

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2025 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

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

«Механізація післязбирального обробітку пшениці з обґрунтуванням
параметрів пневмогравітаційного сепаратора»

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

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____ Сидоренко Григорій Анатолійович

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Олег БЕВЗ

« ____ » _____ 2025 р.

м. Кропивницький

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена підвищенню ефективності післязбирального обробітку шляхом удосконалення пневмогравітаційного сепаратора з вертикальним каналом. Досліджено вплив аеродинамічних властивостей на розділення зерноsumішей. Встановлено, що ключовим елементом є жалюзійний повітрязабірник. Визначено, що оптимальний кут положення жалюзі має бути близьким до горизонтальної осі (до 5°). Збільшення висоти каналу доцільне до моменту досягнення швидкостями частинок 95%...99% критичних значень.

ефективність, пневмогравітаційний сепаратор, жалюзійний повітрязабірник

ABSTRACT

The work is devoted to increasing the efficiency of post-harvest processing by improving the pneumogravity separator with a vertical channel. The influence of aerodynamic properties on the separation of grain mixtures was studied. It was established that the key element is the louvered air intake. It was determined that the optimal angle of the louver should be close to the horizontal axis (up to 5°). Increasing the channel height is advisable until the particle velocities reach 95%...99% of the critical values.

efficiency, pneumogravity separator, louvered air intake

ЗМІСТ

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

1. ВСТУП

Для нарощування обсягів якісного зерна пшениці, враховуючи умови необхідності його довгострокового збереження, критичне значення, особливо у воєнний час, має своєчасна післязбиральна обробка, якою не слід нехтувати після збору врожаю. Цей обов'язковий процес суттєво мінімізує ризики псування зерна під час його тривалого зберігання.

Очищення та кондиціонування зернової маси здійснюється за допомогою спеціалізованих очисних агрегатів одразу після її надходження з полів. Лише очищена і належним чином підготовлена продукція відправляється на довготривале зберігання, де підтримка оптимальних мікрокліматичних умов є гарантією збереження її початкової якості.

Зерносховища функціонують на базі різних суб'єктів господарювання: від аграрних колективних та фермерських господарств до міжгосподарських організацій із переробки. На всіх цих об'єктах ключовим є максимальне зменшення втрат на кожному етапі – при транспортуванні, зберіганні та обробці.

Слід підкреслити, що після збирання засміченість зерна може варіюватися в межах 6%...15%, а вологість – 16%...20%, що не допустимо з позиції збереження і використання. При підвищеній вологості якість зернових культур почне погіршуватися майже миттєво через процеси самозігрівання та активний розвиток мікроорганізмів, якщо не буде оперативно проведено видалення домішок та сушіння [2-4, 12].

Матеріально-технічна база для післязбирального обробітку (очищення і сушіння) зерна постійно оновлюється, що пов'язано зі зростанням вимог до продуктивності і якості зернових, оскільки це підвищує конкурентоспроможність останніх на світовому продовольчому ринку [4-11].

З огляду на це, подальше поглиблене дослідження процесів сепарації зернових культур є одними з пріоритетних науково-технічних завдань, успішна реалізація яких матиме безпосередній вплив на підвищення ключових показників ефективності та якості функціонування сучасного зерноочисного обладнання.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна характеристика процесу післязбирального обробітку зерноsumіші пшениці.

Зерноsumіш пшениці, як сировина, що надходить із поля, характеризується як багатокомпонентна система, придатність якої до очищення від домішок визначається значною мірою фізико-механічними та аеродинамічними відмінностями між основними зернами та засмічувачами (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристика придатності зерноsumіші пшениці до очищення [4, 11, 12]

Характеристика	Культура (Пшениця)	Домішки	Придатність до очищення
Щільність/Густина	Висока	Дуже низька (полова, пил) або висока (камінці, ґрунт)	Висока (добре розділяється в аеросепараторах та трієрах)
Розмір	Відносно однорідний	Дуже малий (дрібне сміття) або великий (шматочки соломи)	Висока (добре розділяється на решетах)
Аеродинаміка	Середня опірність повітряному потоку	Низька (легкі, леткі)	Висока (ефективне видалення легких домішок повітряним потоком)
Форма	Овальна	Різноманітна (округла, довгаста, неправильна)	Середня/Висока (потребує використання трієрів для відділення коротких або довгастих домішок)
Колір, форма	Світло-жовта, жовта; Форма (овальна)	Різноманітна (коричнева, сіра, тощо) Різноманітна (кубічна, зіркоподібна, кругла тощо)	Висока (ефективна ідентифікація і видалення домішок повітряним потоком)

Зерноsumіш пшениці з позиції очищення поділяється на дві основні фракції [12]:

1. Основне зерно, до якого відносяться повноцінні без уражень зерна пшениці;
2. Домішки, які засмічують основне зерно і які можна класифікувати як:
 - легкі домішки (полова, пил, лушпиння, легке щупле зерно) – мають найбільшу різницю з основним зерном в аеродинамічних властивостях і найлегше видаляються повітряним потоком;
 - крупні та дрібні домішки (шматочки соломи, велике насіння бур'янів, камінці (видаляються каменевідбірниками), дрібне насіння бур'янів, пісок тощо) – добре відокремлюються за різницею лінійних розмірів;
 - важко відокремлювані домішки – насіння, яке має близьку до пшениці товщину, але відрізняється довжиною (наприклад, кукіль, вика), для їх видалення застосовують спецобладнання – трієри (циліндричні або дискові).

Придатність зерноsumіші пшениці до очищення від домішок визначається ступенем розбіжності зокрема між фізичними властивостями основного зерна та засмічувачів, та станом зерноsumіші:

- найбільш ефективним первинним етапом є сепарація за аеродинамічними властивостями [2-4, 12,] – завдяки значній різниці в парусності (швидкості витання) між зерном пшениці та легкими домішками, переважна частина засмічувачів видаляється повітряним потоком;
- використання решіт з різними розмірами та конфігураціями отворів дозволяє розділити зерноsumіш за товщиною та шириною (плоскі решета) або за довжиною (трієри);
- вологість і засміченість – висока початкова вологість та засміченість (особливо волога соломиста маса) знижує придатність до очищення, оскільки може спричиняти злипання частинок, забивання решіт і погіршення ефективності дії повітряного потоку.

В цілому, зерноsumіш пшениці добре піддається багатоступеневому очищенню, оскільки має значні фізичні відмінності від більшості типових домішок. Проте, для досягнення високих стандартів продовольчої якості необхідне використання комплексу машин для видалення всіх груп засмічувачів, включаючи важко відокремлювані.

Технологічний процес очищення пшениці – це багатоступенева операція, яка необхідна для перетворення зернової маси з поля на кондиційний продовольчий або посівний матеріал. Цей процес логічно структурований на декілька послідовних етапів [12].

Попереднє очищення – основною метою цього початкового етапу є захист зерноsumіші від самозігрівання та полегшення роботи обладнання, яке використовується для подальших операцій. Тут відбувається швидке видалення великих, грубих та небезпечних домішок, таких як каміння, довгі шматки соломи, велике стебло, обривки мотузок, які можуть спричинити механічне пошкодження або забивання машин. В якості обладнання застосовуються скальператори (для великих домішок) та повітряні сепаратори або зерноочисні машини загального призначення [5-10, 12].

Первинне очищення – є ключовим етапом, на якому відбувається доведення якості зерна до товарної кондиції, тобто зниження загального вмісту сміттєвих домішок до базових показників, дозволених стандартами для зберігання. Тут видаляються легкі домішки (полова, пил) і значна частина дрібного та крупного сміття. Використовуються високоефективні решітно-повітряні сепаратори, які можуть бути барабанными або плоско-решітними і є комплексними агрегатами, що поєднують механічне просіювання (за розміром) та пневмосепарацію (за аеродинамічними властивостями) [4-10, 12].

Вторинне (фінальне) очищення та калібрування – є специфічним етапом, призначеним для доведення зерна до найвищих вимог, що висуваються до посівного матеріалу, а також до харчових або продовольчих цілей (глибока фінішна доробка). Тут видаляються важковідокремлювані домішки, які мають

схожі з пшеницею розмір та густину, а також проводиться калібрування за формою та якістю.

Для високоточного розділення застосовуються спеціалізовані машини:

- вібропневмостоли – для сепарації за густиною та питомою вагою;
- фотосепаратори – для видалення зерен, які відрізняються кольором (наприклад, уражені грибком або потемнілі);
- високоточні аеродинамічні сепаратори – для фінального розділення за питомою вагою для отримання максимально однорідної фракції.

Як бачимо, аеродинамічна сепарація присутня на всіх етапах очищення, що виділяє її серед інших і, з огляду на зазначену характеристику, зерноsumіш пшениці має ідеальні умови для повітряної сепарації, оскільки розбіжність у швидкості витання між основним зерном і легкими та важкими домішками є достатньою для ефективного розділення на промисловому обладнанні. Це дозволяє вже на перших етапах післязбиральної обробки видалити більшу частину сміття і значно підвищити якість зернової маси перед сушінням чи тривалим зберіганням. Розглянемо переваги (табл. 2.2) і недоліки (табл. 2.3) даного типу обладнання.

Таблиця 2.2 – Технологічні та економічні переваги використання аеродинамічних сепараторів [4-10, 12]

Категорія	Перевага	Опис
Якість та ефективність	Висока точність калібрування	Розділення матеріалу за питомою вагою/щільністю дозволяє відокремити навіть ті домішки, які мають однаковий розмір із зерном (наприклад, щупле зерно). Це забезпечує заготівлю насіння з високою схожістю.
	Нетравматичне очищення	Відсутність механічного тертя та вібраційних впливів не травмує зерно, що критично важливо для

Категорія	Перевага	Опис
		насінневого матеріалу.
	Робота з вологим матеріалом	Ефективність сепарації залишається високою, незалежно від рівня вологості та засміченості сировини, що є проблемою для решітних машин.
Економічність	Низьке енергоспоживання	Завдяки унікальній конструкції повітряних нагнітачів (імпелерів) та відсутності значних опорів, машини споживають у 2-4 рази менше електроенергії, ніж традиційні ситові аналоги.
	Багатофункціональність	Один сепаратор може замінити кілька машин у лінії (ситовий сепаратор, трієр), виконуючи очищення, сортування та калібрування.
	Ефект підсушування	Циркуляція повітря може незначно підсушувати зерно (на 0,5–1,0%), що позитивно впливає на його зберігання.
Обслуговування та гнучкість	Простота конструкції	Відсутність решіт, щіток, точок змашування та змінних механічних деталей значно спрощує обслуговування.
	Швидкий перехід	Перехід з однієї культури на іншу відбувається швидко, оскільки не потрібно міняти решета, а лише переналаштувати повітряний потік (заслінки).

Таблиця 2.3 – Недоліки використання аеродинамічних сепараторів [4-12]

Категорія	Недолік / обмеження	Пояснення
Розділення матеріалу	Залежність від питомої ваги	Метод неефективний для розділення домішок, які мають однакову питому вагу та аеродинамічні властивості з якісним зерном. Наприклад, цілі насінини бур'янів можуть мати таку ж вагу, як щупле, але посівне зерно.
Потреба у додатковому очищенні	Необхідність попереднього очищення	Для видалення великих, грубих домішок (каміння, великі шматки землі, солома), які можуть заблокувати камеру, все одно потрібні <i>скальператори</i> (грубого очищення).
Управління	Вимоги до оператора	Ефективність сепарації сильно залежить від точного налаштування повітряного потоку та положення заслінок. Це вимагає кваліфікованого оператора, оскільки "правильне" налаштування може відрізнитися для кожної партії зерна.
Екологічність	Утворення пилу	Якщо сепаратор не оснащений циклонно-осадовою камерою (ЦОК) або іншим модулем уловлювання легкої фракції, він може створювати значне запилення навколо робочої зони.

Подільність зерноsumіші за аеродинамічними ознаками базується на тому, що її компоненти (основне зерно, легкі домішки, важкі домішки) мають різну

густину, форму та площу поверхні, що прямо впливає на їхню швидкість витання:

$$V_{\partial} \sim \sqrt{\frac{G_q}{\rho_m S_{МП}}},$$

де G_q – вага частинки;

ρ_m – густина повітряного потоку;

$S_{МП}$ – ефективна площа перерізу частинки.

На практиці це створює три чіткі фракції (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Аеродинамічна характеристика зерноsumіші пшениці

Фракція	Характерні компоненти зерноsumіші	Швидкість витання (V_{∂})	Аеродинамічна поведінка
Легкі домішки	Полова, пил, лушпиння, мінеральний пил, щупле і пошкоджене зерно	Найнижча ($V_{\partial} < 4...5$ м/с)	Виносяться повітряним потоком при його мінімальній швидкості, відхиляються на значну величину
Основна фракція	Повноцінне, без уражень зерно пшениці	Середня ($V_{\partial} \approx 12$ м/с)	Рухається проти заданого робочого потоку, відхиляється на середню величину
Важкі домішки	Камінці, шматки ґрунту, металеві включення	Висока ($V_{\partial} > 15$ м/с)	Практично не реагують на робочий повітряний потік, мають мінімальне відхилення

Як відомо [2, 3, 11, 12], даний спосіб сепарації передбачає два підходи (методи) до взаємодії з повітряним потоком (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Методи сепарування зерноsumішей за аеродинамічними властивостями [2, 3, 11, 12]

Метод	Принцип роботи	Обладнання
Пневмосепарування	Використання потужного повітряного потоку. Легкі домішки (пил, лушпиння, дрібні бур'яни) видуваються, а важке та якісне зерно осідає.	Повітряні сепаратори (наприклад, типу САД, Петкус), аспіраційні колонки, віялки.
Гравітаційне очищення	Сортування за щільністю та вагою на спеціальних столах, де важкі домішки осаджуються, а легкі підіймаються.	Вібропневмостоли (пневмостоли), каменевідбірники (для видалення мінеральних домішок).

2.2. Обґрунтування об'єкта досліджень

Незважаючи на різноманіття обладнання для сепарації зерноsumішей за аеродинамічними ознаками, більшість існуючих конструктивних схем мають суттєвий недолік: вони не дозволяють досягти необхідної якості очищення при забезпеченні продуктивності на рівні решітних машин [4, 11, 12].

Ця проблема, зокрема, пов'язана з неможливістю швидкої та ефективної адаптації пневмосепаруючих систем до змінних умов процесу. До таких умов належать різкі коливання фізико-механічних властивостей і стану компонентів зерноsumіші (вологість, засміченість, щільність). Недостатня гнучкість зменшує загальну ефективність їх застосування.

Таким чином, нагальною є необхідність пошуку нових шляхів розвитку зерноочисної техніки повітряного способу сепарації.

Основна концепція створення «ідеального» пневмосепаратора зосереджена на двох ключових цілях:

1. Забезпечення рівномірного завантаження зерноsumіші по всій ширині робочої зони;

2. Створення ідентичних умов взаємодії кожної частки з потоком повітря, що має рівномірне швидкісне поле.

Досягнення цих умов дозволить максимізувати точність сепарації, незалежно від неоднорідності вхідного матеріалу.

Одним із показових прикладів спроб створити сепаратор, оптимальний за ключовими параметрами рівномірності та якості, є зерноочисна машина пневмогравітаційного типу (рис. 2.1) [20, 21]. У цій машині реалізовано принцип комбінованої дії сил – інерції та повітряного потоку на зернову суміш.

Робота сепаратора передбачає наступні етапи. Після встановлення оптимальної норми подачі, оператор відкриває регульовальну заслінку 8, розташовану на завантажувальному бункері 1. Зерновий матеріал переміщується з бункера до направляючого елемента, звідки надходить у вертикальний пневмогравітаційний канал 2. Зернова маса розпочинає вільне падіння з висоти H у каналі 2. На цьому етапі, внаслідок диференційованого опору повітря, відбувається попереднє аеродинамічне розшарування частинок: компоненти набувають різної швидкості падіння залежно від їхньої густини, форми та аеродинамічного опору. У нижній частині каналу матеріал потрапляє в робочу зону, що піддається дії струменів повітряного потоку висотою L . Повітря надходить через жалюзі повітряозабірника 3. Легкі фракції (полова, пил, щупле зерно) характеризуються меншою інерційністю вертикального руху донизу. При взаємодії з потужним поперечним або висхідним повітряним потоком вони змінюють траєкторію руху та виносяться крізь отвори жалюзійних повітряозабірників 3. Важкі фракції (основне зерно) мають значно більшу інерційність. Вони суттєво не змінюють початкової вертикальної траєкторії падіння і потрапляють у нижню частину сепаратора для подальшого вивантаження. Винесені повітряним потоком легкі частки (відходи) транспортуються до пилоочисника 5 (як правило, циклонного типу). У нижній частині циклону відбувається осадження відходів, які накопичуються у фільтрі 9

або спеціальному накопичувачі. Очищене від пилу та домішок повітря виходить через центральну трубу та вентилятор назовні. Очищений зерновий матеріал (важка фракція) вивантажується із нижньої частини пневмогравітаційного каналу 2, завершуючи цикл сепарації.

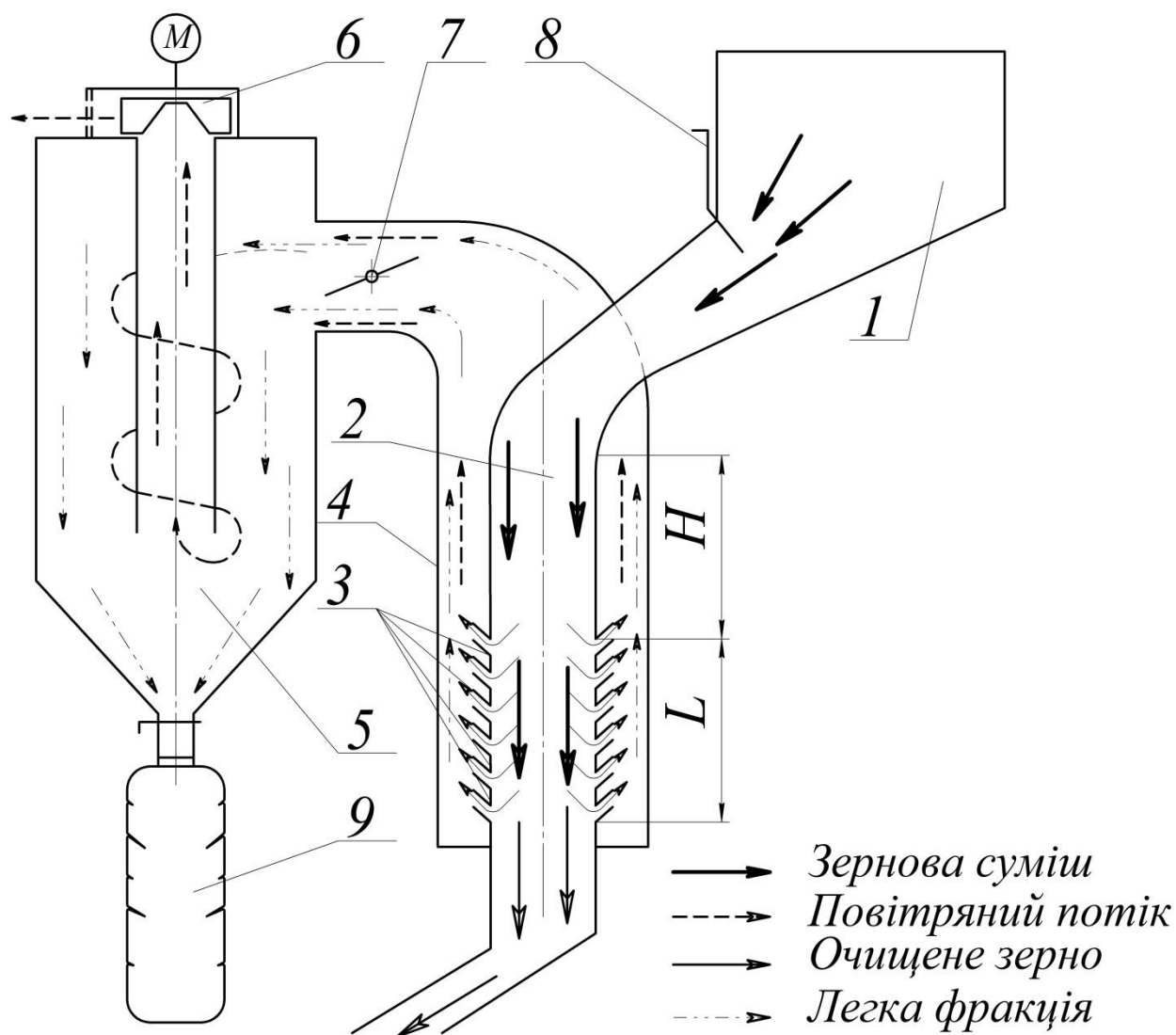


Рис. 2.1 – Зерноочисна машина пневмогравітаційного типу (функціональна схема):

1 – оперативний бункер; 2 – гравіканал; 3 – жалюзі повітрязабірника; 4 – вакуумкамера; 5 – циклонний пилоочисник; 6 – вентилятор; 7 – заслінка вакуумкамери; 8 – заслінка бункера; 9 – фільтрувальний елемент.

На початковому етапі рух компонентів зерноsumіші в робочій камері сепаратора відбувається відповідно до загальновідомих фізичних законів: як вільне падіння тіла з певною початковою швидкістю [2, 3, 12, 13]. Саме взаємодія

цієї природної траєкторії падіння із цілеспрямованим повітряним потоком забезпечує необхідне розділення.

Висновки по розділу

За результатами аналізу механізованих систем для післязбирального обробітку зерноsumіші пшениці було встановлено їх основні недоліки та переваги. Таким чином визначено, що аеродинамічна сепарація є однією з базових, яка має використання на усіх етапах очищення. За результатами огляду найбільш актуальних систем, які використовуються для повітряної сепарації зерноsumішей колосових культур, виявлено перспективну схему пневмогравітаційного сепаратора, призначеного для ефективного розділення зернових сумішей на окремі компоненти, використовуючи їхні аеродинамічні властивості та дію повітряного потоку.

Основними елементами пневмогравітаційного сепаратора, які забезпечують точний контроль над системою сепарації є:

- система завантаження, яка відповідає за рівномірну подачу зерноsumіші;
- вертикальний пневмогравітаційний канал – центральний елемент, де відбувається розділення;
- жалюзійний повітрязабірник, який розміщений на висоті H від точки подачі – формує зону, де потік повітря починає активно взаємодіяти з матеріалом;
- система створення потоку – вентилятор або імпелер, що генерує необхідну швидкість і тиск повітря;
- система осадження – призначена для ефективного видалення та збору легких компонентів (домішок) із загальної маси;
- механізм розшарування та сепарації, який дозволяє забезпечити ефективну сепарацію зерноsumіші.

У вертикальному каналі створюються ідеальні умови для попереднього розшарування та розподілу компонентів. Цей процес відбувається завдяки

безперервній взаємодії між силою гравітації та силою аеродинамічного опору середовища.

Коли частки потрапляють у зону дії структурованого повітряного потоку біля жалюзі, ефективність розділення різко зростає. Саме в цій зоні забезпечується підвищена ефективність відбору легкого компонента із загальної маси, оскільки різниця в швидкості витання між якісним зерном та сміттям стає максимально вираженою.

Аналіз наукових досліджень щодо закономірностей переміщення зернової суміші в повітряному потоці показує, що основні принципи визначення теоретичних властивостей поведінки окремих компонентів під дією фізичних сил вже встановлені. Проте, постає нагальна потреба вийти за межі цієї моделі. Необхідно розглядати компоненти не просто як одиничні, ізольовані частки, а як складну систему, яка взаємодіє як із навколишнім середовищем (повітряним потоком), так і з іншими частками системи (зернами).

Таким чином необхідно провести комплексне дослідження технологічного процесу та обґрунтувати оптимальні параметри сепаратора, що використовує вертикальний пневмогравітаційний канал для очищення та сортування зернових сумішей.

Швидкість частки у вертикальному напрямку V_{x1} , не враховуючи опору повітря на цьому етапі, описується класичною формулою рівноприскореного руху:

$$V_{x1} = V_{01} + gt_1, \quad (3.1)$$

де V_{x1} – кінцева швидкість частки у вертикальному напрямку в момент часу t_1 ;

V_{01} — початкова швидкість частки у вертикальному напрямку;

g – прискорення вільного падіння;

t_1 – час руху у вертикальному напрямку.

У реальних умовах пневмосепарації, траєкторія та швидкість частки будуть значно складнішими, оскільки на неї одночасно діють:

- сила гравітації;
- сила інерції (від початкової швидкості руху в системі);
- сила опору повітряного потоку, що є ключовим фактором сепарації.

Розуміння вільного падіння часток є вихідною точкою для подальшого моделювання руху в аероканалі, де ця швидкість буде коригуватись впливом повітряного потоку [2, 3, 12, 13]:

$$P_{on} = m_k k_U V_{a.k}^2, \quad (3.2)$$

де m_k – маса компонента;

k_U – коефіцієнт парусності;

$V_{a.k}$ – величина абсолютної швидкості компоненту.

У процесі падіння, коли зернова суміш досягає зони, де розташовані жалюзійні повітрязабірники L (на певній висоті від місця подачі H), на компоненти суміші починає активно діяти сила повітряного потоку $F_{a.n}$.

Саме ця сила є вирішальною: вона зміщує траєкторії руху окремих компонентів зерноsumіші. Це зміщення відбувається залежно від їх аеродинамічних властивостей (переважно питомої ваги та перерізу відносно потоку повітря) [2, 17, 18].

Таким чином, у цій зоні починається безпосередня сепарація: легкі частки підхоплюються та відносяться далі, а важкі продовжують падіння з меншою зміною траєкторії.

У загальному випадку, ця сила описується класичним рівнянням, яке враховує аеродинамічні властивості середовища та частки [3, 12, 18]:

$$F_{a.n} = C_{л.о.} \rho_{n.n} \frac{V_{відн}^2}{2} S_{МП}, \quad (3.3)$$

де $C_{л.о.}$ – коефіцієнт лобового опору (безрозмірний), який залежить від форми та стану поверхні конкретної частки (зерно, насіння бур'яну, сміття);

$\rho_{n.n}$ – густина повітря в робочій зоні, який залежить від температури та тиску;

$V_{відн}$ – відносна швидкість руху частки щодо повітряного потоку;

$S_{МП}$ – площа ефективного (міделевого) перерізу частки – площа найбільшого перерізу частки в площині, перпендикулярній до напрямку руху повітря.

При складанні диференційного рівняння руху частинок будемо враховувати опірність середовища. Скористаємось декартовою двомірною системою координат ХОУ, направивши вісь x вертикально вгору. Таким чином, проекція швидкості в напрямку руху зерноsumіші:

$$V_x = \frac{dx}{dt}. \quad (3.4)$$

Проаналізуємо сили, які чинитимуть дію на частки при їх переміщенні у гравітаційній частині каналу:

- сила гравітації G_m , дія якої спрямована донизу, відповідна проекція на вертикальну вісь становитиме:

$$G_m = -m_\kappa g, \quad (3.5)$$

де g – гравітаційне прискорення;

- сила опору середовища P_{on} , яка при невеликих значеннях відносної швидкості часток $V_{відн}$ пропорційна швидкості V_x , тому можемо скористатись лінійною моделлю:

$$P_{on} = -pV_x, \quad (3.6)$$

де p – коефіцієнт опірності середовища, який пов'язує параметри часток з властивостями середовища.

Знак мінус вказує на протилежність дії відносно швидкості.

Скориставшись II законом Ньютона [3, 12, 18, 28], запишемо:

$$\sum X : m_\kappa \frac{dV_x}{dt} = -m_\kappa g - pV_x. \quad (3.7)$$

Позбувшись маси і позначивши для спрощення виразу $\theta = p / m$, одержимо диференціальне рівняння руху відносно швидкості часток:

$$\frac{dV_x}{dt} + \theta V_x = -g. \quad (3.8)$$

Отримане лінійне рівняння має перший порядок, яке будемо інтегрувати. Для цього першочергово відокремимо змінні:

$$\frac{dV_x}{g + \theta V_x} = -dt,$$

та після інтегрування обидвох частин маємо:

$$V_x(t) = \frac{D}{\theta} e^{-\theta t} - \frac{g}{\theta}, \quad (3.9)$$

де $D = e^{-gC_1}$ – константа, значення якої встановимо за початкових умов.

Початкові умови визначаються моментом $t_{01} = 0$, за якого швидкість становитиме V_{01} і, з врахуванням спрямованості швидкості донизу, тобто в проєкції на вертикаль $V_x(0) = -V_{01}$:

$$D = g - \theta V_{01}. \quad (3.10)$$

З врахуванням (3.10) залежність (3.9) набуде наступного вигляду:

$$V_x(t) = \left(\frac{g}{\theta} - V_{01} \right) e^{-\theta t} - \frac{g}{\theta}. \quad (3.11)$$

Далі знаходимо величину швидкості $V_1 = V_{xH}$ в місці розташування жалюзі, що характеризується висотою H , проте, взявши до уваги наявність залежності V_x від часу t , постає необхідність виключення часу з рівнянь. Скористаємось нерівністю:

$$\frac{dV_x}{dt} = V_x \frac{dV_x}{dx}, \quad (3.12)$$

і матимемо рівняння:

$$V_x \frac{dV_x}{dx} = -g - \theta V_x, \quad (3.13)$$

з якого знайдемо швидкість як функцію координати ($V_x(x)$):

$$dx = -\frac{V_x}{g + \theta V_x} dV_x. \quad (3.14)$$

Після виконання поліноміального ділення [29], що спрощує інтегрування, одержимо:

$$dx = \frac{1}{\theta} \cdot \left(\frac{g}{g + \theta V_x} - 1 \right) dV_x. \quad (3.15)$$

Виконуємо інтегрування отриманого виразу, використовуючи початковий стан:

$$\int_H^L dx = \frac{1}{\theta} \int_{-V_{01}}^{V_{x1}} \left(\frac{g}{g + \theta V_x} - 1 \right) dV_x, \quad (3.16)$$

$$L - H = \frac{1}{\theta} \left[\left(\frac{g}{\theta} \ln |g + \theta V_{x1}| - V_{x1} \right) - \left(\frac{g}{\theta} \ln |g + \theta(-V_{01})| - (-V_{01}) \right) \right]. \quad (3.17)$$

Зважаючи на додатній характер величин V_{01} , g і θ , відкинемо абсолютні значення і одержимо наступний вираз:

$$L - H = \frac{g}{\theta^2} \ln \left(\frac{g + \theta V_{x1}}{g - \theta V_{01}} \right) - \frac{V_{x1} + V_{01}}{\theta}. \quad (3.18)$$

Одержане рівняння є трансцендентним відносно V_{x1} , а це унеможливило аналітичне вираження даної величини у явному вигляді, що пов'язано з наявністю і логарифмічного, і лінійного членів. Тож з метою одержання чисельних значень швидкості потрібно скористатись чисельними методами.

Далі будемо розглядати зміни у траєкторіях та диференціальних рівняннях руху часток при досягненні ними висоти L . Тут під кутом β на частки починає діяти сила повітряного потоку $F_{a.n}$, абсолютне значення якої визначається рівнянням (3.2).

Враховуючи сталість аеродинамічних характеристик відносно характерних часток зерноsumіші, то будемо припускати, що абсолютне значення сили $F_{a.n}$ буде постійною величиною з досягненням висоти L . Тож введемо позначення даної константи: $\xi = m_k k_U V_{a.k}^2$.

Тоді, припускаючи, що напрям поштовху частинок потоком повітря відбувається у напрямку, яких характеризується додатними x та y , одержимо рівняння по вертикалі (вісь x):

$$-m_k g - pV_x + \xi \sin \beta = m_k \frac{dV_x}{dt}. \quad (3.19)$$

Позбувшись маси і позначивши для спрощення виразу $\theta = p/m$ та $I_x = (\xi/m_k) \sin \beta$, одержимо:

$$\frac{dV_x}{dt} = -g - \theta V_x + I_x. \quad (3.20)$$

Аналогічно запишемо рівняння вздовж осі y :

$$-pV_y + \xi \cos \beta = m_k \frac{dV_y}{dt}. \quad (3.21)$$

Позбувшись маси і позначивши для спрощення виразу $I_y = (\xi / m_\kappa) \cos \beta$ і після перетворень матимемо:

$$\frac{dV_y}{dt} = I_y - \theta V_y. \quad (3.22)$$

При вирішенні отриманих дифрівнянь використаємо відповідні початкові умови в момент часу t_1 , за якого розв'язок рівнянь (3.20) і (3.22) буде мати наступний вигляд:

горизонтальний напрям, $y(t_1) = 0$, $V_y(t_1) = 0$, $C_y = -I_y / \theta$,

$$V_y(t) = \frac{I_y}{\theta} (1 - e^{-\theta(t-t_1)}); \quad (3.23)$$

вертикальний напрям $x(t_1) = L$, $V_x(t_1) = V_{x1}$, $C_x = V_{x1} - (I_x - g) / \theta$,

$$V_x(t) = \frac{I_x - g}{\theta} + \left(V_{x1} - \frac{I_x - g}{\theta} \right) e^{-\theta(t-t_1)}. \quad (3.24)$$

Відповідні траєкторії $y(x)$ одержимо після інтегрування $V_x(t)$ та $V_y(t)$ по часу.

Горизонтальний напрям:

$$y(t) = \int V_y(t) dt = \int \left[\frac{I_y}{\theta} - \frac{I_y}{\theta} e^{-\theta(t-t_1)} \right] dt,$$

$$y(t) = \frac{I_y}{\theta} t + \frac{I_y}{\theta^2} e^{-\theta(t-t_1)} + C_{2y},$$

при $y(t_1) = 0$:
$$C_{2y} = -\frac{I_y}{\theta} t_1 - \frac{I_y}{\theta^2}.$$

В кінцевому вигляді матимемо:

$$y(t) = \frac{I_y}{\theta} (t - t_1) + \frac{I_y}{\theta^2} (e^{-\theta(t-t_1)} - 1). \quad (3.25)$$

Вертикальний напрям – з метою спрощення виразів запишемо $A = \frac{I_x - g}{\theta}$

та $B = V_{x1} - A$:

$$V_x(t) = A + B e^{-\theta(t-t_1)},$$

$$x(t) = \int V_x(t) dt = \int [A + B e^{-\theta(t-t_1)}] dt,$$

$$x(t) = At - \frac{B}{\theta} e^{-\theta(t-t_1)} + C_{2x},$$

при $x(t_1) = L$:
$$L = At_1 - \frac{B}{\theta} e^0 + C_{2x},$$

$$C_{2x} = L - At_1 + \frac{B}{\theta}.$$

В кінцевому вигляді матимемо:

$$x(t) = h_1 + B(t - t_1) + \frac{D}{\chi} (1 - e^{-\chi(t-t_1)}), \quad (3.26)$$

або

$$x(t) = L + \frac{I_x - g}{\theta} (t - t_1) + \frac{1}{\theta} \left(V_{x1} - \frac{I_x - g}{\theta} \right) (1 - e^{-\theta(t-t_1)}). \quad (3.27)$$

Отримані рівняння (3.25) та (3.27) є параметричними формами траєкторій руху часток зерноsumіші. Зважаючи на складність експоненціальних членів даних рівнянь, аналітичне вираження часу t є практично неможливим, а тому коректний розв'язок задачі потребує визначення всіх необхідних числових констант, тобто виконання чисельного моделювання за алгоритмом для кожного набору параметрів:

1. Обрати часовий інтервал t ($0 \dots 1,5$ с).
2. Обчислити відповідні $x(t)$ і $y(t)$.
3. Побудувати графік y від x .

Для виконання завдання побудуємо траєкторії $y(x)$ для кожного заданого кута β і на кожному графіку відобразимо 4 криві, що відповідають мінімальним і максимальним значенням коефіцієнта парусності часток (рис. 3.2-3.4).

Кут жалюзі: 10° — траєкторії (початок зверху \rightarrow вниз)

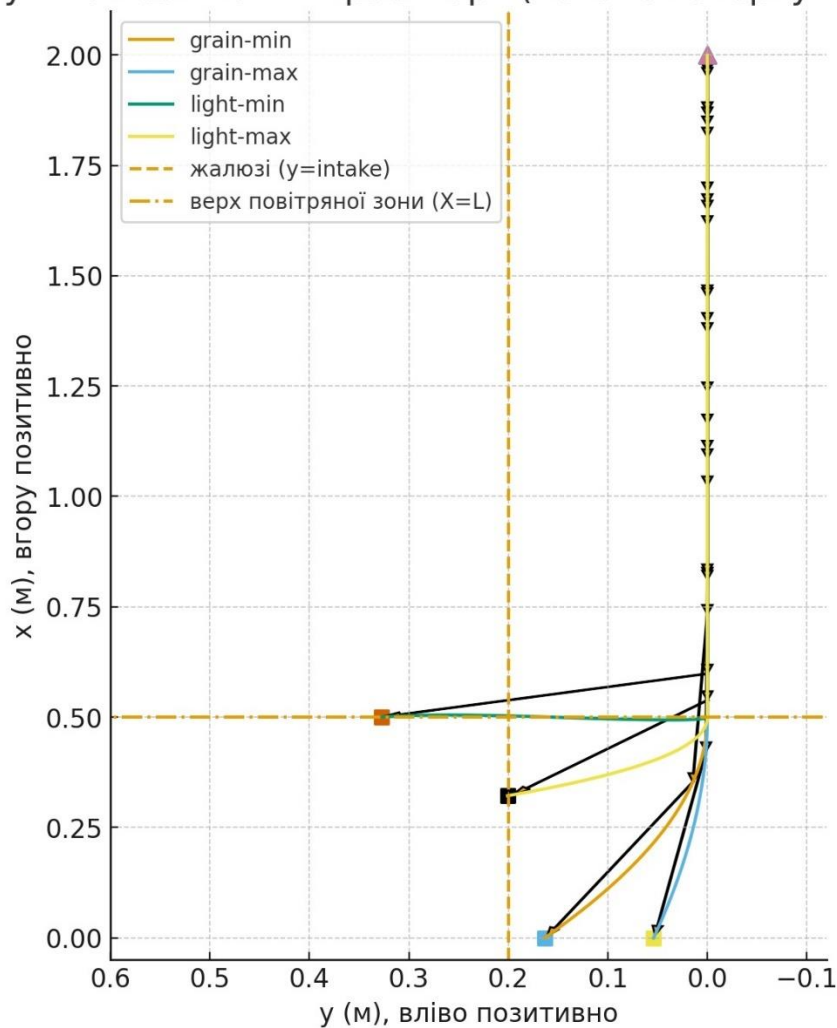


Рисунок 3.2 – Траєкторії $y(x)$ для кута положення жалюзі $\beta = 10^\circ$

Кут жалюзі: 0° — траєкторії (початок зверху → вниз)

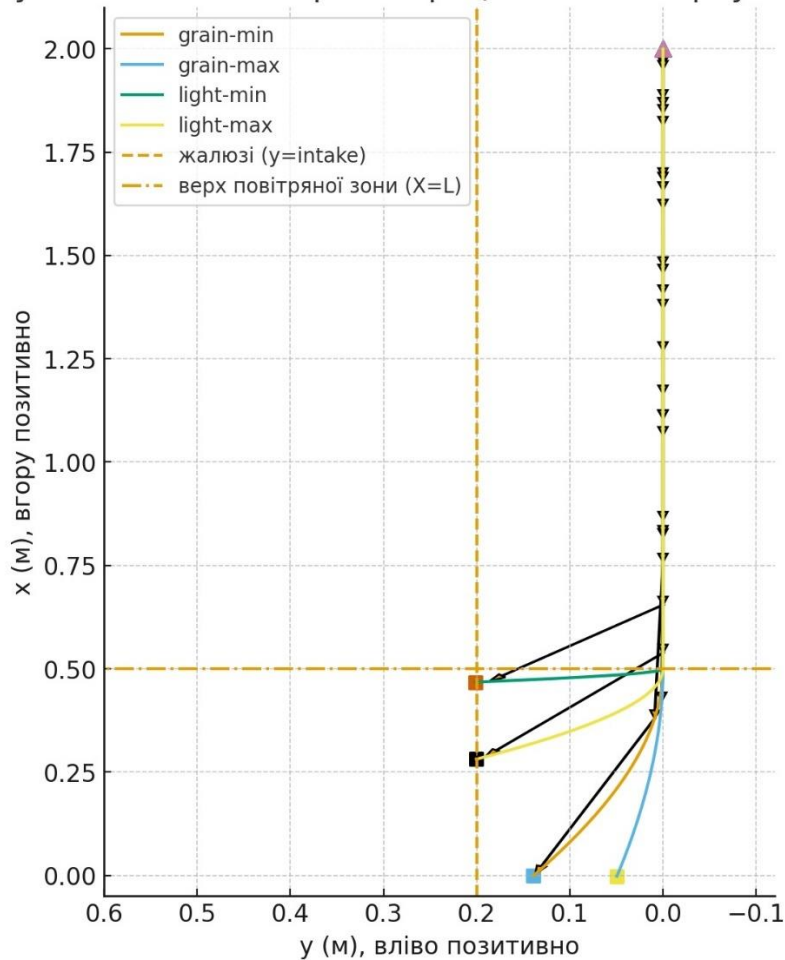


Рисунок 3.3 – Траєкторії $y(x)$ для кута положення жалюзі $\beta = 0^\circ$

Як бачимо з графіків (рис. 3.2-3.4) домішки внаслідок вищого значення величини коефіцієнта парусності мають значно сильніше відхилення в горизонтальному напрямку, порівняно з зерном пшениці. При цьому, при проходженні траєкторії часток на відстані 0,05 м від стінки каналу, маємо цілковите розділення матеріалу на дві фракції – легка домішка і зерно пшениці. При наближенні траєкторії будемо спостерігати перекриття траєкторій, що буде призводити до зменшення ефективності сепарації.

При цьому, суттєвий вплив на траєкторії відіграє положення жалюзі відносно горизонтальної вісі. Так, за позитивного кута (рис. 3.2) спостерігається зменшення діапазону розташування жалюзі (висоти L), однак, зростає ймовірність дочасної взаємодії легких часток зі стінками каналу, що призведе до втрати ними динаміки руху.

Кут жалюзі: -10° — траєкторії (початок зверху → вниз)

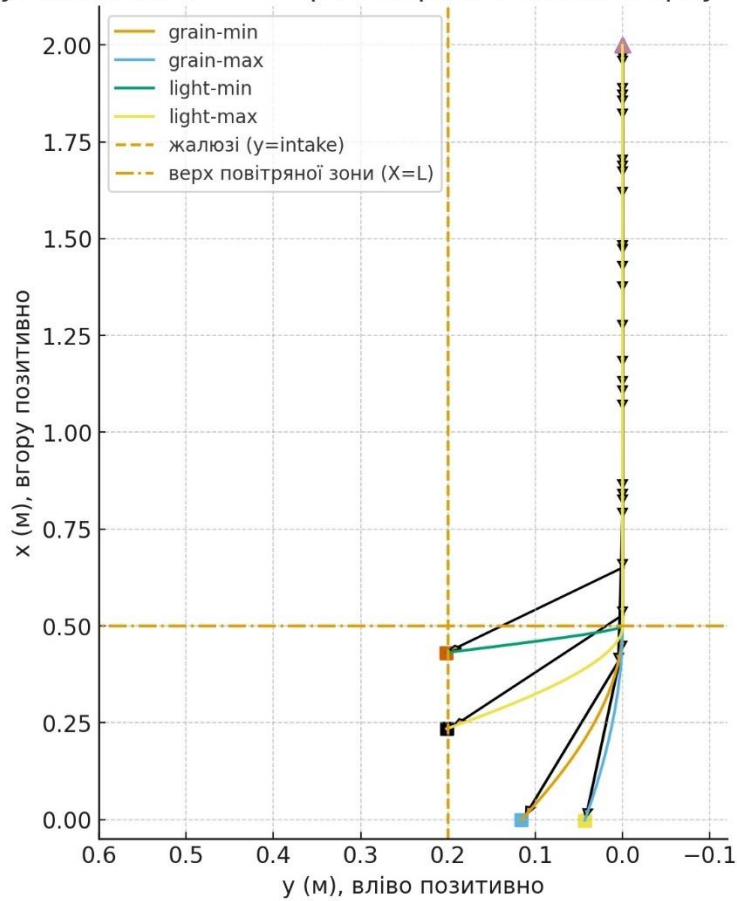


Рисунок 3.4 – Траєкторії $y(x)$ для кута положення жалюзі $\beta = -10^\circ$

Натомість, при негативних кутах положення жалюзі (рис. 3.4) спостерігаємо збільшення габаритного розміру повітрязабірника (висоти L), що сприяє втратам зерна у відходах, оскільки його найбільш легкі частки матимуть здатність пройти крізь отвори жалюзі.

Зважаючи на це, найбільш доцільним є застосування положення жалюзі, максимально наближене до горизонтальної осі (рис. 3.3) з невеликим позитивним кутом.

Висновки по розділу

Шляхом математичного моделювання було проаналізовано рух компонентів зерноsumіші пшениці в гравіканалі пневмогравітаційного сепаратора, за результатами якого можемо зробити деякі висновки.

Збільшення ефективної висоти пневмогравітаційного каналу (H) сприяє кращому попередньому розшаруванню часток внаслідок відмінностей у аеродинамічних властивостях (швидкості витання), що дозволяє швидкостям часток максимально наблизитися до їхніх критичних значень, які є унікальними для кожного компоненту зерноsumіші. При цьому, збільшення H дає значимий приріст ефективності сепарації лиш до тієї величини, коли швидкісні параметри найважчих зернових компонентів досягнуть 95%...99% їх термінальних швидкостей. Надмірна висота каналу призводить до збільшення габаритів та вартості обладнання, зростання турбулентності потоку зерноsumіші, що може погіршити чіткість сепарації.

Легкі домішки в місці забору повітря через жалюзі вакуумкамери після початку дії повітряного потоку відхиляються в горизонтальному напрямку більш суттєво у порівнянні із зерном основної культури, що пояснюється їхньою більш активною взаємодією з повітряним потоком.

При негативних кутах розкриття жалюзі повітрязабірника вакуумкамери спостерігається від'ємне горизонтальне відхилення часток, що може спричинити збільшення габаритів (висоти) повітрязабірника і втрати якості. Натомість, позитивні кути призводять до підвищених втрат зернової фракції у відходах, оскільки траєкторія зернових часток наближатиметься до повітрязабірників. Таким чином, раціональними кутами положення жалюзі повітрязабірника є максимально наближені до горизонтальної осі з невеликим позитивним кутом (до 5°).

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Розрахунок основних конструктивних параметрів пневмогравітаційного сепаратора

4.1.1. Розрахунок робочої швидкості повітряного потоку в зоні сепарації

Зважаючи на результати, отримані в попередньому розділі, одним з ключових параметрів пневмогравітаційного сепаратора є робоча швидкість повітряного потоку в зоні жалюзі вакуумкамери. Даний параметр повинен відповідати мінімальним значенням, за яких легкі компоненти будуть винесені через повітрозабірники.

Робочу швидкість $V_{роб}$ раціонально знайти з умови рівноваги, коли сила аеродинамічного опору $F_{a.n}$ буде дорівнювати силі гравітації G_m .

Прирівнявши $F_{a.n}$ і G_m та розв'язавши рівняння відносно $V_{роб}$:

$$C_{л.о.} \rho_{n.n} \frac{V_{роб}^2}{2} S_{МП} = m_k g, \quad (4.1)$$

де $C_{л.о.}$ – коефіцієнт лобового опору (безрозмірний), який залежить від форми та стану поверхні конкретної частки (зерно, насіння бур'яну, сміття);

$\rho_{n.n}$ – густина повітря в робочій зоні, який залежить від температури та тиску;

$S_{МП}$ – площа ефективного (міделевого) перерізу частки – площа найбільшого перерізу частки в площині, перпендикулярній до напрямку руху повітря;

$$V_{роб} = \sqrt{\frac{2m_k g}{C_{л.о.} \rho_{n.n} S_{МП}}}. \quad (4.2)$$

Для розрахунків будемо орієнтуватись на наступні вихідні дані:

Параметр	Символ	Значення
Маса домішки	m_k	5×10^{-5} кг (0,05 г)
Площа перерізу	$S_{МП}$	5×10^{-6} м ² (5 мм ²)
Коефіцієнт опору	$C_{л.о.}$	0,8 (типове для нерівної частки)
Густина повітря	$\rho_{п.п}$	1,2 кг/м ³
Прискорення	g	9,81 м/с ²

$$V_{роб} = \sqrt{20,44} = 4,52 \text{ м/с.}$$

Як бачимо, ефективний забір легких домішок без виносу якісного зерна забезпечується робочою швидкістю потоку повітря в зоні сепарації, мінімальне значення якої повинно відповідати 4,52 м/с, верхнє значення обмежується мінімальною критичною швидкістю витання якісного зерна.

3.1.2. Розрахунок мінімальної висоти каналу (H)

Висоту $\Delta H = H - L$ (від місця подачі до жалюзі) необхідно визначати з умови достатності інерційності зерна пшениці, щоб зернова маса могла досягти певної швидкості падіння ($V_{пад}$) для стабілізації потоку перед зустріччю з повітрям:

$$V_{пад} = \sqrt{2g\Delta H}.$$

Тоді висота падіння:

$$H = \frac{V_{пад}^2}{2g}. \quad (4.3)$$

Припустимо, ми хочемо, щоб зерно набрало швидкість $V_{пад} = 4,5$ м/с перед входом у зону активного потоку:

$$\Delta H = \frac{4,5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,03 \text{ м.}$$

Якщо конструкція вимагає, щоб зерно досягло швидкості 4,5 м/с для стабілізації, мінімальна висота вільного падіння ΔH має становити не менше 1,03 м.

При цьому, загальна висота пневмогравітаційного каналу буде становити:

$$H = \Delta H + L = 1,03 + 0,25 = 1,28 \text{ м,}$$

де L – довжина розміщення жалюзі по висоті, раціональне значення якої прийнято за результатами теоретичних досліджень.

3.1.3. Розрахунок перерізу (глибини) пневмогравітаційного каналу

При розрахунку перерізу каналу будемо виходити з необхідності забезпечити задану продуктивність сепаратора $Q_{\text{зерн}}$ за оптимальної швидкості повітряного потоку $V_{\text{роб}}$ та рівномірному розподілі матеріалу. Зважаючи на круглу форму пневмогравітаційного каналу, в подальшому будемо оперувати поняттям площі перерізу каналу $A_{\text{кан}}$, яка повинна забезпечувати проходження об'ємної витрати повітря $Q_{\text{нов}}$ при обраній робочій швидкості. Крім того, площа повинна відповідати необхідній продуктивності сепарації.

Величина об'ємної витрати повітря $Q_{\text{нов}}$ є ключовим параметром, який можна визначити, виходячи з необхідної кількості повітря, яке припадає на одиницю маси зерна, тобто питомі витрати повітря $q_{\text{н/з}}$:

$$Q_{\text{нов}} = Q_{\text{зерн}} q_{\text{н/з}}. \quad (4.4)$$

Тоді корисна площа перерізу каналу $A_{\text{кан}}$ становитиме:

$$A_{\text{кан}} = \frac{Q_{\text{пов}}}{V_{\text{роб}}} = \frac{Q_{\text{зерн}} q_{n/z}}{V_{\text{роб}}} . \quad (4.5)$$

Величина еквівалентного діаметра каналу круглого перерізу $D_{\text{кан}}$:

$$D_{\text{кан}} = \sqrt{\frac{4A_{\text{кан}}}{\pi}} . \quad (4.6)$$

Розрахунок зазначених параметрів проводимо відповідно до вихідних умов:

Параметр	Символ	Значення	Одиниці	Примітки
Продуктивність	$Q_{\text{зерн}}$	1,5	кг/с	Еквівалент 5400 кг/год
Питома витрата повітря	$q_{n/z}$	2,5	м ³ /кг	Типове значення для зерна
Робоча швидкість потоку	$V_{\text{роб}}$	5,0	м/с	$V_{\text{роб}} \geq 4,5 \text{ м/с}$

Згідно залежностей (4.4-4.6) :

- об'ємна витрата повітря: $Q_{\text{пов}} = 3,75 \text{ м}^3/\text{с}$;
- площа перерізу каналу: $A_{\text{кан}} = 0,75 \text{ м}^2$;
- еквівалентний діаметр каналу: $D_{\text{кан}} \approx 0,977 \text{ м}$.

3.2. Енергетичні розрахунки

3.2.1. Розрахунок потужності вентилятора

Потужність, необхідна для приводу вентилятора, залежить від об'ємної витрати повітря $Q_{\text{пов}}$ та загального опору системи, тобто зміни тиску ΔP :

$$N_{\text{е}} = \frac{Q_{\text{пов}} \Delta P}{\eta_{\text{е}}} , \quad (4.7)$$

де N_g – потужність вентилятора;

$Q_{нов}$ – об'ємна витрата повітря;

ΔP – повний тиск (загальний опір системи), який є сумарним опором усіх елементів (канал, жалюзі, циклон, фільтри);

η_g – ККД вентилятора.

Вихідними параметрами для розрахунку є наступні:

Параметр	Символ	Значення	Одиниці	Примітки
Об'ємна витрата	$Q_{нов}$	3,75	м ³ /с	Розрахункове значення
Повний тиск	ΔP	1500	Па	Типовий для пневмоканалів з циклоном [26-28]
ККД вентилятора	η_g	0,65	-	Типове для відцентрових вентиляторів [27]

За залежністю (4.7), розрахункове значення потужності становить:

$$N_g = (3,75 \cdot 1500) / 0,65 \approx 8654 \text{ Вт.}$$

Мінімальна необхідна потужність вентилятора становить близько 8654 Вт (8,65 кВт), з урахуванням запасу і умов роботи обираємо асинхронний електродвигун Т132L4 потужністю 9,2 кВт, оберти валу двигуна 1400 об./хв., номінальний ступінь захисту IP56.

Висновки по розділу

Відповідно до запропонованої конструкції пневмогравітаційного сепаратора та з урахуванням теоретичних досліджень його роботи було виконано розрахунки основних конструктивних параметрів сепараційного каналу та енергетичні обґрунтування.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Пневмогравітаційні сепаратори (ПГС) є обладнанням підвищеної небезпеки, що використовується для розділення зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями та питомою вагою. Обслуговування ПГС вимагає суворого дотримання міжгалузевих та галузевих нормативно-правових актів з охорони праці, а також інструкції з експлуатації виробника. До роботи допускаються особи, які пройшли медичний огляд, вступний інструктаж, первинний інструктаж на робочому місці, навчання з питань охорони праці та перевірку знань.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Візуально перевірити цілісність конструктивних елементів ПГС, відсутність механічних пошкоджень, надійність кріплення всіх вузлів;

2. Упевнитися в справності та наявності всіх захисних кожухів, оглядових люків та захисних огорож рухомих частин. Перевірити функціонування кінцевих вимикачів та систем блокування, що унеможливають запуск машини з відкритими оглядовими або технологічними отворами;

3. Перевірити підключення ПГС до ефективної аспіраційної системи та впевнитися у її працездатності. Недотримання цієї вимоги призводить до підвищеної концентрації пилу у робочій зоні, що є фактором пожежо- та вибухонебезпеки, а також ризиком професійних захворювань органів дихання;

4. Перевірити стан заземлення корпусу обладнання, цілісність кабелів живлення та справність пускової апаратури.

Вимоги безпеки під час роботи

1. Робота повинна здійснюватися лише у передбачених виробником режимах. Забороняється перевищувати максимально допустиму продуктивність, що може призвести до перевантаження механізмів та підвищення вібрації;

2. Категорично забороняється:

- проводити регулювання, чищення або змащування механізмів, які рухаються;

- видаляти затори або сторонні предмети з технологічних систем під час роботи ПГС;
- знімати або відкривати захисні пристрої під час експлуатації;

3. У разі виникнення нехарактерного шуму, стуку чи надмірної вібрації, оператор зобов'язаний негайно зупинити сепаратор за допомогою кнопки аварійної зупинки. Повторний пуск дозволяється лише після встановлення та усунення причини несправності;

4. Працівники зобов'язані використовувати ЗІЗ відповідно до типових галузевих норм:

- протишумові навушники або вкладки;
- респіратор для захисту від органічного пилу
- захисні окуляри;
- спецодяг та спецвзуття.

Вимоги безпеки під час технічного обслуговування та ремонту:

1. Перед початком технічного обслуговування, ремонту або чищення необхідно повністю вимкнути обладнання, забезпечити його знеструмлення та запобігти несанкціонованому повторному пуску. На пускові пристрої вивішуються відповідні попереджувальні плакати;

2. Перед доступом до внутрішніх вузлів необхідно повністю вивантажити зерновий матеріал із сепаратора;

3. Ремонтні роботи на висоті (наприклад, обслуговування верхніх елементів аспіраційних каналів) повинні виконуватися з використанням інвентарних драбин, платформ або риштувань, із застосуванням страхувальних систем.

Дії в аварійних ситуаціях: при виникненні загоряння (особливо пилу) негайно відключити електроживлення, активувати систему пожежогасіння (за наявності) та повідомити керівника робіт і пожежну охорону; у разі травмування працівника роботу обладнання слід негайно зупинити, надати потерпілому першу домедичну допомогу та викликати медичних працівників.

6. ВИСНОВКИ

За результатами аналізу механізованих систем післязбирального обробітку, підтверджено базове значення аеродинамічної сепарації на всіх етапах очищення зерноsumішей. Виявлена перспективна конструктивна схема пневмогравітаційного сепаратора (ПГС) з вертикальним пневмогравітаційним каналом, яка забезпечує ефективне розділення зернових сумішей на основі відмінностей в аеродинамічних властивостях компонентів та дії структурованого повітряного потоку.

Ключовими елементами, що забезпечують точний контроль та функціональність системи, є: система рівномірного завантаження; вертикальний пневмогравітаційний канал; жалюзійний повітрязабірник, розташований на висоті ΔH для активізації взаємодії потоку з матеріалом; система генерації повітряного потоку; механізм розшарування та сепарації.

У вертикальному каналі створюються умови для попереднього розшарування компонентів, що є результатом безперервної взаємодії сил гравітації та аеродинамічного опору. Ефективність сепарації різко зростає у зоні дії повітряного потоку біля жалюзі, де різниця у швидкості витання між якісним зерном та легкими домішками є максимально вираженою.

Встановлено, що збільшення ефективної висоти каналу H сприяє кращому розшаруванню часток, дозволяючи їхнім швидкостям максимально наблизитися до граничних значень. Однак, значущий приріст ефективності фіксується лише до моменту, коли швидкісні параметри найважчих компонентів досягають 95%...99% їхніх критичних швидкостей. Подальше необґрунтоване збільшення H призводить до зростання габаритів, вартості обладнання та потенційного погіршення чіткості сепарації через посилення турбулентності зерноsumіші.

Шляхом математичного моделювання доведено, що легкі домішки, завдяки вищому коефіцієнту парусності, мають значно більше горизонтальне відхилення. Визначено, що раціональними кутами положення жалюзі повітрязабірника є значення, максимально наближені до горизонтальної осі, з невеликим позитивним кутом (до $\beta = 5^\circ$). Негативні кути спричиняють збільшення габаритів

повітрязбірника (висоти L) та потенційні втрати якісного зерна. Надмірні позитивні кути збільшують імовірність передчасної взаємодії легких часток зі стінками каналу, що призводить до втрати динаміки руху та зростання втрат зернової фракції у відходах.

Отримані теоретичні результати, зокрема аналіз руху компонентів у гравіканалі ПГС, підтверджують необхідність комплексного дослідження технологічного процесу та дають конструктивні обґрунтування для визначення оптимальних параметрів сепараційного каналу та енергетичних розрахунків. Наголошено на важливості розгляду компонентів зерноsumіші як складної взаємодіючої системи, що відкриває шлях до більш точного моделювання та підвищення ефективності сучасного зерноочисного обладнання.

Список використаної літератури

1. Методичні рекомендації до виконання дипломної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності Н7 «Агроінженерія» за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» / [уклад. : Д. І. Петренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. сільськогосподарського машинобуд. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. 47 с.
2. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 2020. 362 с.
3. Обґрунтування параметрів відцентрово-пневматичного сепаратора зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Петренко Дмитро Іванович ; Кіровоград. нац. техн. ун-т. - Кіровоград, 2011. - 20 с.
4. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, М. Г. Пастушенко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград. 2003. Вип. 33. С. 53-61.
5. Каталог продукції «Оріхівський Завод Сільгоспмашин». Очисники вороху ОВС-25. URL: <https://ua.orehovselmash.com/>.
6. Каталог продукції фірми PETKUS. Сортування. URL: <https://petkus.com>.
7. Каталог продукції АТ «Хорольський механічний завод». Сепаратори повітряні. URL: <https://mehzavod.com.ua/ua/>.
8. Каталог продукції компанії «Olis». Зерноочисне обладнання. URL: <https://www.olis.com.ua/>.
9. Каталог продукції фірми Kongskilde. Dual Cleaners – KDC PLUS. URL: <https://kongskilde-industries.com/grain/usa/product/dual-cleaners-kdc-plus/>.
10. Каталог продукції ТОВ «НВП Аеромех». Зернові сепаратори. URL: <https://ua.aeromeh.com.ua/catalog/zernovye-separatory/>.

11. Підвищення ефективності попереднього очищення зернових сумішей / С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, М.І. Васильковський, В.В. Гончаров. Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. Вип. 18. Луцьк: ред. вид. відділ ЛНТУ, 2009. С. 230-234.
12. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
13. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct / S. Kharchenko et al. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 4383. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
14. Areas of improvement of feeding devices for pneumatic separation channels / O. Nesterenko, O. Vasylykovskiy, R. Kisilov. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. Col.7(38), Part II – S. 90-97. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.90-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.90-97).
15. Алієв Е. Б., Гаврильченко О. С. Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насінневого матеріалу. *Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві. Вісник Харківського Національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка*. Харків. 2019. Вип. 201. С. 132–140.
16. The mathematical modeling of changes in grain moisture and heat loss on adsorption drying from parameters of grain dryer / I.L. Rogovskii, S.P. Stepanenko, A.V. Novitskii, V.I. Rebenko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 13. pp.1-7.
17. Аналіз одношарового руху зернового матеріалу у вертикальному пневмосепараційному каналі / О. В. Нестеренко, О. М. Васильковський, Р. В. Кісільов, В. М. Сало. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський*

- науковий вісник: технічні науки». Кропивницький : ЦНТУ, 2024. Вип. 9(40). Ч. 2. С. 31-40. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.31-40](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.31-40)*
18. Nesterenko, A.V., Leshchenko, S.M., Vasytkovskyi, O.M., Petrenko, D.I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. No.53(3). Pp. 65-70.
19. Нестеренко О.В., Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 51. 2021. С. 111-116. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.111-116>.
20. Пневмогравітаційний сепаратор : пат. 153219 Україна : МПК В07В 4/02 (2006.01), В07В 7/01 (2006.01). № у 202203732 ; заявл. 05.10.2022 ; опубл. 07.06.2023, Бюл. № 23/2023.
21. Мехатронний аналіз роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей / Д. С. Недельський, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський. *Збірник наукових праць «Центральноукраїнський науковий вісник: технічні науки»*. 2025. Вип. 12(43). Ч. I С. 245-252. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.245-252](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.245-252).
22. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.
23. Підручник дослідника : навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, К. В. Васильковська, Д. І. Петренко. Кіровоград : Мачулін, 2016. 204 с.
24. Васильковський О., Лещенко С., Васильковська К., Петренко Д. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки. : навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків : Мачулін, 2019. 164 с.

25. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посібник. Київ : НУХТ, 2022. 385 с.
26. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин / П.М. Заїка. Харків: Око, 2006. 407 с.
27. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
28. Яхно О.М., Узунов О.В., Луговський О.Ф. та ін. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 711 с.
29. Чисельні методи. Чисельне інтегрування функцій : навчальний посібник / Л. В. Крилик, І. В. Богач, А. І. Лісовенко. Вінниця : ВНТУ, 2019. 74 с.
30. Охорона праці у сільському господарстві. – ТОВ «ТЕХ МЕДІА ГРУП», 2019 р. URL: https://techmedia.com.ua/sites/default/files/online_version/ECO_SX/files/assets/basic-html/toc.html.
31. Войналович О. В. Охорона праці у сільському господарстві: навч. підруч. Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 690 с.