

С. П. Степаненко¹, ст. наук. співр., д-р техн. наук, Б. І. Котов², проф., д-р техн. наук, А. Я. Кузьмич¹, ст. досл., канд. техн. наук., В. А. Мельник¹, Р. Б. Кудринський¹, ст. досл., канд. техн. наук., І. С. Попадюк¹, мол. наук. співр.

¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна

²Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Дослідження процесу сепарації зерна на конічній перфорованій поверхні

У статті представлено теоретичне дослідження процесу сепарації зернового матеріалу на конічній перфорованій поверхні вібровідцентрового сепаратора. Проаналізовано сучасні підходи до пневмодіцентрової та вібровідцентрової сепарації, виділено основні фактори, що впливають на ефективність поділу зернових сумішей. Розроблено математичну модель руху частинки по обертовій конічній поверхні, враховано дії відцентрових, гравітаційних та сил тертя і отримано відповідні диференціальні рівняння руху. На основі цих рівнянь визначено граничну швидкість проходження частинок через отвори та залежність довжини робочої поверхні конуса від геометричних і кінематичних параметрів. Результати досліджень можуть бути використані для проектування високопродуктивних сепараторів з оптимізованими робочими органами.

насіннєвий матеріал, гранична швидкість, конічне решето, вібровідцентровий сепаратор, сепарація зернових сумішей, розділення, траєкторія руху частинки, повітряний потік, оптимізація параметрів, вібрація

Постановка проблеми. Сучасне зерноочисне виробництво потребує підвищення ефективності та точності сепарації зернових сумішей, особливо при розділенні матеріалу на фракції за розмірами, масою та аеродинамічними властивостями [1, 3, 5]. Існуючі відцентрові та пневмодіцентрові сепаратори здатні ефективно видаляти легкі домішки, проте вони не завжди забезпечують рівномірне та точне поділення зернової маси на основні та дрібні фракції. Для цього переважно використовуються решітні машини [2, 4, 6], що створює низку проблем: обмежену продуктивність, підвищене енергоспоживання та зростання зносу робочих органів.

Крім того, точність сепарації сильно залежить від геометричних та кінематичних параметрів робочих органів, а саме: кута нахилу поверхні, діаметра отворів, частоти обертання та форми частинок [2, 7, 8]. Неефективний розподіл матеріалу по поверхні сепаратора призводить до нерівномірного проходження зерна через отвори, що знижує якість очищення та продуктивність процесу. Складність полягає у взаємодії численних факторів: маси, форми і розмірів частинок, сил тертя, відцентрових і гравітаційних сил, а також швидкості руху по робочій поверхні [9, 11].

Актуальним є теоретичне обґрунтування умов руху частинок та розробка нової конструкції конічного вібровідцентрового сепаратора, яка забезпечує стабільний контакт матеріалу з робочою поверхнею, контрольоване проходження через сепарувальні отвори та ефективне відокремлення зернових фракцій [3, 10, 12]. Також важливо оптимізувати кінематичні та геометричні параметри робочих органів для зменшення енергетичних витрат та підвищення продуктивності, що є критично важливим для сучасних зерноочисних комплексів [5, 13, 14].

Таким чином, наукова та практична актуальність дослідження полягає у створенні методології, яка поєднує аналітичне моделювання руху частинок із оптимізацією конструктивних параметрів сепаратора, що дозволяє підвищити якість і продуктивність сепарації зернових матеріалів.

Аналіз досліджень та публікацій. У сучасному аграрному машинобудуванні пневмовідцентрові та вібровідцентрові сепараційні системи розглядаються як перспективні рішення для очищення та класифікації зернових сумішей. Згідно з даними [1], застосування відцентрових сил у поєднанні з пневматичними потоками забезпечує ефективне розділення зерна за густиною, розміром і формою, що дозволяє зменшити втрати при післязбиральній обробці. Автори [1, 2] відзначають, що такі системи характеризуються високою продуктивністю, компактністю конструкції та енергоощадністю, що робить їх конкурентоспроможними у порівнянні з традиційними решітними або вібраційними машинами.

У роботах [3, 4] розглянуто аналітичні моделі руху частинок по конічній поверхні під дією гравітаційної та відцентрової сил. Автори вивели рівняння руху у полярних координатах і визначили умови рівноваги та критичні швидкості, за яких частинка проходить крізь отвір. Ці дослідження є основою для побудови математичних моделей процесу сепарації, оскільки вони враховують геометричні параметри конуса, кут нахилу твірної, коефіцієнти тертя та початкові умови руху матеріалу.

У роботі Veunder [5] експериментально досліджено процес відокремлення частинок на внутрішній поверхні обертового конуса. Отримані результати підтвердили, що збільшення кута при вершині сприяє зростанню швидкості руху частинок вздовж твірної, але одночасно зменшує нормальну складову відцентрової сили, що впливає на ефективність проходження частинок у отвори робочої поверхні. Аналогічні висновки наведено у [6], де показано, що оптимальний кут конуса забезпечує баланс між продуктивністю та якістю поділу.

У дослідженнях [7, 8] запропоновано аналітичні вирази для визначення граничної швидкості проходження частинок крізь перфоровану поверхню конуса. Розв'язання отриманих квадратних рівнянь дозволяє встановити залежності між геометричними параметрами конуса, частотою його обертання та діаметром отворів. Як зазначають автори, збільшення частоти обертання понад 1000 хв^{-1} призводить до зростання витрат потужності при незначному підвищенні ефективності, що обмежує доцільність такого режиму роботи.

Використання методів чисельного моделювання процесів сепарації на основі дискретно-елементного підходу (DEM) стало одним із найважливіших напрямів останніх років. Роботи [9 - 11] демонструють можливість точного опису траєкторій руху частинок різної форми та розміру на обертових і вібруючих поверхнях. Застосування моделей DEM/CFD-DEM дозволяє враховувати не лише сили контакту між частинками, а й вплив повітряного потоку, що суттєво підвищує достовірність розрахунків.

Згідно з результатами Su та співавт. [12], поєднання експериментальних даних і DEM-моделювання забезпечує ефективне калібрування параметрів контакту (коефіцієнти тертя, пружності, відновлення), що дозволяє оптимізувати роботу конічних сепараторів і підвищити стабільність процесу. Дослідження [13] підтверджують, що збільшення діаметра отворів сепаруючої поверхні підвищує продуктивність, але може знизити якість очищення через потрапляння більших фракцій до проходової частини.

У роботах Pak та ін. [14] і Ноу та ін. [15] проведено комплексний аналіз енергоефективності пневмовідцентрових систем. Встановлено, що оптимізація

геометрії робочої поверхні та регулювання швидкості обертання дозволяють знизити споживання енергії на 10–15 % при збереженні рівня сепараційної ефективності. Автори зазначають необхідність інтеграції CFD-DEM-підходів для точного моделювання впливу повітряного середовища на рух частинок у реальних умовах.

Таким чином, проведений аналіз джерел [1-15, 17-24] свідчить, що сучасні дослідження спрямовані на поєднання аналітичних моделей, експериментальних методів і чисельних симуляцій для підвищення ефективності процесів відцентрової сепарації. Проте залишаються невирішеними питання стандартизації методик експериментів, калібрування параметрів DEM-моделей і масштабування результатів від лабораторних стендів до промислових установок. Саме ці напрями становлять науковий інтерес для подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є підвищення ефективності процесу сепарації зернових сумішей на конічній перфорованій поверхні шляхом визначення оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів робочого органу вібровідцентрового сепаратора.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробка математичної моделі руху частинок зернової суміші на обертовій конічній поверхні, що враховує вплив гравітаційної та відцентрової сил, сили тертя та геометричні параметри конуса.

2. Визначення умов проходження частинок через отвори перфорованої поверхні, включаючи граничну швидкість переміщення, час контакту частинки з поверхнею та вплив діаметра і форми частинок на ефективність сепарації.

3. Дослідження впливу геометричних параметрів робочого органу - кута при вершині конуса, діаметра отворів, довжини твірної - на продуктивність та якість розділення матеріалу.

4. Аналіз впливу кінематичних параметрів - частоти обертання конуса та кутової швидкості - на енергоспоживання та ефективність сепарації.

5. Побудова графічних та аналітичних залежностей, що дозволяють прогнозувати довжину робочої поверхні та граничну швидкість руху частинок у залежності від параметрів робочого органу та властивостей зернової суміші.

6. Визначення оптимальних режимів роботи конічного сепаратора, які забезпечують максимальну ефективність процесу при мінімальних енергетичних витратах та задовільній якості продукту.

Реалізація цих завдань дозволить створити науково обґрунтовані рекомендації для проектування та вдосконалення робочих органів вібровідцентрових зерноочисних машин, підвищення продуктивності та точності розділення зернових матеріалів за розміром і формою частинок.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесу поділу зернового матеріалу на конічній перфорованій поверхні використовувалися методи класичної механіки та основи динаміки матеріальної точки. Рух частинки розглядався як рух матеріальної точки по обертовій конічній поверхні під дією відцентрових, гравітаційних та сил тертя. Для математичного опису процесу застосовувалися принципи аналітичної механіки та векторної алгебри, що дозволяло розкласти діючі сили на координатні осі та формувати систему диференціальних рівнянь руху частинки.

Аналітичні вирази враховували вплив нормальної реакції поверхні, сили тяжіння, відцентрової сили та сили тертя, а також взаємодію частинки з перфорованими отворами конуса. Для спрощення моделі було прийнято припущення про сферичну форму частинок, постійний коефіцієнт тертя та відсутність взаємодії між частинками під час проходження через отвори.

В експериментальній частині дослідження визначали вплив геометричних параметрів конуса (кут при вершині, діаметр і розташування отворів) та кінематичних характеристик (кутова швидкість і частота обертання) на граничну швидкість проходження частинок та довжину робочої поверхні, необхідну для завершення процесу сепарації. Для розрахунків використовували чисельне інтегрування системи рівнянь у середовищах Mathematica та MathCAD, що дозволяло побудувати залежності між параметрами сепаратора та продуктивністю процесу.

Окрім цього, застосовано метод аналізу наукових публікацій для систематизації сучасних досліджень у сфері пневмовідцентрової та вібровідцентрової сепарації. Це дозволило визначити актуальність теми, порівняти існуючі конструкції сепараторів та обґрунтувати вибір оптимальних геометричних та технологічних параметрів для підвищення ефективності розділення зернових сумішей.

Початковим матеріалом для дослідження є зернова суміш отримана від комбайнового збирання сільськогосподарських культур. Очищення зернових сумішей з відцентровим принципом дії робочих органів та додатковим впливом на матеріал повітряного середовища забезпечує рівномірну структуру частинок, що є важливим для подальшого якісного розподілу матеріалу за фракціями [4, 6].

Для підвищення ефективності використання отриманого зернового матеріалу було розроблено конструкцію пристрою, який забезпечує поділ зернової маси на окремі фракції [3, 7].

З метою теоретичного обґрунтування технологічних режимів роботи та визначення конструктивних параметрів вібровідцентрового сепаратора розглянемо рух окремої частинки вихідного матеріалу масою m по поверхні конуса з перфорацією, що обертається навколо вертикальної осі з постійною кутовою швидкістю ω . Початок системи координат приймемо у вершині конуса (рис. 1). [1, 2].

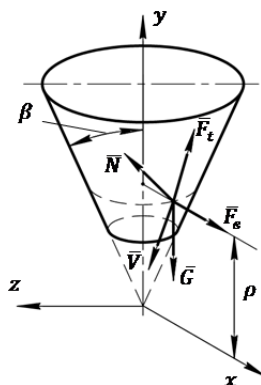


Рисунок 1 - Схема дії сил на частинку, розташовану на обертовій конічній поверхні
Джерело: розроблено авторами

Рівняння конічної поверхні можна подати у вигляді:

$$x^2 + y^2 - y^2 \cdot \tan^2 \beta = 0, \quad (1)$$

де β - половина кута при вершині конуса ($\beta = \text{const}$).

На частинку зернової суміші, що перебуває на обертовій конічній поверхні, діють такі сили:

Сила тяжіння: $G = mg$;

Відцентрова сила:

$$F_B = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \rho \sin \beta$$

де $\frac{d\varphi}{dt}$ - кутова швидкість ковзання частинки по поверхні,

ρ - відстань від вершини конуса до частинки, виміряна вздовж твірної.

Нормальна реакція поверхні конуса:

$$N = \frac{m \sin(\beta) \rho \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - mg \sin(\omega t)}{\cos(\beta)}$$

Сила тертя [5, 8]:

$$F_t = N \cdot f$$

де f - коефіцієнт тертя між частинкою та поверхнею конуса.

При цьому приймається спрощувальне припущення, що коефіцієнт тертя не залежить від швидкості руху частинки і залишається постійною величиною [9].

Рівняння абсолютного руху частинки у векторній формі можна записати як:

$$m\bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_B + \bar{N} + \bar{F}_t$$

де \bar{a} - вектор прискорення частинки в прийнятій системі координат.

Після ряду перетворень, виконаних у роботі [1], система диференціальних рівнянь руху частинки набуває вигляду:

$$\frac{d^2\rho}{dt^2} - \rho \sin^2(\beta) \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{Nf}{mV} \frac{d\rho}{dt} + g \sin(\omega t) \sin(\beta) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \frac{2\rho}{dt} \left(\omega - \frac{d\varphi}{dt} \right) + \frac{Nf\rho}{mV} \frac{d\varphi}{dt} - g \cos(\omega t) = 0 \quad (3)$$

Швидкість руху частинки на робочій поверхні визначається за виразом [1, 11]:

$$V = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt} \right)^2 + \left(\rho \frac{d\varphi}{dt} \sin(\beta) \right)^2} \quad (4)$$

Розв'язання отриманих диференціальних рівнянь дозволяє визначити швидкість руху частинки відносно конічної розділювальної поверхні та шлях, пройдений частинкою вздовж її твірної [12].

Однак для забезпечення гарантованого проходження частинок зернового середовища через отвори необхідно встановити умови сприятливого збігу траєкторії руху частинок із сепарувальними отворами, а також перевірити достатність часу їх проходження крізь розділювальну поверхню [2, 7].

Необхідними умовами виділення прохідних частинок через отвори сепаратора є:

– наявність сили, що діє на частинку у напрямку, перпендикулярному до площини конічної поверхні [2];

– перебування частинки у безпосередньому контакті з поверхнею [13];

– наявність відносного руху частинки вздовж поверхні [9, 21-24].

При цьому швидкість руху частинки зернового середовища відносно конічної поверхні не повинна перевищувати певного граничного значення.

На рис. 2 наведено схему для визначення умови проходження частинки через отвір конічного перфорованого решета. Було прийнято такі припущення: частинка має форму кулі діаметром d^* ; отвори конічної поверхні є круглими з діаметром d ; центр мас частинки розташований над краєм отвору; частинка вважається такою, що пройшла, якщо вона занурилася в отвір на половину свого розміру; нормальна складова швидкості частинки відносно поверхні конуса в момент початку проходження через отвір дорівнює нулю.

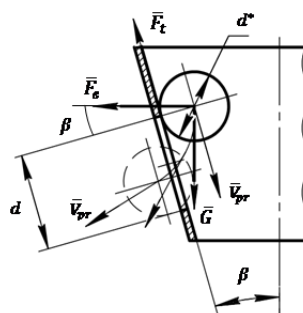


Рисунок 2 - Схема для визначення умови виділення прохідної частинки.

Джерело: розроблено авторами

На частинку діють такі сили:

– нормальна складова відцентрової сили:

$$F_{B,r} = m \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \quad (5)$$

– нормальна складова сили тяжіння, яка змінюється за синусоїдальним законом:

$$G_r = m \cdot g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta) \quad (6)$$

Диференціальне рівняння при проходженні частинки зернового середовища через отвір має вигляд:

$$ma = m \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + m \cdot g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta) \quad (7)$$

Умова проходження частинки матеріала в отвір визначається як:

$$t_p = \frac{d-0,5d^*}{V_{pr}} \quad (8)$$

Підставивши із (7) значення прискорення a у (8) і врахувавши прийняті допущення, отримаємо вираз для визначення граничної швидкості проходження частинки через отвір обертової конічної поверхні:

$$V_{pr} = \frac{d-0,5d^*}{\sqrt{\frac{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta)}{0,5d^*}}} \quad (9)$$

де d^* - діаметр частинки, d - діаметр отвору конічного решета, V_{pr} - гранична швидкість проходження частинки, t_p - час проходження частинки через отвір.

Отриманий вираз для визначення граничної швидкості переміщення частинки над отвором впливає на товщину шару матеріалу, що рухається по робочій конічній поверхні, а отже - і на продуктивність процесу сепарації.

Домінуючий вплив на швидкість переміщення частинок уздовж твірної конуса має кут нахилу твірної.

Для визначення довжини конуса, за якої досягається робочий режим сепаратора, із залежності (4) отримаємо [1, 10, 14]:

$$\rho_p = \frac{\sqrt{V_{pr}^2 - \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}}{\frac{d\varphi}{dt} \cdot \sin(\beta)} \quad (10)$$

Піднісши до квадрата вираз (9) та провівши перетворення, отримаємо:

$$V_{pr}^2 = \frac{2(d-0,5d^*)^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta + g \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\beta)}{d^*} \quad (11)$$

Введемо позначення:

$$k_1 = 2 \cdot (d - 0,5d^*)^2 \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \rho \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \quad (12)$$

$$k_2 = 2 \cdot (d - 0,5d^*)^2 \cdot g \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\beta) \quad (13)$$

Тоді, з урахуванням введених позначень, рівняння (11) можна спростити до вигляду:

$$V_{pr} = \frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*} \quad (14)$$

Підставивши праву частину рівняння (14) у (10), отримаємо остаточний вираз:

$$\rho_p = \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*}\right)^2 - \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}}{\frac{d\varphi}{dt} \cdot \sin(\beta)} \quad (15)$$

Піднісши до квадрату праву та ліву частини рівняння (15), після перестановки та перетворень отримаємо вираз:

$$\rho_p^2 - \frac{\left(\frac{\rho \cdot k_1 + k_2}{d^*}\right)^2}{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta)} + \frac{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta)} \quad (16)$$

Після спрощення вираз (16) набуває вигляду:

$$\rho_p^2 - \rho_p \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_1}{d^*} + \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_2}{d^*} + \sin^{-2}(\beta) = 0 \quad (17)$$

Цей вираз є квадратним рівнянням відносно ρ_p . Його розв'язок дозволяє визначити ρ_p за формулою:

$$\rho_p = 0,5 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \frac{k_1}{d^*} + 0,5 \sqrt{\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^4 \cdot \sin^4(\beta) \cdot \left(\frac{k_1}{d^*}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \cdot \sin^2(\beta) \cdot \left(\frac{k_2}{d^*}\right) - 4 \sin^{-2}(\beta)} \quad (18)$$

Отримані результати розрахунків дозволили побудувати графічні залежності зміни граничної швидкості проходження частинок крізь отвори різного діаметра на конічній поверхні, що, у свою чергу, дає змогу визначити раціональну довжину робочої зони процесу розділення зернового середовища за геометричними розмірами частинок (рис. 3).

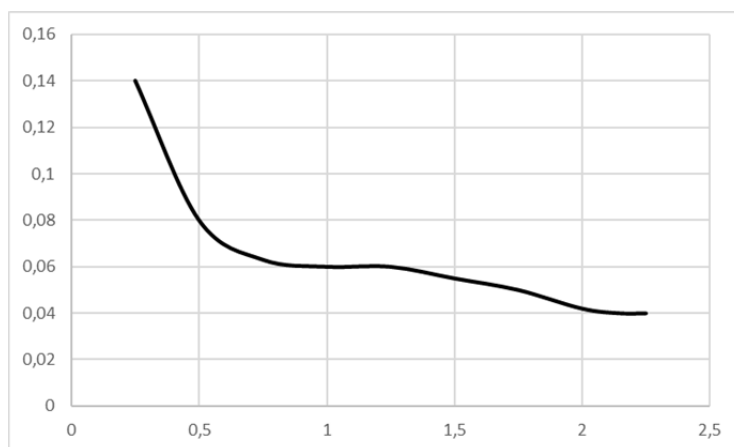


Рисунок 3 – Залежність зміни довжини робочої поверхні від розмірів прохідної частинки ($d = 3$ мм, $\omega = 105$ с⁻¹).

Джерело: розроблено авторами

Аналіз виразу (23) і побудованих графічних залежностей показує, що зі збільшенням розмірів прохідних частинок зменшується довжина твірної конічної поверхні, на якій досягається гранична швидкість проходження частинок у отвори, а отже - завершується їх сепарація [8].

На рис. 4 показано залежність довжини робочої поверхні, на якій досягається гранична швидкість проходження частинки, від частоти обертання конуса.

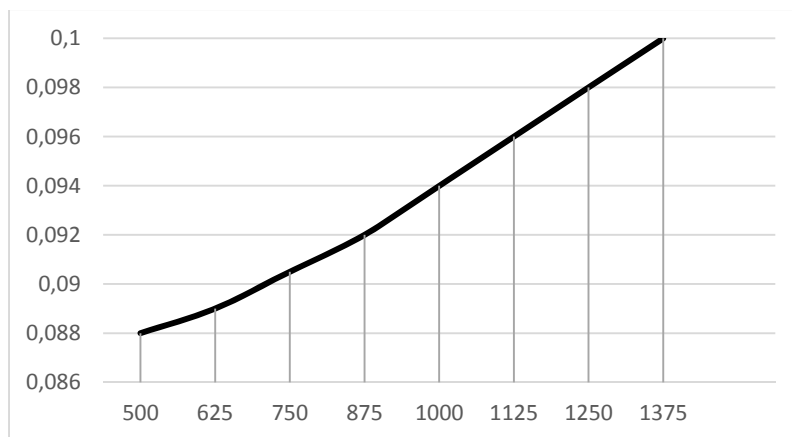


Рисунок 4 - Вплив довжини робочої поверхні від частоти обертання конуса частинки ($d = 3$ мм, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Збільшення частоти обертання понад 1000 хв⁻¹ призводить до зростання енергетичних витрат на холосте обертання робочих органів що підтверджують автори [4, 15].

На рис. 5 подано графічну залежність довжини робочої поверхні конуса від діаметра отворів його сепарувальної поверхні.

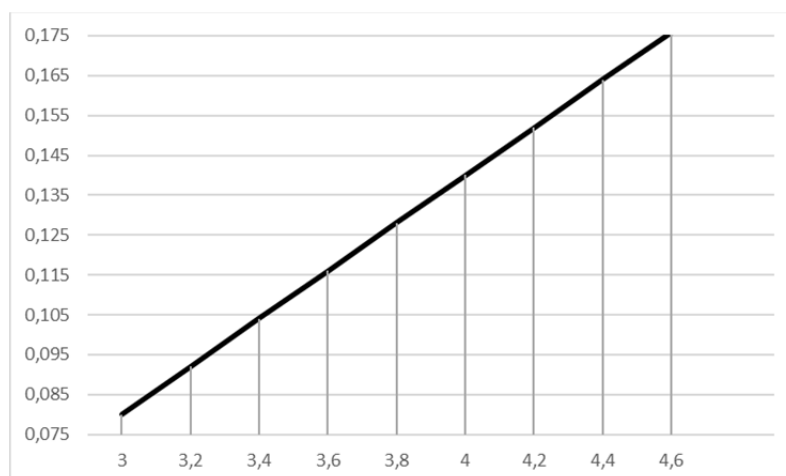


Рисунок 5 - Залежність довжини робочої поверхні конуса від діаметра його отворів ($\omega = 105$ с⁻¹, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Зі збільшенням діаметра отворів зростає довжина твірної конуса, на якій відбувається сепарація прохідних частинок [9, 11].

Однак, попри підвищення продуктивності конічної сепарувальної поверхні, надмірне збільшення розміру отворів призводить до порушення вимог щодо вмісту крупних частинок у кінцевому продукті [12].

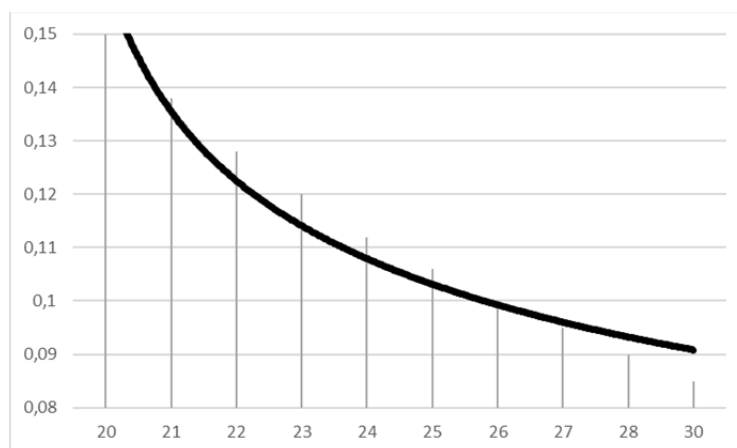


Рисунок 6 - Залежність довжини робочої поверхні конуса від величини кута при вершині конуса ($d = 3$ мм, $\omega = 105$ с⁻¹, $d^* = 2.5$ мм).

Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що зі збільшенням кута нахилу конуса зростає швидкість руху частинок уздовж твірної [10, 14], але водночас зменшується нормальна складова відцентрової сили, яка визначає проходження частинок через отвори робочої поверхні (рис. 6).

Висновки. Теоретично обґрунтовано умови проходження зернових частинок через отвори обертової конічної перфорованої поверхні. На основі рівнянь руху частинки в полі дії відцентрових, гравітаційних і сил тертя встановлено залежність граничної швидкості її проходження від геометричних параметрів сепарувальної поверхні (кут при вершині, діаметр отворів) та кінематичних параметрів обертання (кутова швидкість, частота обертання).

Отримано аналітичні залежності, що дозволяють визначати довжину робочої поверхні конуса, на якій завершується процес сепарації. Розв'язок рівняння (18) показав, що раціональна довжина твірної визначається як функція частоти обертання, діаметра отворів, кута нахилу конуса та розмірів прохідних частинок. Ці залежності є базою для проектування робочих органів вібровідцентрових сепараторів.

Встановлено закономірності впливу геометричних і кінематичних параметрів на процес розділення зернової суміші:

- зі збільшенням розмірів прохідних частинок довжина робочої поверхні, на якій досягається гранична швидкість, зменшується, що скорочує активну зону сепарації;
- підвищення частоти обертання конуса до певного оптимального значення (приблизно 1000 хв⁻¹) сприяє інтенсифікації процесу розділення, однак подальше її зростання призводить до надлишкових енергетичних витрат;
- збільшення діаметра отворів перфорованої поверхні підвищує продуктивність, але одночасно зменшує якість очищення через потрапляння великих частинок у прохідну фракцію;
- зі зростанням кута при вершині конуса збільшується швидкість руху частинок уздовж твірної, проте зменшується нормальна складова відцентрової сили, що знижує ефективність проходження частинок через отвори.

Визначено оптимальні умови роботи конічного сепаратора, які забезпечують ефективне розділення зернової маси за розмірами частинок при мінімальних енергетичних витратах: кут нахилу твірної - $35...45^\circ$, частота обертання - $800...1000$ хв⁻¹, діаметр отворів - $2,5...3,5$ мм, співвідношення діаметрів прохідних частинок і отворів - $1:5...1:6$.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для вдосконалення конструкцій вібровідцентрових і комбінованих зерноочисних машин. Отримані аналітичні вирази й графічні залежності забезпечують інженерну основу для подальшого моделювання, оптимізації параметрів робочих органів і підвищення ефективності процесів сепарації зернових матеріалів.

Список літератури

1. Сало В. М., інші. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.
2. Котов Б. І., інші. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження). Ніжин : Вид-во Лисенко М. М., 2017. 552 с.
3. Котов Б., Степаненко С. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів. Київ : ЦП Компринт, 2023. 427 с.
4. Харченко С. О. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей : автореферат дис. 2018. 40 с.
5. Li X., Zhang Y., Chen D. Dynamic analysis of particle motion on rotating conical separators. *Powder Technology*. 2020. Vol. 376. P. 112–121.
6. Котов Б. І. Ідентифікація параметрів сипкого середовища у віброзрідженому стані за експериментальними даними. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету*. 2003. С. 161–163.
7. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насінневих матеріалів за густиною насіння : автореф. дис. Кропивницький, 2023. 50 с.
8. Мельник В., інші. Дослідження розвитку технологій та технічних засобів для пневмовідцентрового розділення зернових матеріалів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання*. 2024. Т. 24, № 1. С. 75–88. URL: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5>.
9. Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский В. П. Гидродинамика сепарирования зерна. Харьков, 2010. 174 с.
10. Степаненко С. П., інші. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2024. Т. 14, № 1. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>.
11. Лузан П., інші. Теоретичні аспекти розділення зерна на решеті інерційно-гравітаційного сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2021. Т. 51. С. 95–103. URL: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103>.
12. Fan J., Wang L., Huang H. CFD analysis of particle trajectories in centrifugal classifiers. *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32, no. 9. P. 3084–3095.
13. Yin Z., Zhang H. Modeling and experimental study of grain separation efficiency in conical separators. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 218. P. 45–57.
14. Василенко П. М. Механіка сипких тіл. Київ : Урожай, 1973. 327 с.
15. Raju M. S., Kumar P. Simulation of granular flow on rotating conical surfaces. *Particuology*. 2019. Vol. 43. P. 85–94.
16. Stepanenko S., others. Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2024. P. 1143–1149. URL: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236>
17. Stepanenko S., others. Study of the rotary cleaners of the holes of cylindrical sieves on a vibrocentrifugal separator. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, no. 8. P. 160–163. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.08.33>.
18. Aneliak M., others. Study of the process of threshing leguminous grass seeds with a drum-type threshing device. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 71, no. 3. P. 83–92. URL: <https://doi.org/10.35633/inmateh-71-06>.
19. Kaletnik H., others. The usage of the elemental base of the vibratory mill with the spatial circulation movement of material to create drying rig. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100, no. 3. P. 232–237. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2024.03.41>.
20. Stepanenko S., others. Mathematical modeling of grain movement dynamics in the processes of air-centrifugal separation of grain material. *Journal of Central European Agriculture*. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 383–393. URL: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4301>.

21. Stepanenko S., others. Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. *Engineering for Rural Development. Proceedings*. Jelgava, Latvia, 2025. P. 1091–1096. URL: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>.
22. Kotov B., others. Mathematical modeling of the grain cooling process in installations with radial air supply. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*. 2023. Vol. 27. P. 101–107. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.101>.
23. Котов Б. І., ін. Визначення характеристик руху зерна за наявності сил сухого тертя й опору середовища. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2022. Т. 15, № 114. С. 81–87. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9>.
24. 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. URL: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-8>.

References

1. Salo, V. M., & others. (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. [In Ukrainian]
2. Kotov, B. I., & others. (2017). Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling). Lysenko M. M. Publishing House. [In Ukrainian]
3. Kotov, B., & Stepanenko, S. (2023). Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials. CP Komprint. [In Ukrainian]
4. Kharchenko, S. O. (2018). Concept of intensification of processes of vibrating sieve screening of grain mixtures, dissertation abstract. Kharkiv National University of Food Technologies and Trade. [In Ukrainian]
5. Li, X., Zhang, Y., & Chen, D. (2020). Dynamic analysis of particle motion on rotating conical separators. *Powder Technology*, 376, 112–121. [In English]
6. Kotov, B. I. (2003). Identification of parameters of a loose medium in a vibrofluidized state based on experimental data. Collection of scientific papers of the National Agrarian University, 161–163. [In Ukrainian]
7. Bredykhin, V. V. (2023). Scientific foundations of the processes of vibropneumatic separation of seed materials by seed density. author's abstract. dissertation. TsNTU. [In Ukrainian]
8. Melnyk, V., & others. (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 publication, 24(1), 75–88. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-5> [In Ukrainian]
9. Tyshchenko, L. N., Olshansky, V. P., & Olshansky, V. P. (2010). Hydrodynamics of grain separation. [In Ukrainian]
10. Stepanenko, S. P., & others. (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> [In Ukrainian]
11. Luzan, P., & others. (2021). Theoretical aspects of grain separation on the sieve of an inertial-gravity separator. Design, production and operation of agricultural machines, 51, 95–103. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.95-103> [In Ukrainian]
12. Fan, J., Wang, L., & Huang, H. (2021). CFD analysis of particle trajectories in centrifugal classifiers. *Advanced Powder Technology*, 32(9), 3084–3095. [In English]
13. Yin, Z., & Zhang, H. (2022). Modeling and experimental study of grain separation efficiency in conical separators. *Biosystems Engineering*, 218, 45–57. [In English]
14. Vasylenko, P. M. (1973). Mechanics of loose bodies. Harvest. [In Ukrainian]
15. Raju, M. S., & Kumar, P. (2019). Simulation of granular flow on rotating conical surfaces. *Particuology*, 43, 85–94. [In English]
16. Stepanenko, S., & others. (2024). Modelling of aerodynamic separation of grain material in a combined centrifugal-pneumatic separator. *Y ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. Proceedings* (c. 1143–1149). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF236> [In English]
17. Stepanenko, S., & others. (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> [In English]
18. Aneliak, M., & others. (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> [In English]

19. Kaletnik, H., & others. (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> [In English]
20. Stepanenko, S., & others. (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> [In English]
21. Stepanenko, S., & others. (2025). Theoretical study of the movement of grain particles in a vibro-aerodynamic field. *Y Engineering for Rural Development. Proceedings* (c. 1091–1096). <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278> [In English]
22. Kotov, B., & others. (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> [In Ukrainian]
23. Kotov, B. I., & others (2022). Determination of grain motion characteristics in the presence of dry friction forces and medium resistance. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 15(114), 81–87. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-9> [In Ukrainian]
24. 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> [In Ukrainian]

Serhii Stepanenko¹, Sr. Researcher, DSc., **Borys Kotov**², Prof., DSc., **Alvian Kuzmych**¹, Ph.D., **Vitaly Melnyk**¹, graduate student; **Rostyslav Kudrynetskyi**¹, Ph.D.; **Ihor Popadyuk**¹, junior researcher

¹*Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the NAAS of Ukraine, Hlevakha, Ukraine*

²*Podilskyi State University, Kamianets-Podilskyi, Ukraine*

Research on the Process of Grain Separation on a Conical Perforated Surface

The purpose of the article is to provide a theoretical justification of the separation process of grain material on a rotating conical perforated surface of a vibrocentrifugal separator and to establish analytical dependencies determining the efficiency of grain mixture classification. The study analyzes current approaches to pneumatic-centrifugal and vibro-centrifugal separation and identifies the main factors influencing the quality and productivity of the process. A mathematical model of particle motion along the inner surface of the conical screen was developed, taking into account the action of centrifugal, gravitational, and frictional forces. Based on the derived system of differential motion equations, analytical expressions were obtained for determining the critical (limit) velocity of particle passage through the perforations and for calculating the effective length of the working surface where separation is completed.

The theoretical analysis established the conditions under which grain particles pass through the holes of the rotating conical surface and determined the influence of geometric (apex angle, hole diameter) and kinematic (angular velocity, rotation frequency) parameters on separation performance. The obtained results revealed several regularities: increasing the rotation frequency up to 1000 rpm intensifies the separation process, while further increase leads to excessive energy consumption; enlarging the perforation diameter enhances throughput but reduces cleaning efficiency; increasing the cone apex angle accelerates particle motion along the generatrix, yet decreases the normal component of the centrifugal force and thus the probability of passage through the holes. According to the analytical relationships, the optimal design and operating parameters of the conical separator were determined as follows: generatrix inclination angle – 35–45°, rotation speed – 800–1000 rpm, perforation diameter – 2.5–3.5 mm, and the particle-to-hole diameter ratio – 1:5...1:6.

The developed theoretical framework provides a scientific basis for further improvement of vibrocentrifugal and combined grain-cleaning machines. The obtained analytical expressions can be applied in the design of working elements with optimized parameters that ensure higher separation quality and reduced energy consumption in grain processing operations.

Seed material, terminal velocity, conical sieve, vibro-centrifugal separator, separation of grain mixtures, separation, particle trajectory, airflow, parameter optimization, vibration

Одержано (Received) 28.10.2025

Прорецензовано (Reviewed) 31.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 11.11.2025