

УДК 631.333.5:514.18

РУХ ЧАСТИНКИ ПО СФЕРИЧНОМУ СЕГМЕНТУ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ РАДІАЛЬНО ВСТАНОВЛЕНИМИ ЛОПАТКАМИ

Воліна Т. М.¹, Пилипака С. Ф.¹, Несвідомін А. В.¹

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація: Розглянуто відносний рух частинки по внутрішній поверхні горизонтального сферичного диска вздовж вертикальної лопатки, встановленої у радіальному напрямі. Диск обертається навколо вертикальної осі із заданою кутовою швидкістю. Складено систему диференціальних рівнянь руху частинки, яку розв'язано чисельними методами. Знайдено кінематичні характеристики, з'ясовано закономірності відносного руху частинки по поверхні циліндра. Побудовано графіки, що характеризують рух частинки при певних заданих параметрах, а саме: графік зміни кута, що задає положення точки на поверхні сфери в напрямі меридіана, графіки зміни абсолютної і відносної швидкостей, графіки зміни сили реакції сферичного диска і лопатки. Чисельне інтегрування отриманого диференціального рівняння показало, що за півсекунди частинка підіймається на висоту півсфери, а потім починає опускатися. При цьому опускання чергується з підйомом до повної зупинки частинки на певній висоті, тобто частинка «залипає» і далі обертається разом з півсферою. Кут «залипання» може бути знайдено аналітично. Крім того, чисельні методи обчислень показали, що при нульовому значенні коефіцієнта тертя частинки по поверхні диска, тобто при абсолютно гладенькій його поверхні, і ненульовому – по поверхні лопатки, та при необмеженому зростанні кутової швидкості обертання диска частинка «залипає» на висоті центра сфери. Якщо ж обидві поверхні абсолютно гладенькі, то затухаючі коливання кута, що задає положення точки на поверхні сфери у напрямі меридіана, відбуваються нескінченно довго. Робоча поверхня диска відцентрового апарата, виготовлена у вигляді сферичного сегмента, забезпечує початок польоту частинки в момент сходження з диска під заданим кутом до горизонтальної площини, збільшуючи площу розсіювання технологічного матеріалу. Отриманий у статті аналітичний опис руху частинки дає можливість дослідити її розгін по диску вздовж лопаток та знайти відносну і абсолютну швидкості в момент сходження частинки із диска. Знайдені аналітичні залежності дозволяють визначати вплив конструктивних та технологічних параметрів на процес розгону частинки.

Ключові слова: сферичний диск, робоча поверхня, частинка, система координат, абсолютна швидкість.

PARTICLE MOTION ON THE SPHERICAL SEGMENT WITH VERTICALS RADIALY INSTALLED BLADES

T. Volina¹, S. Pylypaka¹, A. Nesvidomin¹

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Abstract: The relative motion of a particle on the inner surface of a horizontal spherical disk along a vertical blade mounted in the radial direction is considered in the article. The disk rotates around a vertical axis with a given angular velocity. A system of differential equations of motion of a particle is compiled and solved by numerical methods. The kinematic characteristics of the motion are found, the regularities of the relative motion of the particle on the surface of the cylinder are clarified. Graphs characterizing the motion of a particle at certain given parameters are constructed, namely: graph of angle change, which sets the position of the particle on the surface of the sphere in the direction of the meridian, graphs of absolute and relative velocities, graphs of change of forces of the reaction of the spherical disk and blade. Numerical integration of the obtained differential equation



showed that in half a second the particle rises to the height of the hemisphere, and then begins to fall. In this case, the descent alternates with the rise to a complete stop of the particle at a certain height, i.e. the particle “sticks” and then rotates with the hemisphere. The angle of “sticking” can be found analytically. In addition, numerical calculation methods have shown that at zero value of the friction coefficient of the particle on the disk surface, i.e. at its absolutely smooth surface, and at the non-zero value of the friction coefficient of the blade surface, and at an unlimited increase of the disk angular velocity the particle “sticks” at the height of the center of the sphere. If both surfaces are absolutely smooth, then the damping oscillations of the angle that determines the position of the particle on the surface of the sphere in the direction of the meridian, occur indefinitely. The working surface of the disk of the centrifugal apparatus, which is made in the form of a spherical segment, provides the beginning of the flight of the particle at the time of ascent from the disk at a given angle to the horizontal plane, increasing the scattering area of the technological material. The analytical description of the particle motion obtained in the article makes it possible to investigate its acceleration along with the blades of the disk and to find the relative and absolute velocities at the moment of particle ascent from the disk. The found analytical dependencies allow determining the influence of constructive and technological parameters on the process of particle acceleration.

Keywords: spherical disk, working surface, particle, coordinate system, absolute velocity.

1 ВСТУП

Для розсіювання мінеральних добрив застосовують апарати відцентрового типу. Їхні робочі органи можуть мати різну конструкцію. Принцип роботи таких апаратів полягає в тому, що матеріальна частинка, тобто частинка добрива, ковзає по робочій поверхні, яка обертається навколо вертикальної осі і під дією відцентрової сили розганяється і рухається до периферії від осі обертання [1]. Для збільшення швидкості розгону такі апарати додатково укомплектовують вертикальними лопатками, вздовж яких змушена рухатися частинка в радіальному напрямі. Від форми та конструктивних параметрів робочих органів апарату залежать кінематичні характеристики руху технологічного матеріалу. Дослідження закономірностей руху частинки в залежності від форми та конструктивних особливостей робочих органів дозволяє покращити конструкцію апарату.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Рух матеріальних частинок по поверхнях розглядається у наукових статтях у контексті їхньої природи: це можуть бути механічні частинки, частинки газу чи рідини, частинки у потоці тощо. Звісно, рух окремої частинки не може бути ідентифіковано з рухом тіла або технологічного матеріалу, який складається з окремих частинок та під час дослідження руху якого мають бути враховані сили інерції, що виникають під час обертання тіла. У деяких випадках при незначних кутових швидкостях ці сили можуть бути проігноровані, як, наприклад, при дослідженні руху частинки по зовнішній поверхні циліндра, що здійснює поступальні коливання в горизонтальних площинах [2]. Проте, на основі руху окремої частинки можливо ідентифікувати залежності, що можуть бути застосовані до тіла або до технологічного матеріалу чи допомагають визначити напрям подальших досліджень. Так, науковцями розглянуто рух матеріальних частинок по рухомим спіральним робочим органам [3]; по рухомій хвилястій площині [4]; по гвинтовій поверхні [5]; по гравітаційному спуску, утвореному поверхнею косоного закритого гелікоїда [6]; переміщення частинки вертикальним шнеком при стаціонарному режимі [7] та горизонтальним шнеком, обмеженим співвісним нерухомим циліндром [8]. Крім того, у праці [9] розглянуто рух частинки по краю похилого плоского еліпса, що обертається навколо осі вертикального обмежувального циліндра. Найбільш близьким до питання, яке розглядається у даній статті, дослідженням є рух частинки по сферичному сегменту, який обертається навколо вертикальної осі [10]. Отже, для вивчення руху частинки в залежності від конструктивних параметрів поверхні необхідно мати аналітичні залежності, що описують такий рух.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідити закономірності руху матеріальних частинок у відцентровому апараті у вигляді поверхні сферичного сегмента із радіально розташованими вертикальними лопатками.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запишемо параметричні рівняння сфери із початком координат в її нижньому полюсі:

$$X = R \sin \varepsilon \cos \alpha; \quad Y = R \sin \varepsilon \sin \alpha; \quad Z = R(1 - \cos \varepsilon), \quad (1)$$

де R – радіус сфери;

ε, α – незалежні змінні сфери, якими є кути, що задають положення точки на поверхні сфери в напрямі меридіана і паралелі відповідно.

Сферичний сегмент потрібної форми задається двома конструктивними параметрами: кутом підйому β частинки в момент її сходження із поверхні сегмента вздовж вертикальної лопатки і діаметром d (рис. 1). Виходячи із цих умов, знаходимо радіус R сфери:

$$R = \frac{d}{2 \sin \beta}. \quad (2)$$

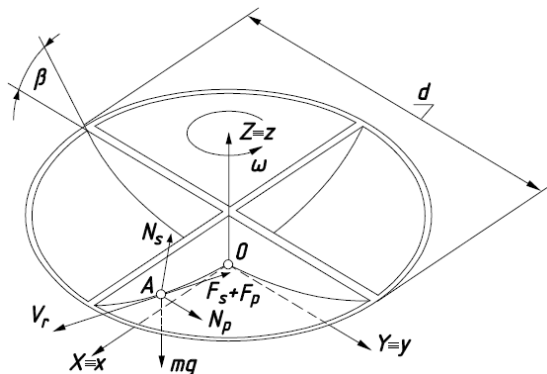


Рис. 1. Робочий орган відцентрового апарату з вертикальними лопатками та положення матеріальної частинки в точці A із прикладеними до неї силами

Щоб побудувати за рівняннями (1) сферичний сегмент із заданими конструктивними параметрами d, β і R згідно формули (2), кути ε і α повинні змінюватися в наступних межах: $\varepsilon = 0 \dots \beta$, $\alpha = 0 \dots 2\pi$.

Матеріальна частинка під час обертання диска із кутовою швидкістю ω буде мати контакт із поверхнями сегмента і лопатки і ковзати вздовж їхньої спільної лінії – кола радіуса R . Його рівняння отримаємо із (1) при $\alpha = 0$:

$$x = R \sin \varepsilon; \quad y = 0; \quad z = R(1 - \cos \varepsilon). \quad (3)$$

Лінія (3) є траєкторією відносного руху частинки, тобто траєкторією її ковзання. Під час обертання диска за якийсь час t крива разом із диском повернеться на кут $\theta = \omega t$. За цей час частинка переміститься по кривій (3) в сторону периферії диска (рис. 2). Процес руху частинки будемо описувати по відношенню до двох систем координат: нерухомої $OXYZ$ і рухомої $Ox_1y_1z_1$. Рухома система координат жорстко прив'язана до диска і обертається разом із ним. У початковий момент ці дві системи збігаються (рис. 1).

Задамо відносну траєкторію руху частинки по кривій (3) у вигляді залежності $\varepsilon = \varepsilon(t)$, яку необхідно в кінцевому підсумку розшукати.

Знайдемо абсолютну траєкторію руху частинки. За час t вона здійснила відносне переміщення по кривій за рівняннями (3), де величина кута ε є функцією часу t і поворот на кут $\theta = \omega t$ (рис. 2). Вертикальна координата для обох систем однакова: $Oz \equiv Oz_1$. Отже абсолютну траєкторію переміщення частинки знайдемо поворотом рухомої системи з координатами (3) частинки по відношенню до нерухомої навколо осі OZ за відомими формулами:

$$x_a = x \cos \theta - y \sin \theta; \quad y_a = x \sin \theta + y \cos \theta; \quad z_a = z. \quad (4)$$

Підставимо в (4) рівняння (3) та вираз для кута $\theta = \omega t$ і після цього отримаємо параметричні рівняння абсолютної траєкторії руху частинки:

$$\begin{aligned} x_a &= R \sin \varepsilon \cos(\omega t); \\ y_a &= R \sin \varepsilon \sin(\omega t); \\ z_a &= R(1 - \cos \varepsilon). \end{aligned} \quad (5)$$

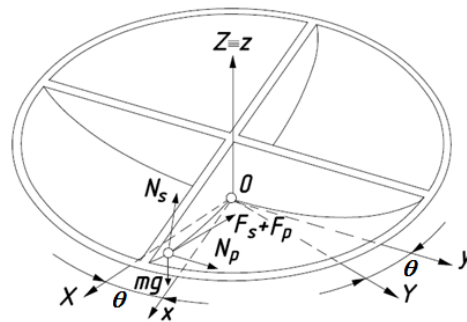


Рис. 2. Робочий орган відцентрового апарату з вертикальними лопатками та положення матеріальної частинки із прикладеними до неї силами після повороту на кут $\theta = \omega t$

Диференціальне рівняння абсолютного руху частинки у векторному записі має вигляд: $m\bar{w} = \bar{F}$, де m – маса частинки, \bar{w} – вектор абсолютного прискорення, \bar{F} – результуючий вектор прикладених до частинки сил. Такими силами є сила ваги mg ($g=9,81 \text{ м/с}^2$), реакція N_s поверхні сферичного диска, реакція N_p поверхні лопатки, сила тертя $F_s = f_s N_s$ при ковзанні частинки по поверхні диска, сила тертя $F_p = f_p N_p$ при ковзанні частинки по поверхні лопатки (f_s і f_p – коефіцієнти тертя частинки по поверхні диска і лопатки відповідно). Усі сили мають строго визначений напрям дії. Для початкового моменту руху (коли обидві системи координат збігаються) вони зображені на рис. 1.

Сила ваги спрямована вниз, отже її проекції запишуться:

$$\{0; \quad 0; \quad -mg\}. \quad (6)$$

Реакція N_p лопатки спрямована перпендикулярно до неї, тобто збігається із напрямом осі Oy . Проекції одиничного вектора реакції N_p запишуться:

$$\{0; \quad 1; \quad 0\}. \quad (7)$$

Реакція N_s сферичного диска (сегмента) спрямована перпендикулярно до його поверхні, тобто до центра сфери. Радіус-вектор кола (3), вздовж якого визначається напрямний вектор реакції N_s , спрямований від центра сфери до точки на кривій при умові, що початок координат знаходиться в центрі сфери. Отже, напрямний вектор буде спрямований у протилежну сторону. Його проекції запишуться:

$$\{-\sin \varepsilon; \quad 0; \quad \cos \varepsilon\}. \quad (8)$$

Обидві сили тертя F_s і F_p спрямовані по дотичній до траєкторії відносного руху частинки в протилежну швидкості V_r (рис. 1) її ковзання сторону. Знайдемо одиничний вектор напряму відносної швидкості V_r , вздовж якого діє сумарна сила тертя $F_s + F_p$. Для цього продиференціюємо відносну траєкторію (3), маючи на увазі, що $\varepsilon = \varepsilon(t)$:



$$\begin{aligned}x' &= R\varepsilon' \cos \varepsilon; \\y' &= 0; \\z' &= R\varepsilon' \sin \varepsilon.\end{aligned}\tag{9}$$

Геометрична сума складових (9) дасть вираз величини відносної швидкості частинки:

$$V_r = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} = R\varepsilon'^2.\tag{10}$$

Розділивши проекції відносної швидкості (9) на її величину (10), отримаємо вирази одиничного вектора відносної швидкості V_r в проекціях на осі рухомої системи $Oxyz$:

$$\{\cos \varepsilon; \quad 0; \quad \sin \varepsilon\}.\tag{11}$$

Після повороту диска разом із рухомою системою координат $Oxyz$ на кут $\theta = \omega t$ частинка займе нове положення на кривій, а сама крива теж повернеться на цей кут. Напрямок дії всіх векторів прикладених сил визначено. При повороті диска разом із ним повертається частинка і прикладені до неї вектори сил, які в рухомій системі не змінюють напрямку. Після повороту векторів (7), (8), (11) на кут $\theta = \omega t$ навколо осі OZ їх проекції на нерухому систему опишуться наступними виразами.

Одиничний вектор реакції N_p лопатки:

$$\{-\sin \omega t; \quad \cos \omega t; \quad 0\}.\tag{12}$$

Одиничний вектор реакції N_s сферичного диска:

$$\{-\sin \varepsilon \cos \omega t; \quad -\sin \varepsilon \sin \omega t; \quad \cos \varepsilon\}.\tag{13}$$

Одиничний вектор відносної швидкості V_r :

$$\{\cos \varepsilon \cos \omega t; \quad \cos \varepsilon \sin \omega t; \quad \sin \varepsilon\}.\tag{14}$$

Напрямок дії сили ваги (6) частинки при повороті диска не змінюється.

Проекції абсолютної швидкості і абсолютного прискорення частинки на осі нерухомої системи координат $OXYZ$ знайдемо послідовним диференціюванням рівнянь (5). Після диференціювання рівнянь (5) отримуємо проекції абсолютної швидкості:

$$\begin{aligned}x'_a &= R\varepsilon' \cos \varepsilon \cos \omega t - R\omega \sin \varepsilon \sin \omega t; \\y'_a &= R\varepsilon' \cos \varepsilon \sin \omega t + R\omega \sin \varepsilon \cos \omega t; \\z'_a &= R\varepsilon' \sin \varepsilon.\end{aligned}\tag{15}$$

Величину абсолютної швидкості отримаємо геометричним сумуванням складових (15): $V_a = \sqrt{x_a'^2 + y_a'^2 + z_a'^2} = R\sqrt{\varepsilon'^2 + \omega^2 \sin^2 \varepsilon}$.

Після диференціювання виразів (15) отримаємо проекції вектора абсолютного прискорення:

$$\begin{aligned}x''_a &= R(\varepsilon'' \cos \omega t - 2\omega \varepsilon' \sin \omega t) \cos \varepsilon - R(\varepsilon'^2 + \omega^2) \sin \varepsilon \cos \omega t; \\y''_a &= R(\varepsilon'' \sin \omega t + 2\omega \varepsilon' \cos \omega t) \cos \varepsilon - R(\varepsilon'^2 + \omega^2) \sin \varepsilon \sin \omega t; \\z''_a &= R\varepsilon'' \sin \varepsilon + R\varepsilon'^2 \cos \varepsilon.\end{aligned}\tag{16}$$

Розпишемо векторне рівняння $m\ddot{\vec{w}} = \vec{F}$ в проєкціях на осі нерухокої системи координат $OXYZ$. Напрямок дії реакцій N_p лопатки і N_s сферичного диска задано одиничними векторами (12) і (13). Напрямок сумарної сили тертя $F_s + F_p = f_s N_s + f_p N_p$ задано одиничним вектором (14), який потрібно брати із протилежним знаком. Отримаємо три рівняння:

$$\begin{aligned} x_a'' &= -N_p \sin \omega t - N_s \sin \varepsilon \cos \omega t - (f_s N_s + f_p N_p) \cos \varepsilon \cos \omega t; \\ y_a'' &= N_p \cos \omega t - N_s \sin \varepsilon \sin \omega t - (f_s N_s + f_p N_p) \cos \varepsilon \sin \omega t; \\ z_a'' &= N_s \cos \varepsilon - (f_s N_s + f_p N_p) \sin \varepsilon - mg. \end{aligned} \quad (17)$$

Підставимо у (17) вирази абсолютного прискорення із (16) і отримаємо систему трьох диференціальних рівнянь із трьома невідомими функціями: $\varepsilon = \varepsilon(t)$, $N_s = N_s(t)$ і $N_p = N_p(t)$. Розв'яжемо систему відносно ε'' , N_s , N_p :

$$\varepsilon'' = \left(\omega^2 \sin \varepsilon - 2\varepsilon' \omega f_p - \frac{g}{R} f_s \right) \cos \varepsilon - \left(\frac{g}{R} + f_s \omega^2 \sin \varepsilon \right) \sin \varepsilon - \varepsilon'^2 f_s; \quad (18)$$

$$N_s = m \left(R \varepsilon'^2 + g \cos \varepsilon + R \omega^2 \sin^2 \varepsilon \right); \quad (19)$$

$$N_p = 2mR\omega \varepsilon' \cos \varepsilon. \quad (20)$$

Диференціальне рівняння (18) не залежить від (19) і (20), тому може бути розв'язане окремо. Реакції поверхонь (19) і (20) знаходять після того, як розв'язано рівняння (18). Для його розв'язання потрібно застосовувати чисельні методи.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянемо приклад. Нехай діаметр сферичного диска $d = 0,4$ м, кут $\beta = 20^\circ$. За формулою (2) знаходимо третій конструктивний параметр $R = 0,58$ м. При чисельному інтегруванні диференціального рівняння (18) часові t потрібно надавати такого значення, щоб кут ε не виходив за межі кута β . У момент часу, коли $\varepsilon = \beta$, частинка знаходиться на зовнішній крайці диска.

На рис. 3,а побудовано залежність $\varepsilon = \varepsilon(t)$ для наведених конструктивних параметрів і при $f_s = f_p = 0,3$, $\omega = 25 \text{ c}^{-1}$. Початкове значення кута ε не дорівнює нулю, бо частинка не може знаходитися на осі обертання. У такому випадку відсутня відцентрова сила і частинка не може розпочати рух. Як видно із рис. 3,а, для досягнення периферії диска частинка розганяється протягом 0,32 с.

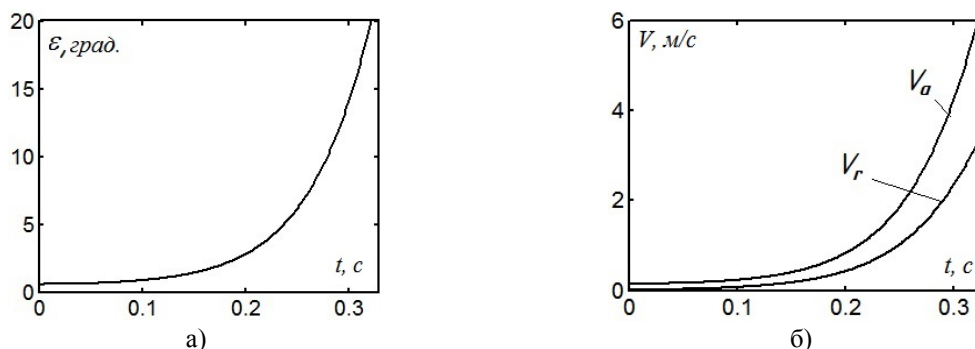


Рис. 3. Графіки, що характеризують рух частинки при $f_s = f_p = 0,3$, $\omega = 25 \text{ c}^{-1}$:
а) графік зміни кута ε ; б) графіки зміни відносної V_a і абсолютної V_r швидкостей

Графіки зміни відносної і абсолютної швидкостей показано на рис. 3,б. Із них видно, що в момент сходження з диска відносна і абсолютна швидкості мають наступні значення: $V_r = 3,2$ м/с, $V_a = 5,8$ м/с. На рис. 4 за формулами (19), (20) побудовано графіки зміни сили реакції N_s сферичного диска і N_p лопатки на частинку масою $m = 0,01$ кг.

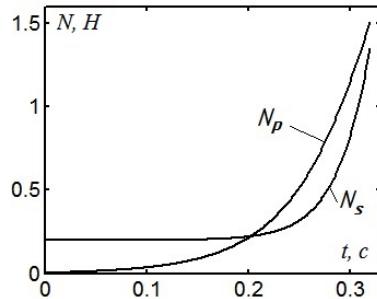


Рис. 4. Графіки зміни сили реакцій N_s сферичного диска і N_p лопатки

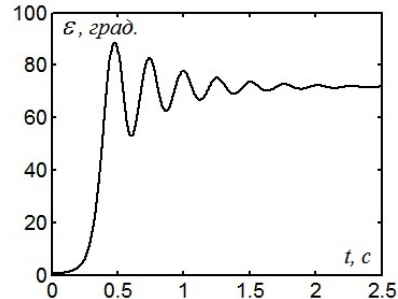


Рис. 5. Графіки зміни кута ε

Якби сферичний сегмент не було обмежено кутом β , то частинка піднімалась би по внутрішній поверхні сфери до певної висоти. Чисельне інтегрування диференціального рівняння (18) при тривалості руху $t = 2,5$ с показало, що кут ε за півсекунди досягає максимального значення ($\varepsilon = 90^\circ$), а потім починаються його затухаючі коливання (рис. 5). Це означає, що частинка піднімається на висоту півсфери, а потім починає опускатися, причому опускання чергується із підйомом аж до повної зупинки частинки на певній висоті. Для наведеного на рис.5 випадку зупинці частинки відповідає кут $\varepsilon = 70^\circ$, тобто частинка «залипає» на висоті, близькій до півсфери і далі обертається разом із нею.

Кут «залипання» можна знайти аналітично. Коли воно відбулося, то $\varepsilon' = \varepsilon'' = 0$. Підстановка цих значень у диференціальне рівняння (18) приводить до тригонометричного рівняння відносно невідомого кута ε :

$$(R\omega^2 \sin \varepsilon - g f_s) \cos \varepsilon - (g + R f_s \omega^2 \sin \varepsilon) \sin \varepsilon = 0. \quad (21)$$

Для розв'язання рівняння (21) потрібно застосовувати чисельні методи. Однак при $f_s = 0$, тобто при абсолютно гладенькій поверхні диска, воно суттєво спрощується і має простий розв'язок:

$$\varepsilon = \text{Arccos} \frac{g}{R\omega^2}. \quad (22)$$

Чисельні методи обчислень показали, що при $f_s = 0$ і $f_p \neq 0$ затухаючі коливання кута ε наближаються до значення, яке можна знайти за формулою (22). Згідно неї при необмеженому зростанні кутової швидкості обертання диска кут ε прямує до 90° , тобто частинка «залипає» на висоті центра сфери. Якщо ж обидві поверхні абсолютно гладенькі, тобто $f_s = f_p = 0$, то коливання відбуваються нескінченно довго.

6 ВИСНОВКИ

Виготовлення робочої поверхні диска відцентрового апарата у вигляді сферичного сегмента забезпечує початок польоту частинки в момент сходження з диска під заданим кутом до горизонтальної площини. Це збільшує площу розсіювання технологічного

матеріалу. Аналітичний опис руху частинки дає можливість дослідити її розгін по диску вздовж лопаток та знайти відносну і абсолютну швидкості в момент сходження частинки з диска. Отримані аналітичні залежності дозволяють визначати вплив конструктивних та технологічних параметрів на процес розгону частинки. Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні впливу окремих параметрів на процес розгону частинки.

Література

1. Pylypaka S. F., Klendiy M. B., Klendiy O. M. Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica*. 2018. 58(3). P. 201–208. doi: 10.14311/AP.2018.58.0201.
2. Pylypaka S., Klendiy M., Zaharova T. Movement of the particle on the external surface of the cylinder, which makes the translational oscillations in horizontal planes. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2019. P. 336–345. doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_35.
3. Matveev A. I., Lebedev I. F., Nikiforova L. V., Yakovlev B. V. Modeling of the particles movement in a screw pneumatic separator. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2014. 10. P. 172–178.
4. Pylypaka S., Volina T., Hryshchenko I., Rybenko I., Sydorenko N. Dynamics of a Particle on a Movable Wavy Surface. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2021. doi: 10.1007/978-3-030-68014-5_20.
5. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. The Investigation of Particle Movement on a Helical Surface. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_67.
6. Kresan T. A. Розрахунок гравітаційного спуску, утвореного поверхнею косою закритого гелікоїда. *Техніка та енергетика. Machinery & Energetics*, 2020. S.1. № 11(2). P. 49–57. doi: 10.31548/machenergy2020.02.049.
7. Pylypaka S. F., Babka V. M., Grischenko I. Yu., Kresan T. A. Математична модель переміщення частинки вертикальним шнеком при стаціонарному режимі. *Техніка та енергетика. Machinery & Energetics*, 2019. S.1. № 10(4). P. 57–62. doi: 10.31548/machenergy2019.04.057.
8. Kresan T. A., Pylypaka S. F., Babka V. M., Kremets Ya. S., Klendiy M. B. Транспортування частинки горизонтальним шнеком, обмеженим співвісним нерухомим циліндром. *Техніка та енергетика. Machinery & Energetics*, 2019. S. L. № 10(3). P. 15–20. doi: 10.31548/machenergy2019.03.015.
9. Pylypaka S. F., Klendiy M. B., Nesvidomin V. M., Trokhaniak V. I. Particle motion over the edge of an inclined plane that performs axial movement in a vertical limiting cylinder. *Acta Polytechnica*. 2019. № 59(1). P. 67–76. doi: 10.14311/AP.2019.59.0067.
10. Pylypaka S., Nesvidomin V., Volina T., Sirykh L., Ivashyna L. Movement of the Particle on the Internal Surface of the Spherical Segment Rotating About a Vertical Axis. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2020. № 62(3). P. 79–86. doi: 10.35633/inmateh-62-08.

References

1. Pylypaka, S. F., Klendiy, M. B., Klendiy, O. M. (2018). Particle motion on the surface of a concave soil-tilling disk. *Acta Polytechnica*. 58 (3). 201–208.
2. Pylypaka, S., Klendiy, M., Zaharova, T. (2019). Movement of the particle on the external surface of the cylinder, which makes the translational oscillations in horizontal planes. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. Cham. 336–345.
3. Matveev, A. I., Lebedev, I. F., Nikiforova, L. V., Yakovlev, B. V. (2014). Modeling of the particles movement in a screw pneumatic separator. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 10. 172–178.
4. Pylypaka, S., Volina, T., Hryshchenko, I., Rybenko, I., Sydorenko, N. (2021). Dynamics of a Particle on a Movable Wavy Surface. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. Cham.

5. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Zaharova, T., Pavlenko, O., Klendiy, M. (2020). The Investigation of Particle Movement on a Helical Surface. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. Cham.
6. Kresan, T. A. (2020). Rozrakhunok hrvitatsiinoho spusku, utvorenoho poverkhneiu kosoho zakrytoho helikoida [Calculation of the gravitational descent formed by the surface of the oblique closed helicoid]. *Tekhnika ta enerhetyka. Machinery & Energetics*. S.I. 11(2). 49–57. [in Ukraine].
7. Pylypaka, S. F., Babka, V. M., Grischenko, I. Yu., Kresan, T. A. (2019). Matematychna model peremishchennia chastynky vertykalnym shnekom pry statsionarnomu rezhymi [Mathematical model of particle movement by a vertical auger in stationary mode]. *Tekhnika ta enerhetyka. Machinery & Energetics*. S.I. 10(4). 57–62. [in Ukraine].
8. Kresan, T. A., Pylypaka, S. F., Babka, V. M., Kremets, Ya. S., Klendiy, M. B. (2019). Transportuvannia chastynky horizontalnym shnekom, obmezhnym spivvisnym nerukhomym tsylindrom [Transportation of the particle by a horizontal auger, limited by a coaxial stationary cylinder]. *Tekhnika ta enerhetyka. Machinery & Energetics*. S.I. 10(3). 15–20. [in Ukraine].
9. Pylypaka, S.F, Klendiy, M.B., Nesvidomin, V.M., Trokhaniak, V.I. (2019). Particle motion over the edge of an inclined plane that performs axial movement in a vertical limiting cylinder. *Acta Polytechnica*. 59 (1). P. 67–76.
10. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Volina, T., Sirykh, L., Ivashyna, L. (2020). Movement of the Particle on the Internal Surface of the Spherical Segment Rotating About a Vertical Axis. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 62(3). 79–86.

Воліна Тетяна Миколаївна

Національний університет біоресурсів і природокористування України
к.т.н., доцент
вул. Героїв Оборони, 15 Київ, Україна 03041
t.n.zaharova@ukr.net
ORCID: 0000-0001-8610-2208

Пилипака Сергій Федорович

Національний університет біоресурсів і природокористування України
д.т.н., професор
вул. Героїв Оборони, 15 Київ, Україна 03041
psf55@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1496-4615

Несвідомін Андрій Вікторович

Національний університет біоресурсів і природокористування України
к.т.н.
вул. Героїв Оборони, 15 Київ, Україна 03041
a.nesvidomin@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9227-4652

Для посилань:

Воліна Т. М., Пилипака С. Ф., Несвідомін А. В. Рух частинки по сферичному сегменту з вертикальними радіально встановленими лопатками. *Механіка та математичні методи*, 2021. Т. 3. № 1. С. 27-36.

For references:

Volina, T., Pylypaka, S., Nesvidomin, A. (2021). Particle motion on the spherical segment with verticals radially installed blades. *Mechanics and Mathematical Methods*. 3 (1). 27-36.