



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-1-3

УДК 631.361:621.92

С. П. Степаненко¹, д.т.н.,

ORCID: 0000-0002-8331-4632

Б. І. Котов², д.т.н.,

ORCID: 0000-0001-6369-3025

В. А. Мельник¹,

ORCID: 0009-0006-2383-9572

Д. А. Волик¹,

ORCID: 0009-0001-1979-861X

¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва
Національної академії аграрних наук України²Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ В РОБОЧІЙ ЗОНІ СЕПАРАТОРА

Анотація. Отримано замкнуту систему рівнянь зі зв'язуючим рівнянням, яка дозволяє моделювати рух насіння по обертовій поверхні. При чисельному інтегруванні цієї системи можна оцінити ефективність різних поверхонь розкидача пневмовідцентрового сепаратора для досягнення бажаних результатів, таких як зменшення геометричних розмірів, підвищення продуктивності або покращення якості сепарування. Чисельне інтегрування враховує вплив фізичних, геометричних, технологічних і кінематичних параметрів на кінцевий результат, включаючи час і швидкість руху в циліндричних координатах. Моделювання руху насіння по поверхні розкидача пневмовідцентрового сепаратора дозволяє обґрунтувати раціональні геометричні розміри ротора та оптимальні технологічні режими роботи.

Застосування розкидачів зернового матеріалу з криволінійними поверхнями у пневмовідцентрових сепараторах для прискорення руху насіння є перспективним підходом у післязбиральній обробці. Моделювання руху насіння на таких поверхнях дозволяє прогнозувати їх рух із повним розумінням впливу різних параметрів на процес рівномірного розподілу по периметру каналу ротора сепаратора. Чисельне інтегрування в реальних умовах експлуатації допомагає оптимізувати геометрію розкидача та технологічні параметри для досягнення найкращих результатів. Це сприяє ефективнішому використанню ресурсів та покращенню якості обробки зернових матеріалів.

Ключові слова: моделювання, сепаратор, процес переміщення, зерновий матеріал, робочий орган, рівняння відносного руху, рівняння поверхні, множник Лагранжа.

Постановка проблеми. В галузі післязбиральної обробки зерна все більший інтерес в останні часи викликають пневмовідцентрові та вібровідцентрові сепаратори як з горизонтальним так і з вертикальним ротором, з принципом дії яких є розгін насінини за рахунок відцентрових сил інерції з подальшим її фракціонуванням на



відповідні фракції. Це в деякій мірі пов'язано із зменшенням енергетичних витрат на процес фракціонування зернових матеріалів порівняно з іншими сепараторами, які, крім безпосередніх витрат на поділ насінин, мають енерговитрати на переміщення за допомогою виключно повітряного потоку цілого і подрібненого зерна. У пневмівідцентрових сепараторах подача матеріалу до вертикального решітного ротора може здійснюватися за рахунок відцентрових сил інерції, що створюються обертаючимся ротором з робочими органами. І однією з ключових ролей пневмівідцентрового сепаратора зернових матеріалів є розподільчий робочий орган (розкидач) або прискорювач, який забезпечує рівномірну, стабільну подачу матеріалу до вертикального ротора і надає матеріалу (насінинам), що знаходяться на її поверхні, необхідну лінійну швидкість і траєкторію руху, які на даний час мало вивчені, тому необхідно розглянути процес переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора і встановити раціональні значення траєкторій та швидкостей руху.

Аналіз останніх досліджень. Більшість конструкцій пневмівідцентрових та вібровідцентрових сепараторів мають центральну осьову подачу матеріалу до прискорювача у вигляді плоского диска [1, 2, 6-8]. Однак при такому способі подачі матеріалу прискорення частинки, що знаходиться найближче до осі обертання, ускладнене через відсутність початкової швидкості та недостатність відцентрових сил для подолання тертя, що призведе до утворення зони застою (об'ємне нагромадження матеріалу в аспіраційному каналі) та збільшення витрат на їх подолання [3, 4, 9-11, 19]. Для вирішення цієї проблеми можливі два підходи: подача матеріалу зі зміщенням від осі обертання, що ускладнює конструкцію, або використання відбивної поверхні [12, 13], яка є прямою кінцевою поверхнею, розташованою паралельно осі обертання, забезпечуючи віддалення насінин матеріалу від осі обертання та надання їм початкової швидкості. У вібровідцентрових сепараторах, що використовують принцип комбінованого впливу на зерновий матеріал, слід відзначити, що важливу роль також відіграє траєкторія руху зернових матеріалів на розкидних дисках [14, 15].

Слід відмітити, що в роботі [4] розглянута взаємодія частинки матеріалу, які змушені ковзати по поверхні у відносному русі, при цьому описуючи іншу траєкторію в абсолютному русі. Абсолютна траєкторія складається з відносного руху ковзання частинки та переносного руху поверхні.

Автори [4] об'єднали відносний рух ковзання частинки та переносний рух поверхні та довели зручність використовувати двох систем координат: рухомої, відносно якої описується відносний рух частинки, і нерухомої, відносно якої описується переносний рух



поверхні та абсолютний рух частинки. У науковій праці розглядається рух тригранника як переносний, а рух точки у системі тригранника як відносний. Для формулювання системи диференціальних рівнянь відносного руху частинки використовуються формули Френе. На відміну від традиційного підходу, за незалежну змінну обирається довжина дуги напрямної кривої, вздовж якої рухається тригранник, а не час.

В інших працях [5-12] автори розглянули рух площин поступально (усі точки площини описують однакові криві), частинка рухається по траєкторії, схожій на криву, яку описує площина та обертальному русі площини (усі точки площини описують концентричні кола), частинка рухається по спіралі правильної форми. Дослідники поєднали ці два рухи, які призводять до того, що на початковому етапі відносний рух частинки є дещо хаотичним, але з часом набуває форми спіралі незалежно від місця попадання частинки на площину. У статті розглянуто відносний рух частинки по горизонтальній шорсткій площині, яка здійснює складні коливання, спричинені переміщенням точки площини по колу зі сталою кутовою швидкістю відносно його центра і одночасним обертанням площини навколо цієї точки з тією ж кутовою швидкістю в протилежному напрямі.

В наукових дослідженнях [13-16] отримано диференціальні рівняння, що регулюють відносний рух частинки вздовж периферії вертикального гвинта, обмеженого рухомим коаксіальним циліндром. Обидві поверхні утворюють єдину структуру та обертаються навколо спільної вісі. Розглядається конкретний випадок, де поверхні залишаються нерухомими. Проведено якісний аналіз отриманих рівнянь, що дозволяє виявити закономірності у русі частинки вздовж гелікальної траєкторії перетину гвинта з циліндром. Визначено параметри, що стосуються структури та кінематики, розмежовуючі умови, при яких частинка піднімається під час ковзання вздовж гелікальної траєкторії або опускається вниз. Описано відносні та абсолютні траєкторії руху частинки.

В дослідженнях [17] встановлено детальний опис розробленої фізичної моделі пневматичного процесу класифікації для виявлення обертового шару матеріалу і забезпечення частоти завантаження та розвантаження пневматичного класифікатора. Також розроблено відповідну математичну модель для оцінки нестационарної концентрації дрібних частинок у газорозподіленому потоці з плином часу та висоти робочого простору апарату. Дослідження спрямоване на розробку методу пневматичної класифікації для гранульованих матеріалів з використанням апарату у формі ромба та забезпечення надійності робочого процесу за рахунок врахування впливу потоку на



концентрації гранульованих матеріалів. Вивчено, що пневматичний класифікатор у формі ромба ефективно розділяє гранульований матеріал, досягаючи до 95% цільової фракції. В результаті запропоновану методологію можна впровадити для оптимізації геометричних профілів пневматичних класифікаторів з урахуванням потрібних технологічних параметрів процесу пневматичної класифікації.

В роботі [18] запропонована тривимірна математична модель монотонного спадання, яка дозволяє визначити гідродинамічні параметри потоку рідинної плівки та між фазової поверхні. В результаті виявлено, що між фазова поверхня залежить від запропонованого безрозмірного критерію, який включає в себе внутрішній напружений стан, довжину каналу та густину рідини. Додатково аналітично отримані рівняння для визначення середньої товщини плівки, середніх векторів швидкості по товщині плівки, компонентів швидкості вздовж вертикальної вісі, а також початкового кута відхилення потоку від вертикальної вісі.

Формулювання мети статті. Мета дослідження полягає у тому, щоб змодельовати рух частинок (насінин) по поверхні розподільчого робочого органа, який обертається.

Матеріали, методи та об'єкти дослідження. Одним з методів, які ми використовуємо для досягнення даної мети, є форма прискорювача, яка дозволяє нам задавати початкові кінематичні параметри та траєкторію руху насінин. Це, в свою чергу, впливає на розміри, металоємність та робочі режими вертикального ротора чи його складових. Для вирішення цієї проблеми ми використовуємо моделювання руху частинок матеріалу по його поверхні, яка обертається. Для цього ми застосовуємо основний закон динаміки матеріальної точки та досліджуємо рух частинки по обертовій поверхні. Для отримання результатів ми використовуємо крокову чисельну інтеграцію, що дозволяє отримати дані для аналізу руху частинок з бажаною точністю.

Основна частина. Криволінійна поверхня обертається навколо вертикальної осі (рис. 1). Рівняння поверхні ми можемо описати у циліндричних координатах за допомогою рівняння такого виду [2, 3, 5]:

$$\epsilon(\rho, \varphi, z) = 0, \quad (1)$$

де ρ - циліндричний радіус; φ - полярний кут; z - аппліката.

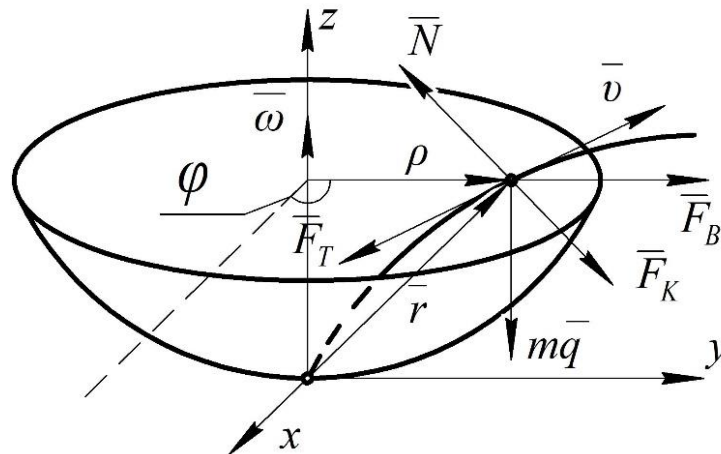


Рис. 1. Розрахункова схема руху частинки по обертовій криволінійній поверхні

Радіус-вектор матеріальної точки, що рухається по криволінійній поверхні, яка обертається разом із нею, є функцією трьох цих координат, які можуть змінюватися з часом, не порушуючи рівняння (1):

$$\vec{r} = \vec{r}(\rho, \varphi, z), \quad (2)$$

Диференціальне рівняння відносного руху точки по обертовій поверхні можна записати у векторній формі:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = m \cdot \vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_T + \vec{F}_B + \vec{F}_K, \quad (3)$$

де m - маса частинки; $\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$ - її прискорення; $m \cdot \vec{g}$ - сила тяжіння; \vec{N} - нормальна реакція поверхні прискорювача (розподільника); \vec{F}_T - сила тертя від поверхні, спрямована протилежно відносно швидкості руху частинки; \vec{F}_B - переносна відцентрова сила інерції; \vec{F}_K - сила інерції Коріоліса.

Визначимо проекції сил та прискорень на напрямки циліндричних осей координат. Сила тяжіння протилежна осі z :

$$m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{g}(0, 0, -m \cdot g), \quad (4)$$

де g - прискорення вільного падіння.

Нормальна реакція обертової криволінійної поверхні визначиться, як:

$$\vec{N} = \delta \cdot \text{grad}(\epsilon), \quad (5)$$

де $\delta = \delta(t)$ - невизначений множник Лагранжа [13, 16, 18]; $\text{grad}(\epsilon)$ - вектор градієнту до рівняння поверхні (1), який має проекції на циліндричну систему координат, при цьому вісь φ направлена перпендикулярно всім ρ, z , проходить через рухливу точку, так що вісь ρ, φ, z утворюють праву трійку векторів.



$$\begin{cases} [\text{grad}(\epsilon)]_{\rho} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}; \\ [\text{grad}(\epsilon)]_{\varphi} = \frac{\partial \epsilon}{\partial \varphi} \cdot \rho^{-1}; \\ [\text{grad}(\epsilon)]_z = \frac{\partial \epsilon}{\partial z}; \end{cases} \quad (6)$$

Тоді проєкції нормальної реакції \vec{N} дорівнюють:

$$\begin{cases} N_{\rho} = \delta \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}; \\ N_{\varphi} = \delta \frac{\partial \epsilon}{\partial \varphi} \cdot \rho^{-1}; \\ N_z = \delta \frac{\partial \epsilon}{\partial z}; \end{cases} \quad (7)$$

Модуль нормальної реакції знайдемо із залежності:

$$N = |\vec{N}| = |\delta| \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}\right)^2 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \varphi} \cdot \rho^{-1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial z}\right)^2}, \quad (8)$$

При постійній кутовій швидкості обертання криволінійної поверхні $\vec{\omega}$, переносна відцентрова сила інерції \vec{F}_B спрямована вздовж радіусу ρ відповідно до результату векторних множень у її визначенні:

$$\vec{F}_B = -m\vec{\omega} \cdot (\vec{\omega} \cdot \vec{r}), \quad (9)$$

де \vec{r} визначається за виразом (2), отже:

$$\begin{cases} F_{B\rho} = m \cdot \omega^2 \cdot \rho; \\ F_{B\varphi} = 0; \\ F_{Bz} = 0; \end{cases} \quad (10)$$

Сила інерції Кориоліса за визначенням дорівнює:

$$\vec{F}_K = -2m\vec{\omega} \cdot (\vec{v}), \quad (11)$$

де \vec{v} - відносна швидкість матеріальної точки в рухомих вісях координат, модуль відносної швидкості пов'язаний з циліндричними координатами за відомим виразом:

$$v = \sqrt{(\dot{\rho})^2 + (\rho\dot{\varphi})^2 + (\dot{z})^2}, \quad (12)$$

Тоді проєкції сили Кориоліса дорівнюють:

$$\begin{cases} F_{K\rho} = 2m \cdot \omega \cdot \dot{\varphi} \cdot \rho; \\ F_{K\varphi} = -2m \cdot \omega \cdot \dot{\rho}; \\ F_{Kz} = 0; \end{cases} \quad (13)$$

Сила тертя частинки про поверхні розподільника визначається за законом Кулона [2, 7] через нормальну реакцію та протилежна за напрямком відносної швидкості.

$$\vec{F}_T = -|\vec{N}| \cdot f \cdot \frac{\vec{v}}{v}, \quad (14)$$



$$\begin{cases} F_{T\rho} = -|\vec{N}| \cdot f \cdot \frac{\dot{\rho}}{\vartheta}; \\ F_{T\varphi} = -|\vec{N}| \cdot f \cdot \frac{\dot{\varphi} \cdot \rho}{\vartheta}; \\ F_{Kz} = -|\vec{N}| \cdot f \cdot \frac{\dot{z}}{\vartheta}; \end{cases} \quad (15)$$

Спроекуємо рівняння (3) на вісі рухомої системи циліндричних координат, що обертаються разом з криволінійною поверхнею, використовуючи знайдені проекції всіх сил:

$$\begin{cases} m \cdot (\ddot{\rho} - \rho \cdot (\dot{\varphi})^2) = \delta \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} - N \cdot f \cdot \frac{\dot{\rho}}{\vartheta} + m \cdot \omega^2 \cdot \rho + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{\varphi} \cdot \rho; \\ m \cdot \rho^{-1} \cdot \frac{d(\rho^2 \dot{\varphi})}{dt} = -N \cdot f \cdot \frac{\dot{\varphi} \cdot \rho}{\vartheta} - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{\rho}; \\ m \cdot \ddot{z} = -m \cdot g + \delta \frac{\partial \epsilon}{\partial z} - N \cdot f \cdot \frac{\dot{z}}{\vartheta}; \end{cases} \quad (16)$$

Перетворимо друге рівняння системи з урахуванням проекції прискорення на вісь φ та запишемо його в наступному вигляді:

$$\rho^{-1} \cdot \frac{d(\rho^2 \dot{\varphi})}{dt} = \ddot{\varphi} \cdot \rho + 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\rho}. \quad (17)$$

Припустимо приведення всіх сил до одиничної маси насінини при $m = 1$, отримаємо:

$$\begin{cases} \ddot{\rho} = \rho \cdot (\dot{\varphi})^2 + \delta \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} - N \cdot f \cdot \frac{\dot{\rho}}{\vartheta} + \omega^2 \cdot \rho + 2 \cdot \omega \cdot \dot{\varphi} \cdot \rho; \\ \ddot{\varphi} = \rho^{-1} \cdot \left[-2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\rho} - N \cdot f \cdot \frac{\dot{\varphi} \cdot \rho}{\vartheta} - 2 \cdot \omega \cdot \dot{\rho} \right]; \\ \ddot{z} = -g + \delta \frac{\partial \epsilon}{\partial z} - N \cdot f \cdot \frac{\dot{z}}{\vartheta}; \end{cases} \quad (18)$$

Для отримання замкнутої системи рівнянь доповнимо систему (18) рівнянням зв'язку (1). Тоді чотири невідомі $\rho(t)$, $\varphi(t)$, $z(t)$, $\delta(t)$ функції можна знайти шляхом розв'язання системи трьох диференціальних (18) та одного алгебраїчного (1) рівнянь.

Є можливість різних форм виконання поверхні обертання в рівнянні (1). Визначимо рівняння зв'язку у вигляді вісь симетричної поверхні, описаної степеневу функцією, яка проходить через задані початкову та кінцеву точки руху і має наступний вигляд:

$$\frac{z}{z_m} = A_0 + \left(\frac{\rho}{\rho_m} \right)^n. \quad (19)$$

де A_0 – відповідний доданок, який визначається з умови належності початкової точки траєкторії даній поверхні обертання з координатами:

$$\rho(0) = \rho_0; \varphi(0) = 0; z(0) = 0, \quad (20)$$

де ρ_m, z_m координати кінцевої (максимальної) точки траєкторії, де закінчується поверхня, яка описана рівнянням (19) для всіх значень полярного кута φ ; n - показник степені у рівнянні поверхні, який



змінює степінь вигину розподільника і який можна змінювати для досягнення потрібних параметрів руху насінини.

Таким чином, початок координат рухомої системи відліку, в якій описується рух насінини, завжди відповідає по осі z початковій точці траєкторії руху, а вершина параболи в осьовому перерізі поверхні обертання лежить на цій вісі нижче нуля на величину A_0 .

$$A_0 = -\left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right)^n. \quad (21)$$

Перетворимо рівняння (19) до вигляду (1):

$$\epsilon(\rho, \varphi, z) = \frac{z}{z_m} - A_0 - \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^n, \quad (22)$$

і обчислимо часткові похідні у виразі градієнта до поверхні зв'язку:

$$\begin{cases} \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} = -n \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^{n-1} \cdot \rho_m^{-1}; \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial \varphi} = 0; \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = z_m^{-1}; \end{cases} \quad (23)$$

Отриману систему рівнянь (23) необхідно підставляти в проекції сили \vec{N} - нормальної реакції до поверхні зв'язку в рівняннях (18).

З останнього рівняння системи (18) визначимо множник Лагранжа:

$$\delta = \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho}\right)^{-1} \cdot \left[\ddot{z} + g + N \cdot f \cdot \frac{\dot{z}}{\vartheta}\right]. \quad (24)$$

Слід відмітити, що при русі по поверхні незалежними є лише дві циліндричні координати, то при чисельному покроковому інтегруванні візьмемо за основу перші два диференціальні рівняння (18), а координату z та її похідні за часом обчислимо через рівняння зв'язку (22) тоді отримаємо:

$$z = z_m \cdot A_0 + z_m \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^n, \quad (25)$$

$$\dot{z} = n \cdot z_m \cdot (\rho_m)^{-1} \cdot \dot{\rho} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^{n-1}, \quad (26)$$

$$\ddot{z} = n \cdot z_m \cdot (\rho_m)^{-1} \cdot \frac{\dot{\rho}^2}{\rho_m} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^{n-2} + n \cdot z_m \cdot (\rho_m)^{-1} \cdot \ddot{\rho} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_m}\right)^{n-1}, \quad (27)$$

У виразах (24), (25), (26), (27) значення координат ρ , φ , а також їх похідних за часом на поточному кроці інтегрування прийняті рівними їх значенню в кінці попереднього кроку інтегрування. Процедура чисельного інтегрування системи рівнянь (18) проводилась методом усередненого прискорення [16, 18] за оригінальною алгоритмічною програмою [2, 3].

Після узагальнення система (18) з урахуванням (19-23) прийме наступний вигляд:



$$\begin{cases} \ddot{\rho} = \rho \dot{\theta}^2 - \frac{g}{v_{кр}^2} (\dot{\rho} + v_{пр}) \sqrt{(\dot{\rho} + v_{пр})^2 + (\rho \dot{\theta})^2 + (v_{пз} - \dot{z})^2}; \\ \ddot{\theta} = - \left[\frac{2\rho \ddot{\theta}}{\rho} - \frac{g}{v_{кр}^2} \dot{\theta} \sqrt{(\dot{\rho} + v_{пр})^2 + (\rho \dot{\theta})^2 + (v_{пз} - \dot{z})^2} \right]; \\ \ddot{z} = \frac{g}{v_{кр}^2} (v_{пз} - \dot{z}) \sqrt{(\dot{\rho} + v_{пр})^2 + (\rho \dot{\theta})^2 + (v_{пз} - \dot{z})^2} - g; \end{cases} \quad (28)$$

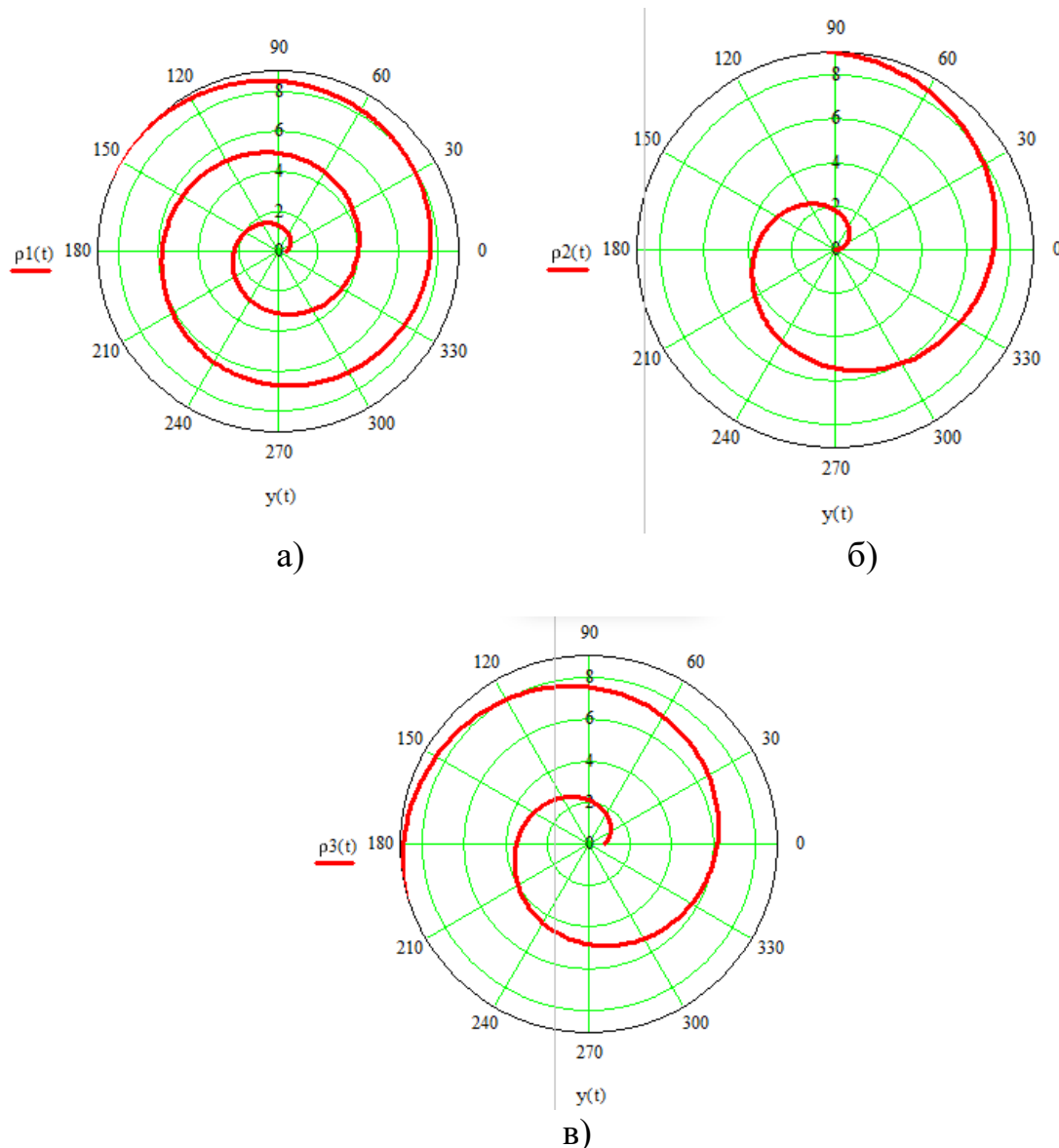
де

$$v_{пр} = \frac{v_{оп} \cos \beta}{1 - \frac{2(z-h_k)}{(B+2r_k)tg\beta}}; \quad v_{пз} = \frac{v_{оп} \sin \beta}{1 - \frac{2(z-h_k)}{(B+2r_k)tg\beta}}; \quad (29)$$

$v_{пз}$ - проекції швидкості повітря на координатні осі O_ρ і O_z ; $v_{кр}$ - критична швидкість частки зернової суміші; $v_{оп}$ - середня швидкість повітря і кільцевому каналі в площині верхньої кромки; β - кут між твірною поверхні зовнішньої стінки кільцевого каналу і горизонтальною площиною; B - ширина кільцевого каналу; h_k - висота конічної частини; r_k - радіус верхньої кромки конічної частини.

Результати для аналізу кінематичних параметрів руху та траєкторії частинки, яка починає рух без початкової лінійної швидкості v_0 і кутової швидкості ω_0 , рівної за модулем кутовій швидкості обертання ω при різних криволінійних поверхнях розкидача, наведені на рис. 2.

Отже, аналіз отриманих результатів показує, що використання вгнутої криволінійної поверхні ($n = 2$) дозволило в 2 рази збільшити у порівнянні з плоскою поверхнею ($n = 0$) і в 1,7 рази у порівнянні з конічною поверхнею ($n = -0,1$) значення набутої швидкості при сході з обертової поверхні розкидача, що є наслідком часу перебування насінини на поверхні. Так, наприклад, при $n = 2$ час складає $t = 2,06$ с., при $n = 0$ час складає $t = 0,9$ с., а при $n = -0,1$ час складає $t = 0,4$ с. При зміні форми обертової поверхні від вгнутої $n = 2$ до випуклої $n = -0,1$ зменшується загальна довжина пройденого насінинною шляху, тобто її траєкторія.

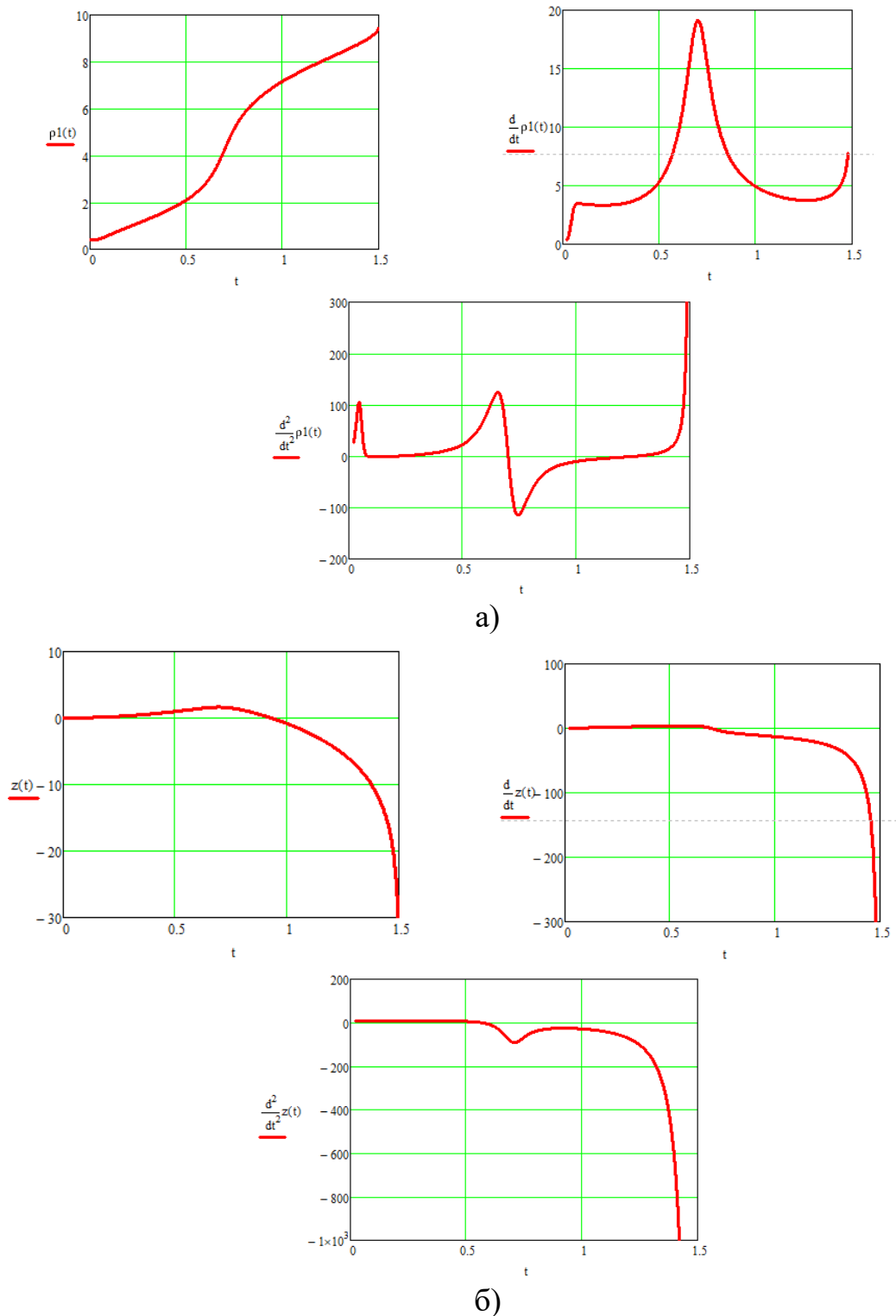


а) $n = 2$ (вгнута); б) $n = 0$ (пряма); в) $n = -0,1$ (конічна).

Рис. 2. Дані для аналізу швидкості руху та траєкторії насінини, яка вводиться без початкової лінійної швидкості і кутової швидкості, рівної за модулем кутовій швидкості обертання за різних форм криволінійних поверхонь розкидача зернових матеріалів

Розрахунки проводилися при різних змінних характеристиках поверхні, початкових кінематичних параметрах і коефіцієнті тертя. На рис. 3 подано приклад даних з результатами розрахунків і графіками зміни траєкторії руху, швидкості та прискорення насінини за циліндричними осями ρ і z .

Аналіз графіків, зображених на рис. 3а і 3б, дозволяє відзначити, що максимальну швидкість насінини досягла за 0,6-0,8 с., перебуваючи на відстані 0,01 м від осі обертання. При цьому подальші зміни швидкості, аж до її сходу з вгнутої поверхні, мали затухаючий гармонійний характер.



а) графіки переміщення, швидкості та прискорення насінини по осі ρ ;
б) графіки переміщення, швидкості та прискорення насінини по осі z .

Рис. 3. Приклад результатів розрахунків траєкторії руху насінини та кінематичних показників при $n = 2$

Отже, великий інтерес для подальших досліджень представляють криволінійні поверхні, які мають вгнутий характер і поєднують в собі конічну та вгнуту поверхні. Визначені траєкторії насінин та їх



кінематичні параметри можна використовувати для визначення зв'язку між конструкційними та технологічними параметрами пневмодцентрового сепаратора, такими як: час перебування насінини на розподільчому розкидачі, швидкість сходу насінини з розкидача, форма лопатей, яка буде використана безпосередньо на розкидачі.

Висновки. Була отримана замкнута система рівнянь з рівнянням зв'язку, що дозволяє моделювати рух насінини по обертовій поверхні, при чисельному інтегруванні якої існує можливість оцінити застосування тієї чи іншої поверхні розкидача пневмодцентрового сепаратора для досягнення бажаного результату щодо зменшення геометричних розмірів, підвищення продуктивності або поліпшення якості процесу сепарування. Використання методів чисельного інтегрування дозволяє врахувати вплив фізичних, геометричних, технологічних і кінематичних параметрів на вихідний результат, наприклад, такі як час руху, швидкості руху в циліндричних координатах. Таким чином, встановлено, що використання моделювання руху насінини по поверхні розкидача пневмодцентрового сепаратора дозволяє обґрунтувати раціональні геометричні розміри ротора пневмодцентрового сепаратора та оптимальні технологічні режими його роботи.

Застосування розкидачів зернового матеріалу в пневмодцентрових сепараторах з використанням криволінійних поверхонь для прискорення руху насінин є перспективним підходом у галузі післязбиральної обробки. Моделювання руху насінин на таких поверхнях дозволяє прогнозувати їхнє рухоме з повним розумінням впливу різних параметрів на процес його рівномірного розподілу по периметру каналу ротора сепаратора. Використання чисельного інтегрування дозволяє здійснити це в умовах реальних експлуатаційних умов, що безперечно допомагає в оптимізації геометрії розкидача та технологічних параметрів для досягнення найкращих результатів. Такий підхід може сприяти ефективнішому використанню ресурсів та поліпшенню якості обробки зернових матеріалів.

Список використаних джерел

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин : ПП Лисенко, 2017. 487 с.



2. Котов Б. І. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів: монографія / Б. І. Котов, С. П. Степаненко. Київ : ЦП Компрінт, 2023. 427 с.
3. Системне обґрунтування структури та використання технологічних комплексів машин для збирання й післязбиральної обробки врожаю зернових культур: монографія / В. І. Днесь та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2023. 200 с. <https://doi.org/10.37204/imaap.syst.obgruntuv.struktury>.
4. Пилипака С. Ф., Воліна Т. М., Захарова І. О., Рибенко І. О., Ребрій А. М. Дослідження складного руху точки по площині із застосуванням тригранника і формул Френе. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2023. № 104. С. 171–182. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2023.104.171-182>.
5. Пилипака С. Ф., Несвідомін В. М., Воліна Т. М., Бабка В. М., Грищенко І. Ю. Ковзання частинки по рухомій горизонтальній площині. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. С. 147–155.
6. Ресурсо-енергоєфективні технології та технічні засоби для консервування та обробки вологого фуражного зерна: монографія / С. П. Степаненко, Р.А. Калініченко, Б. І. Котов. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2023. 128 с.
7. V. Adamchuk, V. Bulgakov, I. Gadzalo, S. Ivanovs, S. Stepanenko, I. Holovach, Y. Ihnatiev. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine. *Journal of latvia university of life sciences and technologies. Rural sustainability research*. 2021. Vol. 46(341). P. 116–124. <https://doi:10.2478/plua-2021-0023>.
8. S. Stepanenko, M. Aneliak, A. Kuzmych, S. Kustov, V. Lysaniuk. Improving the Efficiency of Harvesting Sunflower Seed Crops. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2022.Vol. 67(2). P. 331-340. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-34>.
9. Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Denisenko S., Bredykhina K. Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4(112/1). P. 54–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938>.
10. Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(10). P. 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
11. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the sunflower seed separation process



efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*. 2019. Vol. 50. P. 12-22. <https://doi.org/10.2298/apt1950012a>.

12. Котов Б. І., Деревенько В. А., Степаненко С. П. Дослідження ефективності сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решеті вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. Вип. №2(85). С. 99–102.

13. Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation / V. Bulgakov [et al.]. *Agronomy Research*. 2020. 18(S2). P. 1177–1188. <https://doi:10.15159/AR.20.069>.

14. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2020. 50 с.

15. 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.

16. Tatiana Volina, Sergiy Pylypaka, Olexandr Pavlenko, Oleksii Klochko and Iryna Hryshchenko (2021). The transportation of a particle by a vertical auger with a coaxial cylinder which rotate together around the common axis. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1164. e012086. <https://doi:10.1088/1757-899X/1164/1/012086>.

17. Andrii Lytvynenko, Mykola Yukhymenko, Ivan Pavlenko, Jan Pitel, Jana Mizakova, Olha Lytvynenko, Ruslan Ostroha and Jozef Bocko. Ensuring the Reliability of Pneumatic Classification Process for Granular Material in a Rhomb. *Shaped Apparatus. Appl. Sci.* 2019. Vol. 9. P. 1604. <https://doi:10.3390/app9081604>.

18. Ivan Pavlenko, Oleksandr Liaposhchenko, Marek Ochowiak, Radosław Olszewski, Maryna Demianenko, Oleksandr Starynskyi, Vitalii Ivanov, Vitalii Yanovych, Sylwia Włodarczak and Michał Doligalski Three-Dimensional Mathematical Model of the Liquid Film Downflow on a Vertical Surface. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 1938. <https://doi:10.3390/en13081938>.

19. Степаненко С. П., Волик Д.А., Котов Б.І., Замрій М.А. Математичне моделювання процесу переміщення зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. Вип. № 3 (110). С. 22-34. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-3-3>.

Стаття надійшла до редакції 05.08.2024 р.



S. Stepanenko¹, B. Kotov², V. Melnyk¹, D. Volyk¹

¹Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Ukraine;

²Podillia State University, Ukraine;

MODELING THE PROCESS OF GRAIN MATERIAL MOVEMENT IN THE SEPARATOR'S WORKING ZONE

Summary

Most designs of pneumatic centrifugal and vibro-centrifugal separators feature central axial material feed to the accelerator in the form of a flat disc. However, with this material feed method, the acceleration of particles closest to the axis of rotation is hindered due to the lack of initial velocity and insufficient centrifugal forces to overcome friction, leading to the formation of a stagnation zone and increased costs to mitigate. There are two approaches to solving this issue: feeding the material offset from the axis of rotation, which complicates the design, or using a deflector surface, which is a straight conical surface positioned parallel to the axis of rotation, ensuring the displacement of seed material away from the axis of rotation and imparting initial velocity to them.

A closed system of equations with a coupling equation has been obtained, allowing for the modeling of seed movement on a rotating surface. Numerical integration of this system enables the assessment of the effectiveness of various spreading surfaces in a pneumatic centrifugal separator to achieve desired outcomes, such as reducing geometric dimensions, increasing productivity, or improving separation quality. Numerical integration accounts for the influence of physical, geometric, technological, and kinematic parameters on the final result, including time and speed of movement in cylindrical coordinates. Modeling the movement of seeds on the spreading surface of a pneumatic centrifugal separator justifies the rational geometric dimensions of the rotor and optimal technological operating modes.

The application of seed material spreaders with curved surfaces in pneumatic centrifugal separators for accelerating seed movement is a promising approach in post-harvest processing. Modeling seed movement on such surfaces allows for the prediction of their motion with a comprehensive understanding of the impact of various parameters on the process of uniform distribution around the perimeter of the separator rotor channel. Numerical integration under real operating conditions assists in optimizing the spreader geometry and technological parameters to achieve the best results.

Key words: modeling, separator, movement process, grain material, working element, relative motion equation, surface equation, Lagrange multiplier.