшення початкових капітальних витрат на переобладнання серійної машини. Проте, ці витрати нівелюються за рахунок отримання додаткового прибутку, який генерується реалізацією приросту врожаю (різниці у валовому зборі), отриманого завдяки вищій якості посіву.

Розрахунок річної економічної ефективності від впровадження модернізованої пневматичної сівалки, що враховує отримання надбавки до врожайності, визначаємо за такою формулою:

$$P_a = \left(З_п - З_э + P_д\right) \cdot V_г, \quad (4.1)$$

де $З_п$ і $З_э$ - прямі експлуатаційні витрати, що припадають на роботи відповідно при використанні серійної сівалки і експериментальної сівалки, грн/га; Рд- економічний ефект від отримання додаткової продукції, грн/га; $V_г$ - зональна річна напрацювання агрегату, га.

$$З_п = О_т + А_с + Р_с + Г_{пм}, \quad (4.2)$$

де $О_т$ - заробітна плата обслуговуючого персоналу, грн/га; Ас - амортизаційні відрахування при посіві серійного і експериментального агрегатів, грн/га; Рс - витрати на технічне обслуговування, ремонт і зберігання серійного і експериментального агрегатів, грн/га; Гпм - витрати на паливо-мастильні матеріали при посіві серійного і експериментального агрегатів, грн/га.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу визначається як:

$$З_с = \frac{n \cdot a \cdot t}{W}, \quad (4.3)$$

де n - кількість обслуговуючого персоналу - операторів і сіяльщіків, чол;

а - коефіцієнт, що враховує нарахування на заробітну плату;

t - годинна тарифна ставка обслуговуючого персоналу, грн/га.

$$W = 0.1 B_p \cdot V_p \cdot \tau, \quad (4.4)$$

де *Bp* - ширина захвату агрегату, м;

Vp - робоча швидкість агрегату, км /год;

τ-коефіцієнт використання часу зміни.

$$А_с = \frac{Б \cdot а}{100 \cdot W \cdot T}, \quad (4.5)$$

де Б - балансова вартість машини, грн;

а - норма відрахувань, %;

Т - річне напрацювання, год.

Балансова вартість експериментальної сівалки визначається з рівняння:

$$Б_е = Б_{АППА} + С_к, \quad (4.6)$$

де Баппа - балансова вартість комплексу АППА-6-02, грн;

$С_к$ – вартість конструкторських змін, грн.

Витрати на технічне обслуговування, ремонт і зберігання Рзб:

$$Р_{зб} = \frac{Б \cdot а_р}{100 \cdot W \cdot T}, \quad (4.7)$$

де $а_р$ норма відрахувань на технічне обслуговування, ремонт і зберігання, %

Витрати на паливо-мастильні матеріали:

$$Г_{пм} = \frac{С_{тем}}{W}, \quad (4.8)$$

де Стем- вартість паливо-мастильних матеріалів, грн.

$$Стем=Vп \cdot Цп+Vмо \cdot Цп+Vмо \cdot Цто, \quad (4.9)$$

де $V_п$, $V_{мо}$, $V_{то}$ - годинна витрата відповідно, палива, моторної оливи та трансмісійної оливи, кг/год; Цп, $Ц_{мо}$, $Ц_{то}$ - ціна 1 кг відповідно палива, моторної оливи та трансмісійної оливи. Економічний ефект від отримання додаткової продукції:

$$РД=ΔВ \cdot Ц, \quad (4.10)$$

де ΔВ - прибавка врожаю, т; Ц - ціна тони продукції, грн.

Складові параметри експлуатаційних витрат наведені в таблиці 4.1.

Питоме інвестування визначене за формулою:

$$У_{ін}=\frac{Б}{W-T}, \quad (4.11)$$

Термін окупності капіталовкладень:

$$Т_{ін} = \frac{У_м}{Р_z}, \quad (4.12)$$

Таблиця 4.1. Складові прямих експлуатаційних витрат експериментальної і серійної сівалок на 1 га посівної площі.

Складові витрат, грн/Га	Експериментальний агрегат	Серійний агрегат
Заробітна плата	42,284	42,284
Амортизаційні відрахування	9,284	9,948
Витрати на ТО, ремонт і зберігання	6,496	6,964
Витрати на паливо-мастильні матеріали	28,06	28,06
сума експлуатаційних витрат	86,124	87,256

Результати проведених розрахунків економічної ефективності застосування експериментального агрегату представлені в таблиці 4.2.

Застосування вдосконаленої пневматичної системи ґрунтообробного агрегату з централізованим дозуванням насіння дозволило за рахунок підвищення рівномірності розподілу насіння по рядках підвищити врожайність на 7%.

Таблиця 4.2 Економічні показники ефективності використання

Показники	серійний агрегат	Експериментальний агрегат
Балансова вартість, тис.грн	1811	1861
Робоча швидкість агрегату, км/год	До 15	До 15
Годинна норма вироблення, га/год	3,3	3,3
Витрата палива, кг/га	4,7	4,7
Питомі капіталовкладення, грн/га	928,8	994,8
Економія від отримання додаткової продукції, грн/га	-	696,8
Річний економічний ефект при нормативному річному завантаженні год., тис.грн	-	74,8
Термін окупності капіталовкладень, років		0,7

експериментального і серійного агрегату

Економічний ефект при повному річному завантаженні порівняно з серійним агрегатом АППА-6 становить 74,88 тис.грн. Додаткові капітальні вкладення на переобладнання сівалки складають 50000 грн., термін окупності один сезон.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено принципову можливість математичного опису руху повітряно-зернової суміші в розподільчій системі пневматичних сівалок з використанням рівнянь динаміки двофазних середовищ «повітря-тверді частинки». Визначено, що об'ємна концентрація насіння в системі під час роботи змінюється в межах 10^3... 10^6. При такому рівні концентрації твердої фази, згідно з прийнятими класифікаціями, відбувається не лише переміщення частинок під дією потоку, але й виникає суттєвий зворотний вплив насіння на несучу фазу. Цей фактор є обов'язковим для врахування при моделюванні роботи розподільних систем посівних комплексів.

2. Розроблено математичну модель технологічного процесу роботи розподільної системи. Модель враховує взаємний вплив повітряного потоку та насіння, а також їхні фізико-механічні властивості. Останнє реалізовано через уточнення залежності коефіцієнта опору CD від числа Рейнольдса Re та визначення еквівалентного діаметра насіння на основі його лінійних габаритів (довжина, ширина, товщина). Обґрунтовано розрахункову область моделі та встановлено граничні умови її функціонування: вхід повітря визначається тиском вентилятора; вхід насіння – опором шару в котушці та нормою висіву; внутрішні поверхні – умовою непроникності; вихід із сошників – умовою вільного виходу. Розроблена модель продемонструвала високу адекватність з рівнем значущості 0,954 за критерієм Фішера.

3. Встановлено, що залежність коефіцієнта опору насіння від числа Рейнольдса апроксимується експоненційною функцією виду $C_D = A \cdot e^{-bRe}$, де коефіцієнт A становить 4,27 (пшениця), 4,42 (ячмінь) та 4,10 (жито), а - b = 0,001 для всіх зазначених культур.

4. Ідентифіковано оптимальну конфігурацію розподільного пристрою, що забезпечує найвищу якість дистрибуції насіння. Вона являє собою розтруб, що розширюється від входу до виходів під кутом 34,6°, загальною довжиною Lp = 600 мм. Конструкція має криволінійну форму вихідної стінки (описану плоскою трансцендентною кривою), параболічну геометрію верхньої межі та оснащена

внутрішніми вертикальними плоскими розсікачами. Рекомендована швидкість повітряного потоку на вході в розподільник становить 12–15 м/с, що є майже вдвічі нижчим за показники серійних сівалок.

5. Підтверджено, що застосування модернізованого посівного комплексу дозволить знизити показник нерівномірності розподілу насіння по сошниках до 5% (порівняно з 12% у серійної моделі). Це технологічне покращення забезпечить приріст врожайності озимої пшениці на 6–7% та обумовить отримання річного економічного ефекту в розмірі 74 тис. грн.

СПИСКИ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безверхній П.Є. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної сівалки точного висіву : дис. д-ра техн. наук / П.Є. Безверхній. — Дніпропетровськ : ДСГА, 2024.

2. Алієв Е.Б., Безверхній П.Є. Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Журнал «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». 2022. №52. С.86–98.

3. Ярошенко П.М., Арендаренко В.М. Узагальнена математична модель руху комбінованого посівного машинно-тракторного агрегату : матеріали / П.М. Ярошенко, В.М. Арендаренко. — Репозиторій СНАУ, 2020. (електронний ресурс).

4. Арендаренко В.М., Антонець А.В. Особливості руху зернового матеріалу у похилому відкритому каналі зі змінним кутом нахилу : зб. тез. — 2020.

5. Васильєв В.І. Дослідження та обґрунтування параметрів системи: Висівний апарат — насіннєпровод — сошник селекційної сівалки : канд. техн. наук (тези). 2024.

6. Методика випробувань сівалок та висівних апаратів / НААН, інститути агротехніки. — Київ : НААН, 2021–2024.

7. Qin W., Li Y., Qian C., Fan Z., Yan D., Zou G., Liu S., Wang Z., Zang Y., Zhang M. The development of an air suction precision seed-metering device for rice plot breeding. Agronomy. 2025. Vol.15. Article 1642. DOI:10.3390/agronomy15071642.

8. Wang B., Li X., Zhang Y., et al. Design and experiment on a distributed seed delivery system for pneumatic seed-metering devices. Agronomy. 2023. Vol.13. Art.1337. DOI:10.3390/agronomy13051337.

9. Wang B., Zhang Y., et al. Design and evaluation of vacuum central drum seed-metering device. Applied Sciences. 2022. Vol.12(4). Art.2159. DOI:10.3390/app12042159.

10. Zhong W., et al. Design and experiment of precision seed-metering device to improve adsorption and filling during quinoa sowing. Agriculture. 2024. Vol.14(3). Art.434. DOI:10.3390/agriculture14030434.

11. Xia Q., Zhang W., Qi B., Wang Y. Design and experimental study on a new horizontal rotary precision seed-metering device for hybrid rice. Agriculture. 2023. Vol.13(1). Art.158. DOI:10.3390/agriculture13010158.

12. Chen J., Guan T., Yuan Z., Xu F., Zhao K., Tang H., Wang J. Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern. Frontiers in Plant Science. 2024.

13. Li J., et al. Design and experiment of air-suction roller-type seed-metering device. Agriculture. 2025. Vol.15(15). Art.1652. DOI:10.3390/agriculture15151652.

14. Pan Y., et al. Research on performance predictive model and parameter optimization of pneumatic drum seed metering device. Applied Sciences. 2025. Vol.15(7). Art.3682. DOI:10.3390/app15073682.

15. Dong J., et al. Investigation on seed-filling effect of quantitative precision metering devices under high speeds. Agronomy. 2025. Vol.15(14). Art.1517. DOI:10.3390/agronomy15141517.

16. Xiong D., et al. Design and experimental study of the general mechanical-pneumatic combined seed metering device. Applied Sciences. 2021. Vol.11(16). Art.7223. DOI:10.3390/app11167223.

17. Raveendran G., et al. A comprehensive systematic review of precision planting technologies. Agriculture & Engineering Reports. 2025. Vol.7(9). Art.309.

18. Guo P., et al. Design of a seed-pressing mechanism for high-speed suction-type precision peanut planter. Agronomy. 2025. Vol.15(21). Art.2246. DOI:10.3390/agronomy15212246.

19. «Performance Optimization and Simulation Test of No-Tillage Corn Precision Planter Based on DEM». Machines. 2024. Vol.12(7). Art.465. DOI:10.3390/machines12070465.

20. Chen X., Zhang S., Dong J., Liu F., Jia X., Huang Y. Development of high-speed and precision metering device with gradient-feeding for soybean. Journal of Agricultural Engineering. 2024. (electronic).

21. Feng D. H., Sun X. P., Li H., Qi X. D., Wang Y. J., Mbugua N. S. Optimized design of pneumatic precision seed-metering device for carrots. Int. J. Agricultural & Biological Engineering. 2023. Vol.16(4). P. 45–58.

22. «Design and Experimental Study of the General Mechanical …» (додаткове дослідження механіко-пневматичних комбінованих апаратів). Applied Sciences. 2021. DOI:10.3390/app11167223.

23. Lethe-DEM: open-source parallel discrete element solver — Bernhard et al. arXiv. 2021. (інструмент для DEM-моделювання компонентів висівних апаратів).

24. SR-DEM: efficient discrete element method for particles with surface of revolution — (методологія DEM). arXiv. 2022.

25. «Design and evaluation of vacuum central drum seed-metering device» — Applied Sciences. 2022. (детальне дослідження вакуумних drum-метерів). DOI:10.3390/app12042159.

26. «Design and experimental study on a horizontal rotary precision seed-metering device» — Agriculture. 2023. (рекомендації по геометрії барабанів/роликів).

27. «Design and evaluation of an air suction precision roller seed-metering device» — TC SAE Journal. 2021.

28. Zhang X., et al. Electronic control seed-metering system for precision seeding maize based on fuzzy-PID. Int. J. Agricultural & Biological Engineering. 2024. Vol.17(2). P. 77–86.

29. «Engineering DEM-based design and optimization of the key components of a spoon-wheel seed-metering device». Agronomy. 2024. Vol.14(9). Art.2096. DOI:10.3390/agronomy14092096.

30. «Design and Experiment of Air-Suction Roller-Type Seed-Metering Device». Agriculture. 2025. (повний експериментальний опис).

31. «Investigation of pin-roller metering device and tube delivery for seed singulation». Computers and Electronics in Agriculture. 2023–2024.

32. Guo Y., et al. Parameter optimization of key components in seed-metering device using multi-objective algorithms. Computers and Electronics in Agriculture. 2024.

33. Wang B., et al. Design and experiment for high speed inclined corn metering device (DEM based). Journal (TC SAE / Chinese Agric. Eng.). 2022.

34. «Design and Evaluation of Vacuum Central Drum Seed-Metering Device» — Applied Sciences. 2022.

35. «Suction-type precision seed-metering devices: adsorption, filling and discharge studies» — Agronomy/Applied journals. 2023–2025.

36. «DEM-based structural optimization method for rice precision direct seeding» — Journal of Agricultural Engineering Research. 2023.

37. «Development of high-speed precision seed-metering device with assisted seed-filling» — Agriculture/MDPI. 2025.

38. «Design and testing of a distributed seed delivery and sensor monitoring system for precision planters» — Sensors / Computers & Electronics in Agriculture. 2023–2024.

39. «Performance monitoring systems for seed-metering devices based on pulse-width recognition / optical sensors / camera systems» — PLoS ONE / Sensors. 2021–2024.

40. «High-speed corn singulation and seed-press mechanisms: experimental studies» — Frontiers / Agronomy. 2024–2025.

41. «Flexible orifice seed-metering plates for variable seed shapes» — Discover Applied Sciences / Springer. 2024.

42. «Systematic review of innovative seed-metering mechanisms (belt, spoon, drum, vacuum)» — International journals. 2024.

43. «Lethe-DEM and related DEM tools for seed-flow modelling» — arXiv / software papers. 2021–2022.

44. «Optimization of seed-flow channels and seed-tube geometry to reduce damage and misplacement» — Computers in Agriculture journals. 2022–2024.

45. «Design and experiment of pneumatic roller type precision seed-metering» — TC SAE Journal (China). 2021–2022.

46. «Seed-metering device cleaning and anti-double mechanisms: review and experiments» — Applied journals. 2020–2024.

47. «Distributed vacuum systems for multi-row planters: energy and flow analysis» — Agricultural Engineering Research. 2023.

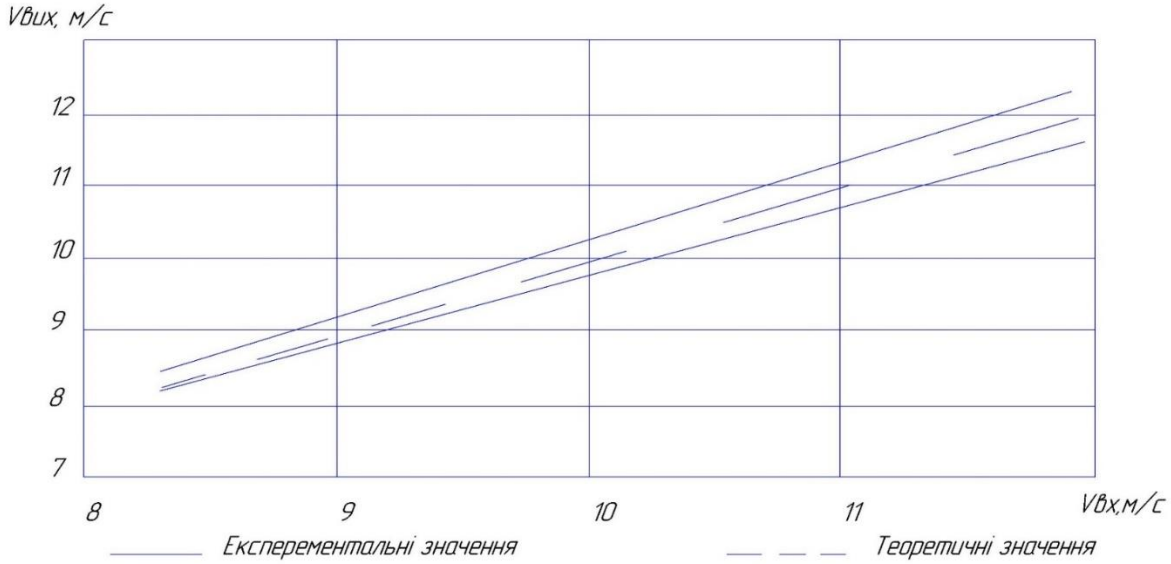
48. «Sensor fusion (optical+acoustic+IMU) for seed singulation detection in real time» — Sensors. 2022–2024.

49. «Market and technology trends for precision planters (electric drives, individual row control) — industry reports & review articles» — 2021–2025.

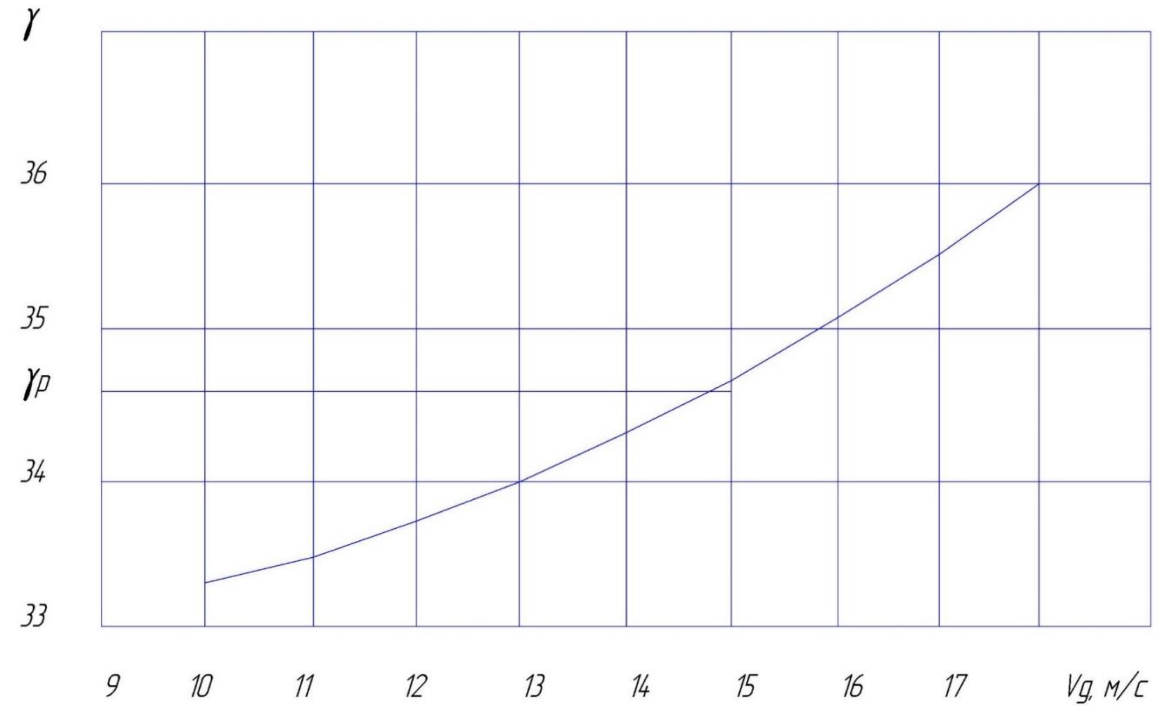
50. Літвінов С. П. Оцінка надійності технічних систем: підручник / С. П. Літвінов. Одеса: ОНПУ, 2017. 304 с.

51. Технічний сервіс в АПК: навчально-методичний посібник для самостійної роботи студентів. Ю. Г. Сорваніді, Д. П. Журавель, А. М. Бондар, О. Ю. Новік. Мелітополь: Видавничополіграфічний центр «Люкс», 2021. 157 с.

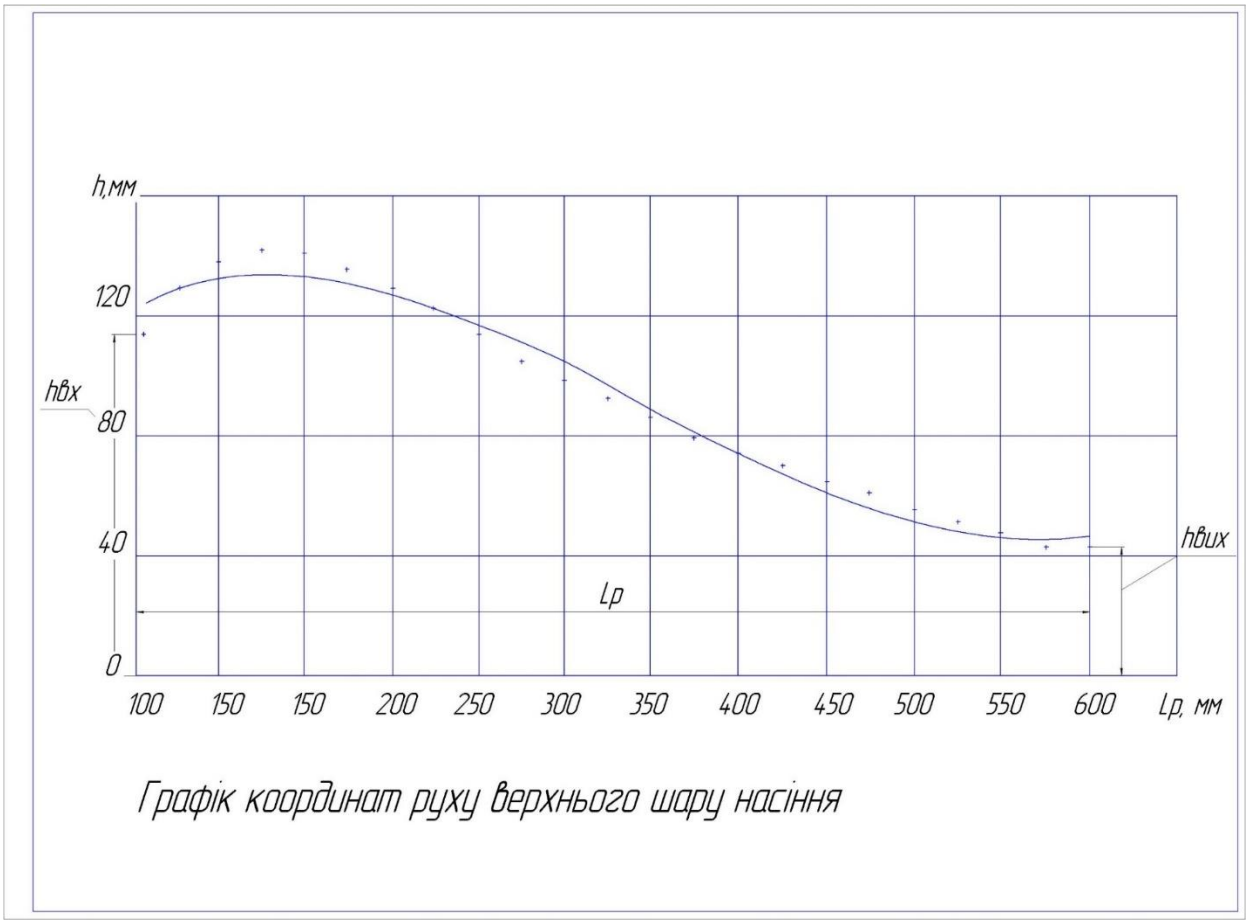
ДОДАТКИ



Графік залежності швидкості руху повітряно-зернової суміші від швидкості повітряного потоку в пневмоканалі



Графік залежності кута γ швидкості руху повітряно-зернової суміші від швидкості повітряної течії Vg



Графік координат руху верхнього шару насіння