

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2020-11-10>
УДК 631.362.3

Дослідження закономірностей руху частинок у вихровому повітряному потоці змінного за висотою радіуса

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»;

ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. І.,

д.т.н., проф., Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ);

ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Калініченко Р. А.,

к.т.н., доцент, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»;

ORCID ID 0000-0001-9325-1551

Анотація

Мета. Удосконалення математичного опису руху твердої частинки у вихровому повітряному потоці для випадку зміни радіуса закручування потоку в основному напрямку.

Методи. Специфіка питання, що розглядається, обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу рівнянь руху частинки у вигляді кулі у вихровому повітряному потоці кінцевого каналу з нерівномірним розподіленням швидкості повітряного потоку за висотою.

Результати. Розглянуто рух твердої частинки в повітряному середовищі всередині кінцевої аспіраційної камери з повітряно-проникненою поверхнею; крізь бічну поверхню конуса із жалюзійними щілинами (отворами) в тангенціальному напрямку всмоктується повітря, під дією штучно створених сил вихрового повітряного потоку відбувається ефективна інтенсифікація фракціонування зернового матеріалу.

Отримане рівняння руху частинки під час дії вихрового потоку повітря дозволяє визначити залежність швидкості руху частинки в шарі зернового матеріалу від ряду факторів: геометричних параметрів сепаратора, кута подачі матеріалу, початкового кінематичного режиму матеріалу, а також коефіцієнта вітрильності частинки.

Висновки. Сформульована вдосконалена математична модель динаміки руху твердої частинки у вихровому потоці, радіус «завихрення» якого збільшується в осьовому напрямку та дозволяє розраховувати траєкторії руху частинок, які різняться критичною швидкістю. Математичний опис процесу переміщення частинки у вихровому шарі можна використовувати як для опису процесу сепарації, так і теплових масообмінних процесів.

Ключові слова: змінна швидкість повітря, траєкторія, стійкість сил, фракції, вихровий повітряний потік, процес фракціонування, зернова суміш.

UDC 631.362.3

Investigation of the regularities of particle motion in a vortex air flow of radius variable in height

Stepanenko S. P.,

Ph.D., National Scientific Center "Institute of Agricultural Engineering and Electrification";

ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Kotov B. I.,

Dr. Tech. Sc., Prof., State Agrarian and Engineering University in Podilya;

ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Kalinichenko R. A.,

Ph.D., associate professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute";

ORCID ID 0000-0001-9325-1551

Annotation

Purpose. Improving the mathematical description of the motion of a solid particle in a vortex air flow for the case of changing the radius of twisting of the flow in the main direction.

Methods. The specificity of the question under consideration determines the analytical method of research based on the compilation and analysis of the equations of motion of the particle, in the form of a sphere in the vortex air flow of a conical channel with uneven distribution of air flow velocity over height.

Results. The motion of a solid particle in the air in the middle of a conical air-permeable surface is considered; air is sucked through the lateral surface of the cone with louver slits (holes) in the tangential direction, under the action of artificially created forces

of the vortex air flow there is an effective intensification of grain fractionation.

The obtained equation of particle motion under the action of vortex air flow allows to determine the dependence of material velocity in the grain material layer on a number of factors: geometric parameters of the separator, material feed angle, initial kinematic mode of the material and particle vitality coefficient.

Conclusions. Based on the analysis of the force interaction of a particle of grain material with a vortex air flow, an improved mathematical model of particle motion in a non-uniform field of air flow velocity in a conical channel is obtained.

Keywords: variable air velocity, trajectory, stability of forces, fractions, vortex air flow, fractionation process, grain mixture.

УДК 631.362.3

Исследование закономерностей движения частиц в вихревом воздушном потоке переменного по высоте радиуса

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»;

ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. И.,

д-р.т.н., проф., Подольский государственный аграрно-технический университет;

ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Калиниченко Р. А.,

к.т.н., доцент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины «Нежинский агротехнический институт»;

ORCID ID 0000-0001-9325-1551

Аннотация

Цель. Совершенствование математического описания движения твердой частицы в вихревом воздушном потоке для случая изменения радиуса закручивания потока в основном направлении.

Методы. Специфика рассматриваемого обуславливает аналитический метод исследования на основе составления и анализа уравнений движения частицы в виде шара в вихревом воздушном потоке конического канала при неравномерном распределении скорости воздушного потока по высоте.

Результаты. Рассмотрено движение твердой частицы в воздушной среде внутри конической аспирационной камеры с воздушно-проникающей поверхностью; через боковую поверхность конуса с жалюзийными щелями (отверстиями) в тангенциальном направлении всасывается воздух, под действием искусственно созданных сил вихревого воздушного потока происходит эффективная интенсификация фракционирования зернового материала.

Полученное уравнение движения частицы при воздействии вихревого потока воздуха позво-

ляет определить зависимость скорости движения материала в слое зернового материала от ряда факторов: геометрических параметров сепаратора, угла подачи материала, начального кинематического режима материала, а также коэффициента парусности частицы.

Выводы. На основе анализа силового взаимодействия частицы зернового материала с вихревым воздушным потоком получена усовершенствованная математическая модель движения частицы в неравномерном поле скорости воздушного потока в коническом канале.

Ключевые слова: переменная скорость воздуха, траектория, устойчивость сил, фракции, вихревой воздушный поток, процесс фракционирования, зерновая смесь.

Постановка проблеми. Сучасні машини для сепарації зернових матеріалів із пневматичними системами розділення зернового потоку на компоненти зазвичай використовують вертикальні канали. У вертикальних каналах будь-якої форми перетину швидкість

повітряного потоку не перевищує критичну швидкість частинок «важкого» компонента, що значно обмежує пропускну здатність (продуктивність) зерноочисних машин. До того ж існують різноманітні конструкції пневмосепараторів із вертикальним каналом, однією загальною ознакою їх є використання поля сил тяжіння. У пошуках способів підвищення ефективності повітряної сепарації почали застосовувати поділ компонентів на фракції під дією зовнішніх індукційних сил, які вразі перевищують сили тяжіння. Найбільший ефект досягається за використання поля відцентрових сил. За використання вихрових, спіралеподібних потоків у відцентрово гравітаційних пневмосепараторах циклонного типу підвищення поділу досягається одночасним використанням відцентрових, коріолісових і гравітаційних сил.

В основі теорії циклонних процесів лежать закони відносного переміщення оброблених частинок у криволінійному (обертальному) потоці повітря. Зазвичай під час складання математичного опису руху компонентів полідисперсного матеріалу не враховують дію гравітаційного поля й приймають припущення про рух частинки разом із повітрям в осьовому напрямку, а опір частинки повітряному потоку за законом Стокса. Такі спрощення допустимі в дослідженнях видалення частинок пиловидних фракцій розміром до 200 мкм із повітряного потоку (пилоочищення). Завдання сепарації компонентів зернового матеріалу полягає у виділенні легких компонентів із зернового потоку повітряними струменями, саме цей процес потребує додаткових теоретичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати детальних досліджень структури потоків, закручення з використанням різних типів завихрювачів з основами теорії математичного моделювання закручених (вихрових) потоків, даних експериментальних досліджень досить повно висвітлено у фундаментальних роботах [1, 2]. У роботах [3–7] розглянуто питання силової взаємодії частинки твердого матеріалу з криволінійним (обертальним) потоком газу. У роботі [3] для розрахунку траєкторій частинок у вихровому потоці запропонована математична модель із трьох диференціальних рівнянь (записаних із використанням системи координат Лагранжа), які описують зміну складових швидкості частинки в радіальному, тангенціальному та осьовому напрямках. У роботі [10] дано числовий розв'язок зазначеної

системи рівнянь. В обох роботах використано припущення про Стоксовський закон для сили опору повітряного потоку. У роботах [4–6], виходячи з різних теоретичних посилянь, сформульовані математичні моделі руху крапельного та пилового потоків у вихровій камері. Враховуючи, що сила тяжіння в десятки разів менша за відцентрову, осьовий гравітаційний рух не розглядається, а сила опору пропорційна відносній швидкості повітря (Стоксовський опір). У монографії [7] розглядається двовимірний рух пиловидних частинок (низхідна спіраль), на основі теорії вихрового і безвихрового рухів наведено систему рівнянь (у полярних координатах), яка описує рух частинки в обертальному потоці газу за умови в'язкого опору частинки. Аналогічні математичні моделі використано в роботах [8, 9]. У роботах [11, 12] проведено аналіз сил, що діють на частинку під час взаємодії з криволінійним повітряним потоком, унаслідок якого обґрунтовано можливість нехтування силами Магнуса-Жуковського, приєднаної маси, силою, що зумовлена переходом частинки в загальмовані шари потоку, а також силою Архімеда. Слід зазначити, що в роботах [3, 9] нехтують силою тяжіння.

У роботі [13] наведено математичний опис руху частинки (у полярних координатах), що складається з рівнянь переміщення частинки, аналогічних розглянутим вище [7–9], але сила опору прийнята пропорційною відносній швидкості в другому степені (закон опору за Ньютоном). Система рівнянь, на думку автора, повинна описувати процес переміщення частинки у вихровому потоці «конічної камери». Але швидкість потоку повітря в конічній камері розподілена в просторі, тобто радіальна, тангенціальна та осьова складові не є постійними величинами, а змінюються і за радіусом, і за висотою [14]. Причому знаки в рівнянні осьового переміщення не відповідають схемі процесу.

Отже, для дослідження закономірностей руху твердої частинки у вихровому потоці змінного за висотою радіуса необхідно мати математичний опис динаміки руху частинки в конічній камері з тангенціальним введенням потоку.

Мета досліджень. Удосконалення математичного опису руху твердої частинки у вихровому повітряному потоці для випадку зміни радіуса закручування потоку в осьовому напрямку.

Методи досліджень. Специфіка питання, що розглядається, обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу рівнянь руху частинки у вигляді кулі у вихровому повітряному потоці кінцевого каналу з нерівномірним розподіленням швидкості повітряного потоку за висотою.

Результати досліджень. Розглянуто рух твердої частинки в повітряному середовищі всередині конічної повітряно-проникненої поверхні; крізь бічну поверхню конуса із жалюзійними щілинами (отворами) в тангенціальному напрямку всмоктується повітря (з об'ємними витратами Q). Щільові отвори розміщені на бічній поверхні так, щоби виконувалась умова $\omega = \vartheta_{T_1}/R_1 = \text{const}$ по всій висоті конуса (ω, ϑ_{T_1} – кутова і тангенціальна швидкості повітряного середовища; R_1 – радіус поперечного перетину конуса).

Розрахункова схема наведена на рисунку 1, у даному разі фізична модель моделює пневмовихровий зерносепаратор, опис якого наведено в роботах [16, 17].

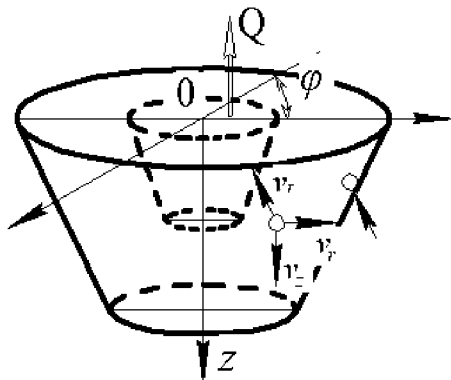


Рис. 1. Схема руху потоків
Fig. 1. The scheme of flows

Під час формулювання математичного опису руху твердої частинки у вихровому (спіральному) повітряному потоці, як вказано на рисунку 1, радіус закручування якого змінюється в осьовому напрямку, за наявності «радіального стоку» [4–6] враховано наступні загально прийняті спрощувані припущення: розглядається рух однієї твердої (недеформованої) частинки без врахування взаємодії з поверхнею конуса; обертання частинки навколо своєї осі не розглядається; початок координат – у верхній частині конуса; у початковий момент часу частинка знаходиться в пристінній зоні верхнього краю конуса; частинка рухається по низхідній траєкторії; всередині конуса діє «радіальний стік» повітря. Радіальні складові швидкості перешкоджають відцентровому

руху частинок [4, 6] і визначають крупність частинок, які можуть виноситися потоком з об'єму кінцічного простору назовні; відведення потоку повітря (відсмоктування) відбувається у верхній частині конуса; виведення твердої фази – з нижньої частини конуса.

Відповідно до вихрової теорії [5, 7] прийнято, що обертання повітряного потоку уніформно з його швидкістю й характеризується радіальним ω_r , азимутальним ω_φ та осьовим ω_z її компонентами, а тангенціальна швидкість зв'язана з поточним радіусом співвідношенням:

$$\omega_i = \omega_{Ti}/R_i. \quad (1)$$

Завизначених припущень і схеми організації відносного руху потоків (твердих частинок і повітря) траєкторії руху частинки визначаються диференціальними рівняннями [5, 7, 9], які в полярних координатах (двовимірного простору) мають вигляд:

$$I_p = \frac{F_p}{m} = \frac{dv_p(t)}{dt} - \frac{v_T^2(t)}{r}; \quad (2)$$

$$I_T = \frac{F_T}{m} = \frac{dv_T(t)}{dt} + \frac{v_p(t) \cdot v_T(t)}{r}; \quad (3)$$

$$I_z = \frac{F_z}{m} = g - \frac{dv_z(t)}{dt}; \quad (4)$$

$$F = C(R_e) \frac{\rho}{r} S \cdot u^2(t); \quad (5)$$

$$u_p = v_p - \omega_p(z, r); u_T = v_T - \omega_T(z, r), (6)$$

де I_p, I_T, I_z – прискорення частинки в радіальному, тангенціальному (кутовому) та осьовому напрямках;

$$m = \rho_r \frac{\pi d^3}{6} - \text{масса частилки;}$$

F – аеродинамічна сила (сила опору);

d, δ_r – діаметр частинки та її густина;

ρ – густина повітря;

$$S = \frac{\pi d^2}{4} - \text{площа міделевого перетину};$$

u — відносна швидкість (швидкість обтікання);

g – прискорення вільного падіння;

v_n, v_T, v_z – проекції швидкості частинки;

 $\omega_p, \omega_T, \omega_z$ – проекції швидкості потоку;

u_r, u_τ, u_z , — проекції швидкості потоку;
 u_r, u_τ, u_z , — проекції відносної швидкості
 ПОТОКУ;

$$Re = \frac{du}{\nu} - \text{критерій Рейнольдса;}$$

$$C(R_e) = AR_e^n$$
 – коефіцієнт аеродинамічного опору.

До цих рівнянь слід додати рівняння кінематики

$$\frac{dr}{dt} = v_p(t); \quad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_T(t)}{r}; \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega; \quad \frac{dz(t)}{dt} = v_z(t) \quad (7)$$

Рівняння (2–4) – суттєво нелінійні як за формою рівнянь, так і за нелінійною залежністю коефіцієнта опору $C(R_e)$ і можуть бути розв’язані численними методами у вигляді залежностей $r(\varphi, z, \tau)$ за таких початкових і граничних умов:

$$t = 0; \quad R = R_0; \quad Z = 0; \quad \varphi = \varphi_0; \quad v_z = v_0; \quad v_p = 0; \quad v_T = 0; \quad v_T = v_{\text{вх}}.$$

Визначимо залежності складових швидкості потоку від координат $v_R(r, z); v_T(r, z); v_z(r)$.

Величина радіальної швидкості повітря відповідно до [6, 7] визначається за величиною Φ :

$$\Phi = \frac{Q_1}{2\pi H}, \quad (8)$$

де Φ – стік на одиниці висоти H конуса.

Швидкість потоку в радіальному напрямку буде визначатися:

$$v = \frac{\Phi}{r(z)}. \quad (9)$$

У геометричних співвідношеннях для перетину конуса матимемо:

$$r(z) = R_1 - z \tan \gamma, \quad (10)$$

де γ – половина кута розкриття конуса;

R_1 – діаметр більшої основи конуса.

Із співвідношення (9) до (10) отримаємо радіальну швидкість у точці з координатами r_i, z_i

$$\omega(z)_i = \frac{\Phi}{r_i - z_i \tan \gamma} = \omega_p(r_i, z_i). \quad (11)$$

Складова тангенціальної швидкості $\omega_T(r, z)$ визначиться із співвідношення (11):

$$\omega_T(r, z) = r(z) \omega$$

або

$$\omega_T(r, z) = (r - z \tan \gamma). \quad (12)$$

Осьова складова швидкості потоку в конусі змінюється відповідно до рівняння нерозривності, оскільки змінюється площа поперечного перерізу $S(z)$:

$$\omega(z) = \frac{Q}{S(z)}. \quad (13)$$

Радіус конуса змінюється відповідно до співвідношення (10) або, враховуючи, що $\tan \gamma = \frac{R_1 - R_2}{H}$, за формулою:

$$R(z) = R - \frac{z}{H} (R_1 - R_2) = R \left(1 - \frac{z}{H} \tan \gamma \right). \quad (14)$$

Площа поперечного перетину:

$$S(z) = \pi [R(z)]^2 = \pi R_1^2 \left[1 - \frac{z}{H} \tan \gamma \right]^2 = S_0 \left[1 - \frac{z}{R} (1 - \tan \gamma) \right]^2. \quad (15)$$

Середня швидкість у перетині вздовж осі OZ

$$\omega(z) = \frac{Q}{S(z)} = \omega_0(z) \left[1 - \frac{z}{H} tq\gamma \right]^{-2}. \quad (16)$$

Локальна швидкість (осьова) у поперечному перетині, як експериментально визначено в [14], залежить від координати r і цю залежність можна апроксимувати лінійним співвідношенням:

$$\frac{\omega_z(r)}{\omega_{cp}} = a + b \frac{r}{R_1}, \quad (17)$$

де a, b – коефіцієнти лінійної апроксимації.

Тоді з урахуванням (16) із виразу (17) матимемо:

$$\omega'_z(r, z) = \left(a + b \frac{r}{R_1} \right) \omega_0 \left[1 - \frac{z}{H} tq\gamma \right]^{-2}. \quad (18)$$

Без урахування зміни локальної осьової швидкості за радіусом вихрового потоку осьову швидкість визначено за спрощеною формулою, отримано з геометричних співвідношень:

$$\omega_z(r, z) = \frac{Q}{S_0 \left(1 - \frac{z}{H} \left(1 - \frac{r}{R_1} \right) \right)}. \quad (19)$$

Використовуючи запис сили аеродинамічного опору через коефіцієнт вітрильності k_{Π}

$$F = m \cdot k_{\Pi} u^2, \quad (20)$$

де $k_{\Pi} = C(R_e) \frac{\rho}{r} S \frac{1}{m} = \frac{g}{v_{\text{вит}}}$;

$v_{\text{вит}}$ – швидкість витання частинки (критична швидкість),

та підставляючи значення складових співвідношень (5)–(7), (11), (12), (20) у рівняння (2)–(4), остаточно матимемо:

$$\frac{d^2 r(t, z)}{dt^2} - r \left(\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \right)^2 = k_v \left(\frac{\Phi}{r - z tq\gamma} - \frac{dr(t, z)}{dt} \right)^2, \quad (21)$$

$$\frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} - 2 \frac{dr(t, z)}{dt} \cdot \frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} = k_v \left((r - z tq\gamma) \omega - r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2, \quad (22)$$

$$\frac{d^2 z(t, r)}{dt^2} + q = -k_v \left(\frac{Q}{S_0 \left(1 - \frac{z}{H} \left(1 - \frac{r}{R_1} \right) \right)} + \frac{dz(t, r)}{dt} \right)^2. \quad (23)$$

Система рівнянь (21)–(23) із граничними та початковими умовами:

$$\begin{aligned} z = 0; \quad r = R_1; \quad z = h; \quad r = R_2; \quad S = S_0; \quad t = 0; \quad r = r_0 = R_1; \quad \varphi = 0; \\ Z = 0; \quad v_p = 0; \quad v_r = v_{\text{вх}}; \quad v_z = v_{z0}. \end{aligned}$$

Величина радіальної швидкості повітря Φ описує рух частинки у вихровому потоці повітря, радіус «закрутки» якого зменшується в напрямку руху частинки.

Для визначення характеру розподілу швидкості вводу повітря тангенціально поверхні конуса за його висотою переписемо рівняння (2) як

$$\frac{d^2 r(t)}{dt^2} - r \omega^2 - k_v \left(\frac{dr(t)}{dt} - \omega_r \right)^2 = 0. \quad (24)$$

Оскільки кут обертання частинки φ навколо осі конуса пропорційно залежить від часу t

$$dt = \frac{1}{\omega} d\varphi, \quad (25)$$

то, замінюючи в рівнянні (24) зміну часу зміною кута $\varphi(t)$, отримаємо рівняння траєкторії плоского руху частинки в полярних координатах (r, φ) для будь-якого поперечного перетину конуса з координатами z_i, r_i :

$$\omega \frac{d^2 r}{d\varphi^2} - r \omega^2 - k_v \left(\frac{dr}{d\varphi} \omega - \omega_{\text{Т ВХ}} \right)^2 = 0. \quad (26)$$

Наприклад, для установки, опис якої наведено в роботах [15, 16, 18], за виконання умови (1) розподіл швидкості повітря на вході в тангенціальні щілини можна наближено оцінити лінійною залежністю:

$$\omega_{\text{Т ВХ}} = b - c h, \quad (27)$$

де $b = 9,8$;

$c = 62,5$ – коефіцієнт лінеаризації залежності $\omega_{\text{Т ВХ}}(h)$;

h – коефіцієнти висоти конуса, $h = 0 \dots 0,13$ м).

На рисунку 2 наведена графічна залежність швидкостей повітря на вході в завихрювальні щілини за висотою та за радіусом.

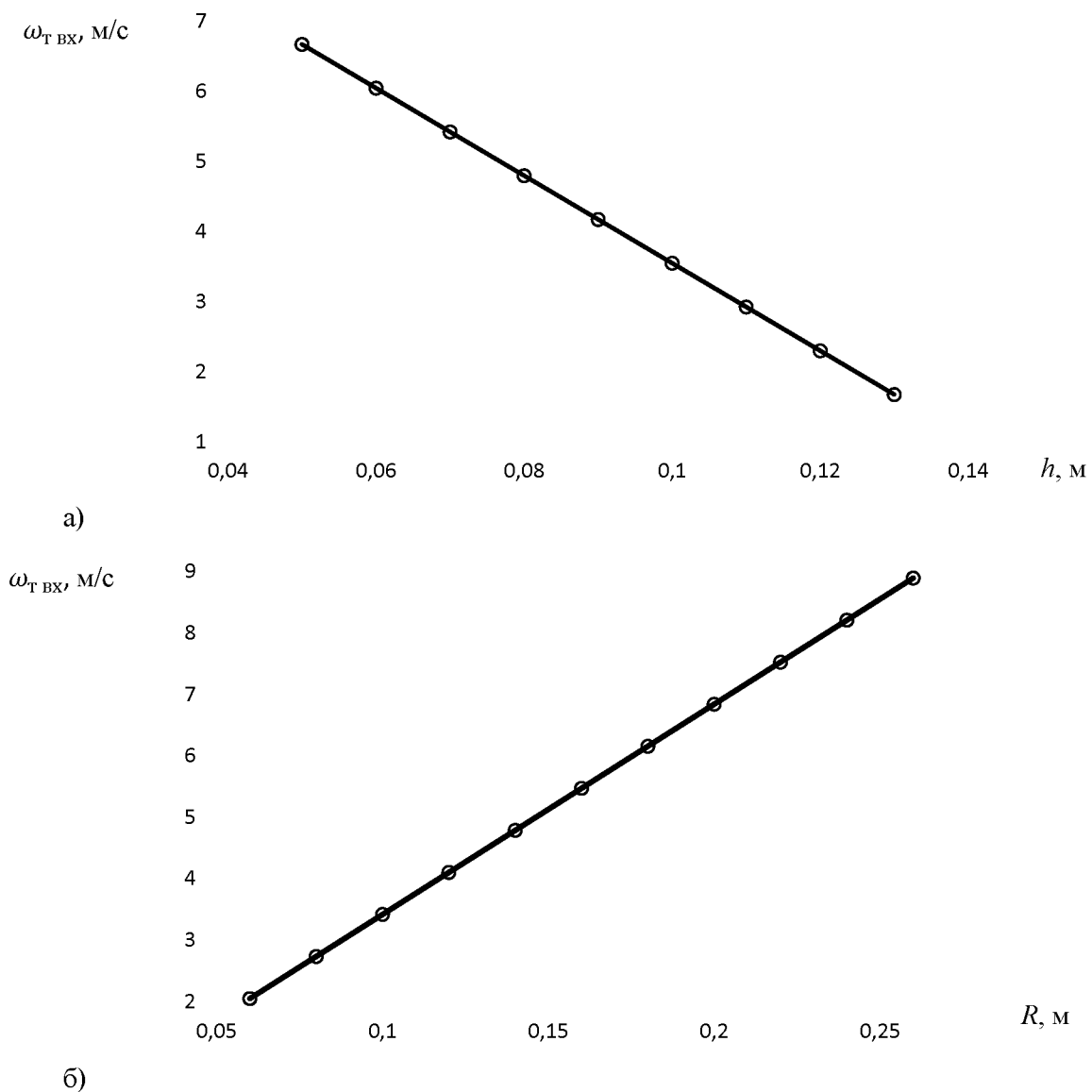


Рис. 2. Швидкості повітря на вході в завихрювальні щілини:

а) – за висотою; б) – за радіусом

Fig. 2. Air velocities at the entrance to the swirl slits:

а) – in height; б) – by radius

З аналізу отриманої графічної залежності (рис. 2) можливо зробити висновок, що частинки, швидкість витання яких буде менша за 8 м/с, будуть видалятися і виноситися у верхній зоні конуса, а частинки, швидкість витання яких менша за 3 м/с, будуть видалятися із пневмозваженого шару зерна в нижній зоні.

Отже, для кожного перетину конуса на висоті h_i можна визначити величину вхідної швидкості $v_{вх}$ для кожної частинки, яка характеризується коефіцієнтом $k_{п} = \frac{g}{\omega_{вх}^2}$, і розрахувати траєкторію руху на площині перетину (h_i, R_i) за рівнянням (26). Величина кутової швидкості потоку ω визначається для середнього радіуса конуса:

$$\omega = \frac{\omega_{вх,ср}}{R_{ср}}; \quad \omega_{вх,ср} = \frac{Q}{S_{п}},$$

де S — загальна площа тангенціальних щілин.

Висновки

1. Сформульована вдосконалена математична модель динаміки руху твердої частинки у вихровому потоці, радіус «крутки» (завихрення) якого збільшується в осьовому напрямку та дозволяє розраховувати траєкторії руху частинок, які різняться критичною швидкістю.

2. Математичний опис процесу переміщення частинки у вихровому шарі можна використовувати як для опису процесу сепарації, так і теплових масообмінних процесів.

Бібліографія

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Д. Закрученные потоки. Москва, 1987. 588 с.
2. Шукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. Москва, 1988. 200 с.
3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. Москва, 1971. 536 с.
4. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Москва, 1961. 272 с.
5. Ушаков С. Г., Зверев Н. И. Инерционная сепарация пыли. Москва, 1974. 168 с.
6. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. Москва, 1981. 296 с.
7. Страус В. С. Промышленная очистка газов. Москва, 1971. 671 с.

8. Куц В. П. Научно-практические основы создания высокоэффективного пылоочистного оборудования комбинированной д.д.: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Тернопільський нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. Тернопіль, 2015. 40 с.

9. Кочергин Н. М. Исследование процесса очистки газов от пыли в циклонах: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Львов, 1987. 20 с.

10. Мартынов С. В., Мартынов Ю. В., Юрченко В. Н. О сепарации частиц в прямоточном гидроциклоне. Препринт № 493 Институт проблем механики АН СССР. Москва, 1991. 34 с.

11. Стоянов Н. И. Исследование пылеулавливателей с неподвижными вращающимися устройствами: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Одесса, 1982. 21 с.

12. Степанов Г. Ю., Зицер И. М. Инерционные воздухоочистители. Москва, 1986. 181 с.

13. Прилуцкий А. Н. Обоснования пневмовихровидцентрового способу і конструкції пристрою для сепарації зернових сумішей. *Сільськогосподарські машини*. 2009. Вип. 28. С. 61–67.

14. Косенко Н. О. Очистка вентиляционных выкидов у вихрових прямоточних апаратах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2004. 19 с.

15. Котов Б. И., Степаненко С. П., Гриценко В. О. Анализ знепилювання повітряних потоків в прямоточному циклоні з поперечно-поточною сепарацією. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2019. Вип. 205. С. 275–279.

16. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10. № 4. Pp. 147–153.

17. Степаненко С. П., Котов Б. И. Теоретичні дослідження руху повітряного потоку при введенні в нього зернових сумішей. *Вісник ЛНАУ. Агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 47–52.

18. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков. Киев, 1989. 192 с.

Bibliography

1. Gupta, A., Lilli, D., Sayred, D. (1987). *Zakrucheniye potoki*. Moskva. 588 s.
2. Shchukyn, V. K. (1988). *Teploobmen, masoobmen i gidrodinamyka zakruchenykh potokov v ossimetrichnykh kanalakh*. Moskva. 200 s.
3. Sou, S. (1971). *Gidrodinamyka mnogo-faznykh sistem*. Moskva. 356 s.
4. Pirumov, A. I. (1961). *Aerodinamicheskiye osnovy inertsionnoy separatsii*. Moskva. 272 s.
5. Ushakov, S. G., Zverev, N. I. (1974). *Inertsionnaya separatsiya pyli*. Moskva. 168 s.
6. Pirumov, A. I. (1981). *Obespylivaniye vozdukha*. Moskva. 296 s.
7. Straus, V. S. (1971). *Promyshlinaya ochistka gazov*. Moskva. 671 s.

8. Kuts, V. P. (2015). Naukovo-praktichni osnovi stvorenniya visokoefektivnogo piloochisnogo obladnannya kombinovanoi dii : avtoref. dis. ... dokt. techn. nauk. Ternopil'. 40 s.
9. Kochergin, N. M. (1987). Isledovaniya protsesa ochistki gazov ot pyli v tsyklonakh : avtoref. dis. ... dokt. techn. nauk. L'viv. 20 s.
10. Martynov, S. V., Martynov, YU. V., Yurchenko, V. N. (1991). O separatsii chastits v pryamotokhnom gidrotsiklone. (Preprint № 493). Institut problem mekhaniki AN SSSR. Moskva. 34 s.
11. Stoyanov, N. I. (1982). Issledovaniye pyleulavivateley s nepodvizhnymi vrashchayushchimisya ustroystvami : avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. Odessa. 21 s.
12. Stepanov, G. YU., Zitser, I. M. (1986). Inertsionnyye vozdukhoochistiteli. Moskva. 181 s.
13. Prilutskiy, A. N. (2009). Obgruntuvannya pnevmovikhrovidtsentrovoho sposobu i konstruktsiyi prystroyu dlya separatsiyi zernovykh sumishey. *Sil'skohospodars'ki mashyny*, vyp. 28, 61–67.
14. Kosenko, N. O. (2004). Ochistka ventilyatsiynikh vikidiv u vikhrovikh pryamotokhnikh aparatakh : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Kharkiv. 19 s.
15. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., Gritsenko, V. O. (2019). Analiz zneplyuvannya povitryanykh potokiv v pryamuyuchomu tsykloni z poperechno-potochnoyu separatsiyi. *Visnyk KHNTUS-H im. P. Vasilenka*, vyp. 205, 275–279.
16. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, vol. 10, no. 4, 147–153.
17. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). Teoretychni doslidzhennya rukhu povitryanoho potoku pry vvedenni v n'oho zernovykh sumishey. *Visnyk LNAU. Ahroinzhenerni doslidzhennya*, 22, 47–52.
18. Khalatov, A. A. (1989). Teoriya i praktika zakruchenykh potokov. Kiev. 192 s.
4. Pirumov, A. I. (1961). Aerodynamic principles of inertial separation. Moscow [in Russian].
5. Ushakov, S. G., & Zverev, N. I. (1974). Inertial dust separation. Moscow [in Russian].
6. Pirumov, A. I. (1981). Dust removal of air. Moscow [in Russian].
7. Straus, V. S. (1971). Industrial gas cleaning. Moscow [in Russian].
8. Kuts, V. P. (2015). Scientific and practical bases of creation of the highly effective dust-cleaning equipment of the combined action. (Doctoral thesis). Ternopil [in Ukrainian].
9. Kochergin, N. M. (1987). Investigation of the process of gas cleaning from dust in cyclones. (Doctoral thesis). Lviv [in Ukrainian].
10. Martynov, S. V., Martynov, YU. V., & Yurchenko, V. N. (1991). On the separation of particles in a once-through hydrocyclone. (Preprint no. 493). Moscow : Institute of problems of mechanics, USSR Academy of Sciences. [in Russian].
11. Stoyanov, N. I. (1982). Investigation of dust collectors with fixed rotating devices. (Doctoral thesis). Odessa [in Ukrainian].
12. Stepanov, G. YU., & Zitser, I. M. (1986). Inertia lair cleaner. Moscow [in Russian].
13. Prilutskiy, A. N. (2009). Substantiation of the pneumatic vortex centrifugal method and the design of the device for separation of grain mixtures. *Agricultural machinery*, 28, 61–67 [in Ukrainian].
14. Kosenko, N. O. (2004). Cleaning of ventilation emissions in vortex direct-flow devices. (Master's thesis). Kharkiv [in Ukrainian].
15. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Gritsenko, V. O. (2019). Analysis of degusting of air streams in a direct cyclone with cross-flow separation. *Bulletin of KhNTUSG named after P. Vasilenko*, 205, 275–279 [in Ukrainian].
16. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2019). Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*, vol. 10, no. 4, 147–153 [in English].
17. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2018). Theoretical studies of air flow during the introduction of grain mixtures. *Bulletin of LNAU. Agro engineering researches*, 22, 47–52 [in Ukrainian].
18. Khalatov, A. A. (1989). Theory and practice of swirling flows. Kiev [in Ukrainian].

References

1. Gupta, A., Lilli, D., & Sayred, D. (1987). Swirling flows. Moscow [in Russian].
2. Schukyn, V. K. (1988). Heat transfer, masstransfer and hydrodynamics of swirling flows in asymmetric channels. Moscow [in Russian].
3. Sow, S. (1971). Hydrodynamics of multiphase systems. Moscow [in Russian].