

УДК 631.308.8

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.97-111>

С.П. Степаненко, ст. наук. співр., д-р техн. наук, **А.Я. Кузьмич**, ст. досл., канд. техн. наук, **В.О. Швидя**, ст. досл., канд. техн. наук, **В.А. Мельник**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, с. Глеваха, Україна

e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

В.В. Тіманов, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

e-mail: volodymyr.timanov@pdau.edu.ua

Теоретичне обґрунтування поділу зернового матеріалу на конічному решеті

У статті представлено теоретичне обґрунтування поділу зернового матеріалу на конічному решеті за допомогою вібровідцентрового сепаратора. Проаналізовано сучасні підходи до пневмовідцентрової сепарації та визначено її ключові недоліки. Запропоновано нову конструкцію сепаратора з конічною формою робочої поверхні, яка дозволяє розділяти зерновий ворох на фракції за принципом різної швидкості витання. Розглянуто модель руху частинки по конічній поверхні, визначено сили, що на неї діють, та отримано диференціальні рівняння руху. На основі цих рівнянь встановлено критерій для переміщення частинок вгору по твірній конуса. Визначено три зони сепарації, що дозволяє відокремлювати важкі, основні та дрібні фракції. Отримані результати можуть бути використані для розробки та вдосконалення високопродуктивних сепараторів.

сепарація, частинка, потік, динаміка руху, поле швидкостей, конічне решето, вібровідцентровий сепаратор

Постановка проблеми. Сучасні технології післязбиральної обробки зерна вимагають постійного вдосконалення, особливо у сфері сепарації [1, 13]. Існуючі пневмосепаратори, як правило, ефективно відокремлюють лише легкі домішки, тоді як для подальшого розділення зернової маси на чисте зерно та важкі домішки застосовуються виключно решітні машини [2, 14, 15]. Це створює потребу в комбінованих пристроях, здатних ефективно виконувати обидва завдання. Однак, розробка таких машин стикається з труднощами, пов'язаними зі створенням стабільного повітряного потоку та неоднорідністю самого зернового матеріалу. Таким чином, актуальною проблемою є теоретичне обґрунтування та розробка нової конструкції сепаратора, яка поєднувала б переваги пневматичної та решітної сепарації, забезпечуючи при цьому високу якість очищення та продуктивність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначають автори [1], у сучасному аграрному секторі пневмовідцентрова сепарація є однією з ключових технологій для сортування зерна та насіння. Аналіз [1] показує, що ці пристрої ефективно розділяють матеріали за густиною та аеродинамічними властивостями, використовуючи повітряний потік для комбінованого очищення та видалення легких домішок.

Сепаратори відцентрового принципу дії [1] відрізняються вдосконаленою конструкцією, що забезпечує рівномірний розподіл матеріалу та компактність виробництва. Основними перевагами є висока продуктивність та низьке енергоспоживання, що робить їх актуальними та перспективними для подальшого розвитку у сільськогосподарській галузі.

Для ефективного аналізу руху насіння по поверхні розкидача пневмовідцентрового сепаратора розроблено систему рівнянь [2], що дозволяє детально моделювати цей процес. Чисельне інтегрування цієї системи дає можливість оцінити продуктивність різних конфігурацій поверхонь, що допомагає у досягненні ефективного розподілу матеріалу по периметру аспіраційного каналу, а також зменшення габаритів обладнання, збільшення його продуктивності та підвищення якості сепарації. Цей метод враховує взаємодію численних факторів, включаючи фізичні властивості матеріалу, геометричні параметри розкидача, технологічні налаштування та кінематичні характеристики руху, що в кінцевому підсумку впливають на траєкторію та швидкість насіння в циліндричних координатах. Таким чином, автори [2] запропонували моделювання процесу поділу матеріалу у відцентровому полі, що є важливим інструментом для обґрунтування оптимальних розмірів ротора та режимів роботи сепаратора.

Автори [3] виконали дослідження інерційно-гравітаційного сепаратора, оснащеного решетою зі щілинами, що розширюються в напрямку руху матеріалу. Встановлено [3], що основні параметри решета суттєво впливають на ефективність сепарації зернових сумішей. Дослідження [3] також виявило закономірності руху зернової суміші по поверхні решета. Це допомагає створити оптимальні умови для проходження частинок необхідного розміру через щілини. Розроблено методику [3] розрахунку ключових геометричних та кінематичних параметрів решета, що дозволить ефективніше проектувати та використовувати такі сепаратори.

Дослідження [4] зосереджені на вирішенні важливих проблем, пов'язаних з підвищенням технологічної ефективності, продуктивності, технічного рівня та енергозбереження у процесах фракціонування сипучої рослинної сировини. Робота представляє сучасний погляд на теоретичні основи сепарації та калібрування в харчовій промисловості. На основі розробки нових теорій руху сипучої сировини по робочих органах фракціонуючих машин, були отримані математичні закономірності, які дозволяють інтенсифікувати процеси фракціонування шляхом незначних змін у існуючих конструкціях або введення нових елементів. Доведено [4], що зміна режимів вібраційного впливу на більшості розглянутих конструкцій сепараторів та калібрувальних машин дає позитивні результати, поліпшуючи технічні характеристики обладнання.

У роботі [5] проведено теоретичні дослідження процесу розділення насінневих матеріалів, таких як пшениця, кукурудза, соняшник та соя, розроблено відповідні механіко-математичні моделі розділення. Розкрито фізичну сутність та вдосконалено модельні підходи до динамічної взаємодії компонентів насінневого матеріалу з повітряним потоком та робочими органами сепаруючих машин. Експериментальні дослідження [5] підтвердили адекватність розроблених теоретичних моделей та показали відповідність технічного забезпечення розділення насінневих матеріалів оптимальним конструктивним параметрам та кінематичним режимам сепаруючих машин відцентрової дії.

Для підвищення рівномірності завантаження сепаруючої поверхні ротаційного барабана, автори [6] пропонують зменшувати її площу в напрямку переміщення насіння, використовуючи конічну сепаруючу поверхню зі зменшенням радіуса конуса вздовж руху матеріалу. Теоретичні дослідження [6], що розглядали частинку як матеріальну точку на обертовій конічній поверхні, дозволили отримати залежність часу її перебування на решеті від координати (довжини твірної конуса). Графічна інтерпретація цієї залежності підтвердила, що збільшення часу перебування матеріалу на решеті за рахунок конічної поверхні збільшує вихід чистого насіння та сприяє

рівномірному завантаженню решета, що, в свою чергу, підвищує якість вихідного матеріалу.

У науковій праці [7] представлено теоретичний аналіз переміщення частинки зернового матеріалу як у шарі, так і на поверхні під час сепарації зернової суміші за допомогою ступінчасто-конічного решета у вібропневмовідцентровому сепараторі. Показано, що ефективність процесу розділення зерна на вібровідцентровому решеті безпосередньо залежить від двох ключових факторів: інтенсивності переміщення дрібних частинок крізь товщу зернового шару до поверхні решета (з подальшим просіюванням) та швидкості пересування самого шару вздовж твірної конічної поверхні.

Проведені дослідження [8] дозволили обґрунтувати оптимальні конструкційні та технологічні параметри пневмовідцентрового сепаратора. Автор [8] встановив діаметр аспіраційного каналу та розкидного робочого органа, кути нахилу та форму поверхні лопатки, кутову швидкість обертання розкидного робочого органа, а також раціональну подачу зернової суміші в аспіраційний канал. Детально проаналізовано умови введення зернової суміші у висхідний повітряний потік відцентрових сепараторів.

У роботі [9] вирішено важливу науково-технічну проблему – підвищення продуктивності віброрешітного просіювання зернових сумішей під час їх післязбиральної обробки. Запропоновано нову концепцію інтенсифікації процесів просіювання на віброрешетах. Вона базується на гідродинамічній аналогії руху зернових сумішей з динамікою бульбашкового псевдозрідженого середовища та використанні спеціальних активаторів.

Розроблено математичні моделі динамічних процесів [9] для плоских і циліндричних віброрешіт. Ці моделі, побудовані за модульним принципом, враховують параметри отворів, характеристики активаторів та властивості самих зернових сумішей. Створені решета з епіциклоїдними та об'ємними активаторами пройшли успішну виробничу апробацію, були впроваджені в серійне виробництво та використовуються для комплектації вібраційних зернових сепараторів. Завдяки цим розробкам продуктивність вібраційних сепараторів зросла на 23,8 – 95%.

У представленому матеріалі [10] висвітлено сучасні механізовані процеси та технологічне обладнання, що використовуються для переробки зерна, харчових продуктів і комбікормів. Детально описано нові технологічні схеми для млинів, крупорушок, а також комплектне обладнання для виробництва олії та комбікормів безпосередньо на місці отримання сировини. Особлива увага [10] приділена розгляду машин та обладнання, згрупованих за їхнім функціональним призначенням у технологічній схемі переробки. Зокрема, подано детальний опис функціональних схем, розкрито сутність робочих процесів та наведено характеристики машин, призначених для підготовки зерна й насіння олійних культур перед переробкою, а також для виконання основних технологічних операцій. Запропоновані нормативи та прийоми розроблені на основі досвіду промисловості та останніх досягнень науки і техніки.

У науковій праці [11] представлено результати теоретичного аналізу методів підвищення ефективності роботи плоских коливальних решіт. Встановлено, що ключем до покращення сепарації є інтенсифікація процесів взаємного переміщення (сегрегації) частинок усередині шару матеріалу, як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Висловлено припущення [11], що найбільш ефективною є активізація внутрішньосхарових процесів, яке досягається двома шляхами: через встановлення оптимального кінематичного режиму коливань та за рахунок конструкційних параметрів самого решета. У роботі [11] представлено нове запатентоване технічне рішення – решето із зигзагоподібним розташуванням отворів.

У науковій праці [12] представлено результати експериментальних досліджень енергоємності оригінального відцентрового прямоточного повітряно-решітного очисника зернового вороху. Основою цього очисника є багатофункціональний лопатевий ротор. У попередніх роботах [11] були встановлені основні закономірності зміни енергетики сепаратора в режимі холостого ходу. Проведена нова серія експериментальних досліджень [12–16, 21–27] дозволила отримати залежності повної потужності на привід лопатевого ротора, а також потужності, що витрачається на розгін та переміщення зерна по решету, від основних конструктивних і технологічних параметрів даного відцентрового прямоточного сепаратора зерна.

Постановка завдання. На основі виявлених недоліків існуючих підходів та аналізу попередніх досліджень, метою цієї роботи є теоретичне обґрунтування та розробка математичної моделі руху частинки зернового матеріалу на конічному решеті вібровідцентрового сепаратора. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати фізичні процеси, що відбуваються під час розділення зернового матеріалу на конічній робочій поверхні.
2. Розробити математичну модель руху частинки в полі дії відцентрової сили, сили тертя, гравітації та опору повітряного потоку.
3. Вивести диференціальні рівняння руху частинки по твірній конічної поверхні.
4. Визначити критерій для ефективного розділення зернової суміші на фракції.
5. Провести аналіз отриманих рівнянь та встановити взаємозв'язок між конструкційними, кінематичними та технологічними параметрами сепаратора.

Матеріали і методи. Для теоретичного обґрунтування поділу зернового матеріалу на конічному решеті були використані методи класичної механіки, зокрема, основи динаміки матеріальної точки. Рух частинки розглядається як рух матеріальної точки по шорсткій конічній поверхні. Для розробки математичної моделі були застосовані принципи аналітичної механіки, що включають побудову рівнянь руху в системі координат, пов'язаній з конічною поверхнею. Використано методи векторної алгебри для розкладання діючих сил на осі координат. Аналітичні вирази, що описують сили опору повітряного потоку, відцентрову силу, силу тертя та силу тяжіння, базуються на відомих фізичних законах. Для спрощення та узагальнення моделі були прийняті певні допущення щодо форми частинок та характеру їх руху. Також був використаний метод аналізу наукових публікацій для огляду та систематизації існуючих знань з пневматичної та відцентрової сепарації, що дозволило визначити актуальність дослідження.

Виклад основного матеріалу. Розділення зернового вороху за допомогою пневматичних пристроїв – це актуальна проблема. Однак, існують труднощі зі створенням стабільного повітряного потоку та неоднорідністю самого зернового матеріалу. Тому вдосконалення наявних машин та розробка нових вимагають глибокого опрацювання теоретичних аспектів процесу поділу зернового вороху на фракції.

Сучасні системи пневмосепарації розраховані лише на відокремлення легких домішок. Подальше розділення зернової маси на чисте зерно та важкі домішки відбувається виключно на решетах. У зв'язку з цим, виникає потреба у створенні (модернізації) машин, здатних розділяти зерновий ворох лише за допомогою повітряного потоку (пневмосепараторів).

На Рисунок 1 представлено схему сил, що впливають на матеріальну точку у вертикальному каналі. На цю точку діють сила тяжіння та сила опору повітряного потоку. Сила опору повітряному потоку $F_{\text{пов}}$ визначається як [17–20]

$$F_{\text{пов}} = \xi(Re) \frac{\rho_n}{2} S_m (V_n)^2,$$

де ρ_n, V_n – густина та швидкість повітря;

S_m – площа міделевого перетину;

$\xi(Re)$ – коефіцієнт аеродинамічного опору, який є функцією числа Рейнольдса.

Коли сила опору повітряному потоку дорівнює силі тяжіння, спостерігається рівновага сил, тобто матеріальна точка зависає на одному місці. Цю швидкість повітряного потоку називають швидкістю витання (V_B). Якщо точка має умовно велику масу, то сила тяжіння перевищує $F_{\text{пов}}$, і вона опускається вниз. Якщо ж точка має умовно меншу масу, то вона прямує вгору і відділяється від основного вороху. На цьому принципі розділення зернового вороху ґрунтується проектування більшості пневмосепараторів.

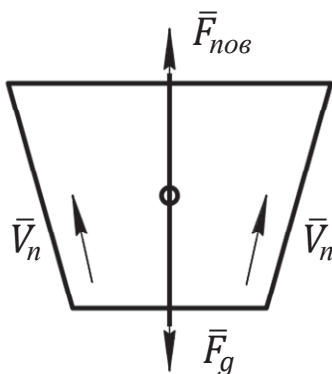


Рисунок 1 – Розподіл сил, що впливають на частинку у висхідному повітряному потоці
Джерело: розроблено авторами

Однак, у такого підходу є один недолік – можливо відокремити лише дрібні та легкі домішки, тоді як основну культуру від важких домішок відділити неможливо. Тому, щоб забезпечити можливість розділення зернового вороху на фракції, запропонуємо нову конструкцію вібровідцентрового сепаратора з конічною формою робочої поверхні.

Робоча поверхня сепаратора є внутрішньою поверхнею конуса, усіченого двома площинами та орієнтованого вершиною вниз.

Сортування зернового матеріалу відбувається внаслідок відмінностей в індивідуальних характеристиках зерен, зокрема, у так званій швидкості витання. Це призводить до різниці в характері взаємодії зерна з повітряним середовищем та робочою поверхнею і, зрештою, до відмінностей у величині та напрямку швидкості руху зерна, що дозволяє розділяти вихідний матеріал на фракції.

Розглянемо дію сил у площині (рис. 2). Для того, щоб частинка рухалася вгору по твірній конуса, необхідно дотриматися наступної умови [21–25]:

$$F_{\text{пов}} \sin \alpha + F_{\text{від}} \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \geq mgf \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + F_T \sin \alpha \quad (2)$$

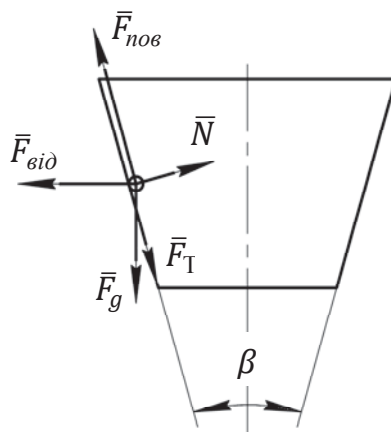


Рисунок 2 – Схема сил, що впливають на матеріальну точку в сепараторі з конічним решетом
Джерело: розроблено авторами

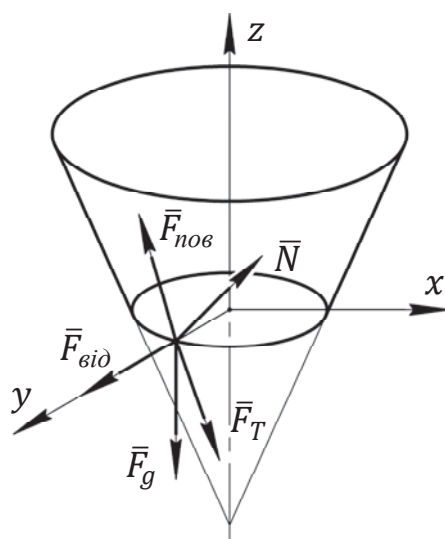


Рисунок 3 – Модель руху матеріальної частинки по конічній поверхні решета
Джерело: розроблено авторами

Аналіз виразу (2) дає змогу зробити висновок, що для руху частинки вгору та формування відцентрової сили необхідно подавати повітря дотично до конічної поверхні під певним кутом (α) до горизонту. Це забезпечить створення гвинтового руху повітряного потоку. Саме така умова дозволить розділяти зерновий матеріал на фракції.

Розглянемо рух частинки на конічній поверхні. Розглянемо відносний рух матеріальної частинки по шорсткій конічній поверхні, як наведено на рис. 3. На дану частинку діють такі сили [26, 27]:

- сила тяжіння $F_g = mg$ (m – маса частинки, g – прискорення вільного падіння);
- нормальна реакція N ;
- сила тертя F_T ;
- сила опору повітря $F_{\text{пов}};$
- відцентрова сила $F_{\text{від}}.$

Розкладемо діючі сили на площини OX, OY, OZ згідно (рис. 3):

З аналізу залежностей (3) стає зрозуміло, що основними факторами, які впливають на функціонування сепаратора, є:

$$\begin{cases} OX: F_{\text{пов}} \cos \alpha - F_T \cos \alpha = 0 \\ OY: F_{\text{від}} + F_{\text{пов}} \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) - N \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) - F_T \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) = 0 \\ OZ: F_{\text{пов}} \sin \alpha - F_T \sin \alpha - N \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) - F_g = 0 \end{cases} \quad (3)$$

де α – кут подачі повітряного потоку відносно горизонтальної площини;

β – кут розхилу конуса;

$F_{\text{від}}$ – відцентрова сила;

$F_{\text{пов}}$ – сила повітряного потоку.

Розгорнутий вигляд рівняння (3) з урахуванням відповідних сил має вигляд:

$$F_{\text{пов}} = \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \quad (4)$$

$$m_v = \pi \rho_v \frac{(d_v)^2}{6} \quad (5)$$

$$F_{\text{від}} = m_v (\omega)^2 r = \pi (\omega)^2 r \rho_v \frac{(d_v)^2}{6} = \frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \quad (6)$$

$$F_{\text{від}} = Nf \quad (7)$$

Відповідно до даних, представлених на рис. 3, опорна реакція N може бути визначена як:

$$N = F_{\text{від}} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + mg \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (8)$$

Звідки

$$\begin{cases} OX: \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \cos \alpha - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) f \cos \alpha = 0 \\ OY: \frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} + \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) - \\ - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) f \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) = 0 \\ OZ: \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \sin \alpha - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) f \sin \alpha - \\ - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) - \pi \rho_v \frac{(d_v)^2}{6} g = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Рівняння, представлене вздовж осі OZ, встановлює умову для переміщення насінневої маси вгору по твірній конуса

$$\pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \sin \alpha - \left(\frac{\pi \rho_v (d_v)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right) f \sin \alpha -$$

$$-\left(\frac{\pi\rho_v(d_v)^3(V_v)^2}{6r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+\pi\rho_v\frac{(d_v)^3}{6}g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)-\pi\rho_v\frac{(d_v)^3}{6}g=0. \quad (10)$$

Таким чином, критерієм для переміщення насінневої маси є

$$\pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_v)^2}{8} \sin \alpha = \left(\frac{\pi\rho_v(d_v)^3(V_v)^2}{6r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+\pi\rho_v\frac{(d_v)^3}{6}g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) f \sin \alpha + \left(\frac{\pi\rho_v(d_v)^3(V_v)^2}{6r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+\pi\rho_v\frac{(d_v)^3}{6}g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + \pi\rho_v\frac{(d_v)^3}{6}g \quad (11)$$

Наступним кроком є розрахунок необхідної швидкості повітряної маси

$$(V_n)^2 = \frac{\frac{\pi\rho_v(d_v)^3}{6}\left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)-g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] f \sin \alpha - \left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) - g}{\pi k_V \rho_n \frac{(d_v)^2}{8} \sin \alpha} \quad (12)$$

Проведемо спрощення виразу (12)

$$(V_n)^2 = 0,8 d_v^2 \rho_v \frac{\left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)-g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] f \sin \alpha - \left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) - g}{k_V \rho_n \sin \alpha} \quad (13)$$

Таким чином, рух матеріальної точки визначається за формулою

$$V_n = 0,9 d_v \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_n} \frac{\left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)-g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] f \sin \alpha - \left[\frac{(V_v)^2}{r}\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)+g\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) - g}{k_V \rho_n \sin \alpha}} \quad (14)$$

З дослідження залежності (14) випливає, що головними параметрами, які формують значення критичної швидкості витання, є приведений діаметр окремої частинки (d_v) та щільність насінневого матеріалу ρ_v . При цьому кут нахилу вектора швидкості повітряного потоку (α) коефіцієнт вітрильності частки k_V , демонструє зворотний пропорційний вплив на його силу.

Середній діаметр зернини можна обчислити за формулою [5–7]

$$d_v = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (15)$$

де a – довжина зернини, мм;

b – товщина зернини, мм;

c – ширина зернини, мм.

Враховуючи дані з джерел [3–5],

$$V \cdot r = const \quad (16)$$

можна визначити зони поділу зернової маси (рис. 4).

Отже, в загальному випадку робоча конічна поверхня може мати три зони (рис. 4).

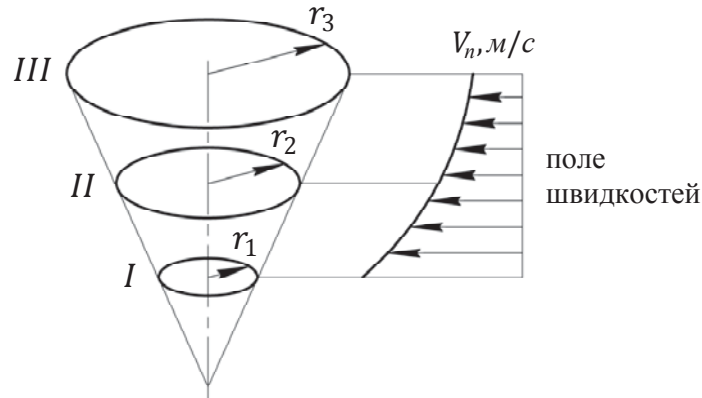


Рисунок 4 – Характеристики полів швидкостей та області сепарації фракцій зернової суміші
Джерело: розроблено авторами

У Зоні I розташовуються важкі частинки, і вони можуть лише ковзати вниз у напрямку до вершини конуса. У Зоні II знаходиться основна фракція, що здійснює поворотно-поступальний та обертальний рухи. У Зоні III зосереджені дрібні та пилоподібні частинки.

Наявність та розміри цих зон визначаються нерівністю (14) та залежать від геометричних параметрів конуса і динамічних параметрів повітряного середовища (α, V_n, f).

Слід також враховувати, що конкретний кінематичний стан частинки, спричинений додатковими зовнішніми чинниками, в певний момент часу, природно змінює описаний характер руху: окрім радіальної, може з'явитися бічна складова руху, а напрямок руху частинки в початковий момент визначатиметься не умовами (9), а початковою швидкістю.

Для організації процесу сепарації необхідно реалізувати такий режим руху, за якого частинка, потрапляючи на робочу поверхню, монотонно віддаляється від осі обертання, досягаючи за кінцевий час краю поверхні.

Визначимо диференціальні рівняння руху частинки по конічній поверхні під дією повітря:

$$\left\{ \begin{array}{l} OX: \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_p)^2}{8} \cos \alpha - \left(\frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \\ \left. + \pi \rho_v \frac{(d_p)^2}{6} g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \cos \alpha = ma \\ OY: \frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} + \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_p)^2}{8} \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \left(\frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \\ \left. + \pi \rho_v \frac{(d_p)^2}{6} g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \\ - \left(\frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right) f \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) = ma \\ OZ: \pi k_V \rho_n (V_n)^2 \frac{(d_p)^2}{8} \sin \alpha - \left(\frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right) f \sin \alpha + \\ + \left(\frac{\pi \rho_v (d_p)^2 (V_v)^2}{6r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right) \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \pi \rho_v \frac{(d_p)^2}{6} g = ma \end{array} \right. \quad (17)$$

Здійсимо поділ виразу (17) на $\frac{\pi \rho_V (d_V)^2}{6}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} OX: k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \cos \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \\ \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \cos \alpha = a \\ OY: \frac{(V_V)^2}{r} + k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \\ \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \\ - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \\ \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) = a \\ OZ: k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \right. \\ \left. - g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \sin \alpha + \\ + \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \right. \\ \left. - g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - g = a \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = V_{0x} + \left[k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \cos \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \cos \alpha \right] t + C_1; \\ V_y = V_{0y} + \left[\frac{(V_V)^2}{r} + k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left[\cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + f \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \right] t + C_2; \quad (1) \\ V_z = V_{0z} + \left[k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left[f \sin \alpha + \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] - g \right] t + C_3 \end{array} \right.$$

9)

У результаті інтегрування матимемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = V_{0x} dt + \left[k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \cos \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) f \cos \alpha \right] t dt + C_4; \\ \frac{dy}{dt} = V_{0y} dt + \left[\frac{(V_V)^2}{r} + k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left[\cos \left(\frac{\beta}{2} \right) + f \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \right] t dt + C_5; \quad (20) \\ \frac{dz}{dt} = V_{0z} dt + \left[k_V \frac{\rho_N (V_N)^2}{\rho_V 48 d_V} \sin \alpha - \left(\frac{(V_V)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - g \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left[f \sin \alpha + \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] - g \right] t dt + C_6 \end{array} \right.$$

Сталі інтегрування C_4, C_5, C_6 за умов $t = 0$ та $x = 0$ дорівнюють нулю ($C_4 = 0, C_5 = 0, C_6 = 0$). Отже, закон руху матеріальної точки набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned}
 x &= V_{0x}t + k_V \frac{\rho_n (V_n)^2}{\rho_V 96d_V} \cos \alpha (t)^2 - \frac{(V_n)^2}{2r} f \cos \alpha \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) (t)^2 - 0,5g \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) f \cos \alpha (t)^2; \\
 y &= V_{0y}t + \frac{(V_n)^2}{2r} (t)^2 + k_V \frac{\rho_n (V_n)^2}{\rho_V 96d_V} \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) (t)^2 - \left(\frac{(V_n)^2}{r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + \right. \\
 &\quad \left. + g \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \left[\cos \left(\frac{\beta}{2}\right) + f \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) \right] (t)^2; \\
 z &= V_{0z}t + k_V \frac{\rho_n (V_n)^2}{\rho_V 48d_V} \sin \alpha (t)^2 - \left(\frac{(V_n)^2}{2r} \cos \left(\frac{\beta}{2}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - 0,5g \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \left[f \sin \alpha + \sin \left(\frac{\beta}{2}\right) \right] (t)^2 - 0,5g(t)^2;
 \end{aligned} \quad (21)$$

Отримано рівняння руху частинки по конічному робочому органу. Їх розв'язання дає змогу визначити відносні траєкторії руху частинок з різною парусністю, залежно від кінематичних параметрів.

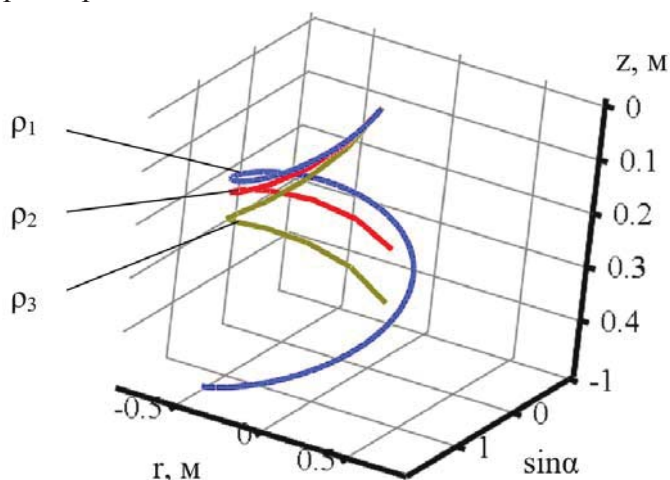


Рисунок 5 – Динаміка руху частинок у пневмовідцентровому сепараторі в залежності від густини частинок

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Встановлено, що існуючі пневмосепаратори мають обмеження щодо розділення зерна від важких домішок, що робить актуальним вдосконалення їх конструкції. Запропонована нова конструкція вібровідцентрового сепаратора з конічною робочою поверхнею, яка дозволяє ефективно розділяти зернову суміш на фракції. На основі розробленої математичної моделі руху частинки по конічній поверхні отримано диференціальні рівняння, що описують траєкторію та швидкість руху. Визначено, що основними факторами, які впливають на процес сепарації, є кут розхилу конуса, кут подачі повітряного потоку, відцентрова сила, сила опору повітря та фізичні властивості зерен. Встановлено критерій для переміщення частинки вгору по твірній конуса. Аналіз отриманих залежностей дозволив ідентифікувати три зони сепарації, що підтверджує ефективність запропонованого підходу. Отримані результати є основою для подальших експериментальних досліджень та розробки практичних рекомендацій щодо проектування високопродуктивних зернових сепараторів.

Список літератури

1. Дослідження розвитку технологій та технічних засобів для пневмовідцентрового розділення зернових матеріалів / В. Мельник та ін. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання*. 2024. Т. 24, № 1. С. 75–88. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5>.
2. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора / С. П. Степаненко та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2024. Т. 14, № 1. С. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>.
3. Теоретичні аспекти розділення зерна на решеті інерційно-гравітаційного сепаратора / П. Лузан та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2021. Т. 51. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103>.
4. Фалько, О. Л. Наукове обґрунтування процесу фракціонування рослинної сировини : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.18.05 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» / Фалько Олександр Леонідович ; НУХТ. Київ, 2014. 48 с.
5. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Кропивницький, 2024. 48 с..
6. Спірін А. В., Твердохліб І. В., Замрій М. А. Визначення режиму функціонування відцентрово-гравітаційного сепаратора теркового пристрою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. Т. 102, № 3. С. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-3-7>.
7. Теоретичні аспекти сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решеті вібровідцентрових машин / Б. І. Котов та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. Т. 83, № 3. С. 175–180.
8. Швидя В. О. Підвищення ефективності пневмовідцентрового сепаратора та обґрунтування параметрів робочих органів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2012. 18 с.
9. Харченко С. О. Концепція інтенсифікації процесів віборешітного просіювання зернових сумішей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / Харченко Сергій Олександрович ; Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. Петра Василенка. Харків, 2018. 38 с.
10. Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна / А. Кобець та ін. Дніпропетровськ : ДДАУ, 2013. 776 с.
11. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розташуванням отворів / І. Бажан та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2024. Т. 54. С. 192–202. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>.
12. Експериментальні дослідження енергоємності роботи відцентрового прямоточного сепаратора зерна / О. Васильковський та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2019. Т. 49. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.67-74>.
13. Котов Б. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження). Київ ; Ніжин : Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва", 2017. 551 с.
14. Сало В. М., та ін. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
15. Котов Б., Степаненко С. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ : ЦП Компринт, 2023. 427 с.
16. Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator / S. Stepanenko et al. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2024. P. 1143–1149. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236>.
17. Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator / S. Stepanenko et al. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2024. Vol. 100, no. 8. P. 160–163. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33>.
18. Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device / M. Aneliak et al. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 71, no. 3. P. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>.

19. The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig / H. Kaletnik et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, no. 3. P. 232–237. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>.
20. Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material / S. Stepanenko et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 383–393. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>.
21. Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field / S. Stepanenko et al. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2025. P. 1091–1096. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>.
22. Котов Б., Степаненко С., Калініченко Р. Теоретичне дослідження поділу насінневого матеріалу за густиною зернівок конічною вібропневмоцентрифугою. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2022. Т. 52. С. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.55-65>.
23. Modeling the process of grain separation by density in a combined vibro-pneumatic and airgravity unit / B. I. Kotov et al. *All-Ukrainian Scientific and Technical Journal "Vibrations in Engineering and Technologies"*. 2022. Vol. 3, no. 106. P. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-3>.
24. Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition / B. Kotov et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 1. P. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>.
25. Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply / B. Kotov et al. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*. 2023. Vol. 27. P. 101–107. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>.
26. Визначення характеристик руху зерна за наявності сил сухого тертя й опору середовища / Котов Б. І. та ін. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник*. 2022. Т. 15, № 114. С. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9>.
27. Котов Б., Степаненко С., Попадюк І. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. Т. 113, № 14. С. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>.

References

1. Melnyk, V., Popadiuk, I., Volyk, D., & S.P., S. (2024). Research on the development of technologies and technical means for pneumatic centrifugal separation of grain materials. *Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University: Scientific Professional Edition*, 24(1), 75–88. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5>
2. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., Melnyk, V. A., & Volyk, D. A. (2024). Modeling the process of grain material movement in the working zone of the separator. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University: Electronic Scientific Professional Edition*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>
3. Luzan, P., Kisilyov, R., Luzan, O., & Kislun, O. (2021). Theoretical aspects of grain separation on the sieve of an inertial-gravity separator. *Design, production and operation of agricultural machines*, 51. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103>
4. Falko, O. L. (2014). Scientific Substantiation of the Process of Fractionation of Plant Raw Materials [Abstract of the Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences]. Kyiv.
5. Bredykhin, V. (2023). Scientific foundations of the processes of vibropneumatic separation of seed materials by seed density [Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. Kropyvnytskyi.
6. Spirin, A. V., Tverdokhlib, I. V., & Zamriy, M. A. (2021). Determination of the operating mode of a centrifugal-gravity separator of a grating device. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 102(3), 64–70. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-3-7>
7. Kotov, B. I., Derevenko, I. A., Stepanenko, S. P., & Popadiuk, I. M. (2016). Theoretical aspects of separation of grain materials on a stepped-conical sieve of vibrocentrifugal machines. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 83(3), 175–180.
8. Shvydya, V. O. (2012). Increasing the efficiency of a pneumatic centrifugal separator and substantiating the parameters of working elements [dissertation abstract]. National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture".
9. Kharchenko, S. O. (2018). Concept of intensification of processes of vibrating sieve screening of grain mixtures [Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. Kharkiv.

10. Kobets, A., Chursinov, Yu., Chernykh, S., Sabadash, M., Grekova, N., & Kanunnikov, V. (2013). *Machines and equipment for storage and complex processing of grain*. DDAU.
11. Bazhan, I., Vasylykovsky, O., Leshchenko, S., & Amosov, V. (2024). Intensification of the grain separation process on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes. *Design, production and operation of agricultural machines*, 54, 192–202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>
12. Vasylykovsky, O., Leshchenko, S., Moroz, S., & Petrenko, D. (2019). Experimental studies of the energy intensity of the operation of a centrifugal direct-flow grain separator. *Design, production and operation of agricultural machines*, 49, 67–74. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.67-74>
13. Kotov, B. (2017). Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling). National Acad. of Agrarian Sciences of Ukraine, National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agricultural Farms".
14. Salo, V. M., & et al. (2014). Development of a new design of a pneumatic sieve grain cleaning machine. Volume 1. Justification of the parameters of the conveyor-separator. Lysenko V.F.
15. Kotov, B., & Stepanenko, S. (2023). Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials. CP Komprint.
16. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Demchuk, I., Melnyk, V., & Volyk, D. (2024). Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator. *У ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings* (с. 1143–1149). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236>
17. Stepanenko, S., Lukach, V., Demchuk, I., Kuzmych, A., Kalinichenko, R., Gerasymenko, V., & Vasylyuk, V. (2024). Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 100(8), 160–163. <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33>
18. Aneliak, M., Kuzmych, A., Stepanenko, S., & Lysaniuk, V. (2023). Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 71(3), 83–92. <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>
19. Kaletnik, H., Solona, O., Kotov, B., Stepanenko, S., Shvidia, V., Kalinichenko, R., Tverdokhlib, I., & Polievoda, Y. (2024). The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(3), 232–237. <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>
20. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Aneliak, M., Volyk, D., Melnyk, V., & Kalinichenko, R. (2025). Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*, 26(2), 383–393. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>
21. Stepanenko, S., Volyk, D., Kuzmych, A., & Melnyk, V. (2025). Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. *У Engineering for Rural Development. Proceedings* (с. 1091–1096). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>
22. Котов, Б., Степаненко, С., & Калініченко, Р. (2022). Теоретичне дослідження поділу насіннєвого матеріалу за густиною зернівок конічною вібропневмоцентрифугою. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 52, 55–65. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.55-65>
23. Kotov, B. I., Grushetskyi, S. M., Stepanenko, S. P., & Hryshchenko, V. O. (2022). Modeling the process of grain separation by density in a combined vibro-pneumatic and airgravity unit. *All-Ukrainian Scientific and Technical Journal "Vibrations in Engineering and Technologies"*, 3(106), 22–28. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-3-3>
24. Kotov, B., Stepanenko, S., Tsurkan, O., Hryshchenko, V., Pantsyr, Y., Garasymchuk, I., Spirin, A., & Kupchuk, I. (2023). Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 100–104. <https://doi.org/10.15199/48.2023.01.19>
25. Kotov, B., Kalinichenko, R., Pantsyr, Y., & Stepanenko, S. (2023). Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 27, 101–107. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>
26. Kotov, B., Stepanenko, S., Kalinichenko, R., Rud, A., & Hrushetsky, S. (2022). Determination of grain motion characteristics in the presence of dry friction forces and medium resistance. *Mechanization and electrification of agriculture: national collection*, 15(114), 81–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9>

27. Kotov, B., Stepanenko, S., & Popadiuk, I. (2021). Investigation of the process of pneumovibrational separation of grain by density during one-dimensional movement of the grain flow. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 113(14), 77–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>

Serhii Stepanenko, Senior Researcher, DSc., **Alvian Kuzmych**, Senior Researcher, PhD tech. Sci., **Viktor Shvydya**, Senior Researcher, PhD tech. Sci., **Vitaly Melnyk**, PhD student

Institute of Mechanics and Automatics of Agroindustrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha township, Kyiv region, Ukraine

Volodymyr Timanov, PhD student

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Theoretical Justification for the Separation of Grain Material on a Conical Sieve

The purpose of this article is to provide a theoretical justification and scientific basis for the development of a new type of vibro-centrifugal separator with a conical sieve. The study aims to overcome the limitations of existing pneumatic separators and to combine the advantages of pneumatic and sieve separation methods in order to improve the efficiency and quality of grain cleaning during post-harvest processing.

The article considers theoretical aspects of improving post-harvest grain processing through the application of combined separation methods. The current state of pneumatic separators is analyzed, which mainly ensure the removal of light impurities, whereas for extracting heavy fractions and subsequent cleaning, sieve machines are required. Such an approach necessitates additional equipment, complicates technological schemes, and reduces the overall efficiency of production. Therefore, a scientific task is formulated to design a fundamentally new type of separator that combines the advantages of both methods, providing effective division of grain mass into fractions according to their physical and mechanical properties.

A design of a vibro-centrifugal separator with a conical working surface is proposed, which enables the division of grain mixtures based on differences in particle terminal velocity. A mathematical model of particle motion on the conical sieve is developed, taking into account the action of centrifugal force, air drag, gravity, and the angle of air flow supply. Based on the derived motion equations, the conditions for particle displacement along the cone generatrix are determined, which allowed the formulation of a criterion for assigning particles to different fractions. The developed theoretical model provides a more accurate prediction of the separation process by considering both the structural parameters of the equipment and the physical properties of the grain.

As a result of the study, three main separation zones were identified: for heavy, main, and fine fractions, which confirms the effectiveness of the proposed separator design. The obtained results demonstrate the prospects of using a conical sieve in vibro-centrifugal machines and can serve as a foundation for further experimental research. The practical significance of this work lies in the creation of a scientifically grounded basis for developing high-performance separators of a new generation, capable of improving the quality of post-harvest grain cleaning and optimizing technological processes in agricultural production.

separation, particle, flow, motion dynamics, velocity field, conical sieve, vibrocentrifugal separator

Одержано (Received) 24.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 23.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025