

РУХ ЧАСТИНКИ ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ЦИЛІНДРУ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ НАВКОЛО ВЛАСНОЇ ОСІ

Пилипака Сергій Федорович

доктор технічних наук, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-1496-4615

psf55@ukr.net

Воліна Тетяна Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0001-8610-2208

t.n.zaharova@ukr.net

Несвідомін Андрій Вікторович

кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-9227-4652

a.nesvidomin@gmail.com

Бабка Віталій Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-4971-4285

babkavitaliy@ukr.net

Грищенко Ірина Юріївна

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-1000-9805

irgr@yahoo.com

Циліндричні поверхні є невід'ємною частиною багатьох сільськогосподарських машин. У підйомно-транспортних машинах вони відіграють роль кожуха, всередині якого обертається активний робочий орган. Так, похилий циліндр, що обертається навколо своєї осі, використовується у барабанних зерносушарках та циліндричних сепараторах. Взаємодія частинок матеріалу з поверхнею циліндра, що обертається навколо власної осі, призводить до їх ковзання, характер якого залежить від величини кута нахилу циліндра. У статті досліджено рух частинки по внутрішній поверхні горизонтального циліндра, який обертається навколо своєї осі з постійною кутовою швидкістю. Зрозуміло, що рух окремої частинки не можна ототожнювати з рухом матеріалу, який складається з окремих частинок, але це дає можливість визначити закономірності руху, які можуть певним чином бути перенесені на матеріал. До того ж дослідження руху тіла в деяких випадках можна звести до частинки. Це стосується випадку, коли сили інерції від обертання тіла можна знехтувати через малі кутові швидкості їх обертання. При попаданні частинки на внутрішню поверхню циліндра частинка починає здійснювати коливальний рух у площині його поперечного перерізу з певною амплітудою у кутовому вимірі. Величина амплітуди залежить від точки попадання частинки, коефіцієнта тертя та початкової абсолютної швидкості. Диференціальні рівняння руху складено в проекціях на осі нерухомої системи координат. Їх розв'язано чисельними методами. За належних вихідних умов, які визначаються аналітично, частинка в абсолютному русі може бути нерухомою, знаходячись в точці циліндра на певній відстані від нижньої точки в кутовому вимірі по ходу обертання циліндра. Слід відмітити, що велике значення має величина кутової швидкості обертання. При досягненні певної її величини частинка практично «залипає». У статті детально викладено відповідні розрахунки та візуалізовано отримані результати.

Ключові слова: частинка, обертальний рух, горизонтальний циліндр, ковзання, кутова швидкість, диференціальні рівняння, траєкторія.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.1.5>

Вступ. Циліндричні поверхні є невід’ємною частиною сільськогосподарських машин. У підйомно–транспортних машинах вони відіграють роль кожуха, всередині якого обертається активний робочий орган (наприклад, шнек). Похилий циліндр, що обертається навколо своєї осі, використовується у барабанних зерносушарках та циліндричних сепараторах (трієрах). Взаємодія частинок матеріалу з поверхнею циліндра, що обертається навколо власної осі, призводить до їх ковзання, характер якого залежить від величини кута нахилу циліндра.

Численні дослідження присвячено питанню підвищення надійності та довговічності машин в цілому та їх компонентів зокрема. Наприклад, запропоновано нову методику сульфидування поверхонь деталей (Tarelnyk et al., 2017b), спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, включаючи процеси цементування та азотування (Tarelnyk et al., 2017c), а також розроблено новітню методику нанесення багаточасткового покриття (Tarelnyk et al., 2017a). Проте не секрет, що таких рекомендацій недостатньо (Martsinkovsky et al., 2012). У подібних роботах пропонується покращувати поверхні шляхом розробки нових способів зміцнення поверхонь, що є досить дорогим процесом. Натомість це питання легше вирішити методами геометричного моделювання.

Інженерна практика часто стикається з проблемами геометричного проектування об’єктів, які пропонують розв’язувати різними способами. Так, у багатовимірному просторі шляхом апроксимації розв’язку диференціальних рівнянь (Konopatskiy et al., 2020c); методом багатовимірної параболічної інтерполяції (Konopatskiy et al., 2020a); за допомогою інтерполяції геометричного простору (Konopatskiy et al., 2020b) тощо. Ще простіше розв’язувати зворотню задачу. У такому випадку геометричне проектування технологічних об’єктів зводиться до знаходження аналітичних залежностей їх взаємодії. Такою взаємодією у машинобудуванні є взаємодія між робочим органом і матеріалом. Це відбувається під час сепарації зерна (Abbou-ou-Cherif et al., 2017), аспіраційної сепарації (Bulgakov et al., 2020), удобрення ґрунту (Kobets et al., 2020) тощо. Рух окремої частинки не можна ототожнювати з рухом матеріалу, що складається з окремих частинок, але це дає можливість визначити закономірності руху, які можуть певним чином бути перенесені на матеріал. Так, у (Golub et al., 2017) представлені результати досліджень руху по шорстких поверхнях, а в (Kurzthaler et al., 2020) – у ротаційних розсіювачах.

Однак, дослідження руху тіла в деяких випадках можна звести до частинки (Puлypaкa et al., 2019a). Це стосується випадку, коли силами інерції від обертання тіла можна знехтувати через малі кутові швидкості їх обертання (Loveikin et al., 2017). За допомогою такого підходу, наприклад, досліджено рух частинок по поверхні сферичного сегмента, що обертається навколо вертикальної осі (Puлypaкa et al., 2020b). Отже, коло прикладних задач, що потребують аналітичного опису руху частинки по площині, є досить широким. Виходячи з вищевикладеного, метою нашого дослідження був пошук закономірностей руху матеріальної частинки по

внутрішній поверхні горизонтального циліндра, що обертається навколо осі.

Матеріали і методи досліджень. Параметричні рівняння циліндра з горизонтальною віссю, спрямованою вздовж осі OX (рис. 1), запишуться:

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

де R – радіус циліндра – стала величина;

α і u – незалежні змінні поверхні, причому α – кутова координата, u – лінійна координата (довжина прямолінійної твірної циліндра). Знак «–» в останньому рівнянні (1) взятий для того, щоб значенню $\alpha = 0$ відповідала найнижча твірна циліндра, на якій у початковому положенні буде знаходитися частинка.

Нехай на початку руху частинка знаходиться в точці A на нижній твірній циліндра (рис. 1). Обертатимемо циліндр навколо осі зі сталою кутовою швидкістю ω . За час t циліндр повернеться на кут ωt і нижня твірна циліндра переміститься в точку C . За цей же час частинка переміститься по поверхні циліндра, але точки C не досягне, оскільки буде по ньому ковзати (рис. 1,б). Припустимо, вона досягла точки B , що відповідає кутові ковзання α . Оскільки вісь обертання циліндра горизонтальна, то очевидно, що траєкторію ковзання буде дуга кола. Якщо циліндр нахилити, то виникне складова сили ваги, яка змусить частинку ковзати ще і у напрямі осі OX . Спочатку розглянемо рух частинки по поверхні горизонтального циліндра.

Якщо зв’язати незалежні змінні α і u поверхні певною функціональною залежністю, наприклад, від часу t , то рівняння (1) перетворяться на рівняння однієї змінної, тобто опишуть лінію на поверхні циліндра. Цю лінію вважатимемо траєкторією ковзання, а залежності $\alpha = \alpha(t)$ і $u = u(t)$ – невідомими, які потрібно знайти. Щоб їх знайти, потрібно скласти систему диференціальних рівнянь руху частинки в проекціях на осі системи координат $OXYZ$.

Рівняння руху частинки будемо складати у вигляді: $m\vec{w} = \vec{F}$, де w – вектор абсолютного прискорення, \vec{F} – результуючий вектор прикладених до частинки сил. Такими силами є: сила ваги mg (m – маса частинки, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння), реакція поверхні N , та сила тертя $f \cdot N$ (f – коефіцієнт тертя). Знайдемо напрямні косинуси, тобто одиничні напрямні вектори дії цих сил. Сила ваги спрямована вниз, отже проекції напрямного вектора запишуться:

$$mg: \{0; \quad 0; \quad -1\}. \quad (2)$$

Сила тертя $f \cdot N$ спрямована протилежно вектору швидкості відносного руху V_r (тобто ковзання). Для знаходження швидкості V_r відносного руху продиференціюємо рівняння (1) по часу t . При цьому маємо на увазі, що $\alpha = \alpha(t)$ і $u = u(t)$, тобто рівняння (1) є уже не рівняннями циліндра, а рівняннями лінії на ньому, тобто відносної траєкторії. Щоб розрізнити рівняння лінії і поверхні, в рівняннях відносної траєкторії перейдемо від прописних літер до строчних із індексом «r»:

$$x'_r = u'; \quad y'_r = R\alpha' \cos \alpha; \quad z'_r = R\alpha' \sin \alpha. \quad (3)$$

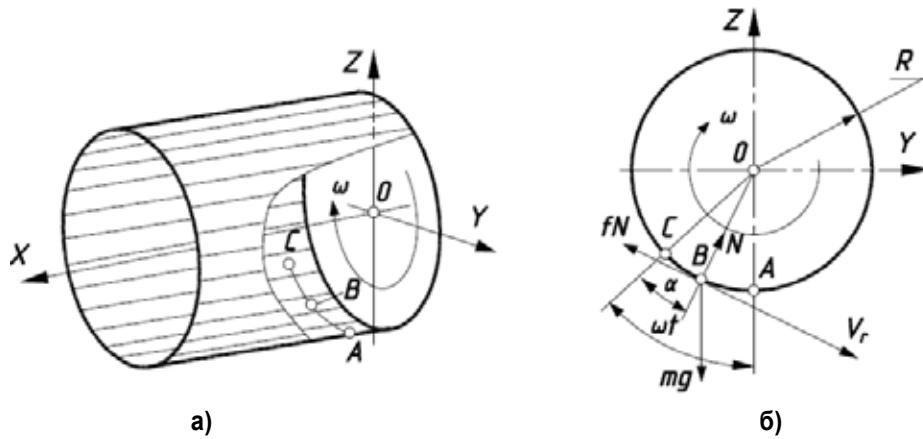


Рис. 1. Графічні ілюстрації до складання рівнянь руху частинки по внутрішній поверхні горизонтального циліндра, який обертається навколо своєї осі: а) аксонометричне зображення циліндра; б) проекція циліндра, коли вісь OX спрямована на спостерігача та прикладені до частинки в точці B сили

Геометрична сума складових (3) дасть величину швидкості ковзання частинки по циліндру у відносному русі:

$$V_r = \sqrt{x_r'^2 + y_r'^2 + z_r'^2} = \sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}. \quad (4)$$

Одиничний вектор дотичної до траєкторії відносного руху в проекціях на осі системи $OXYZ$ одержимо діленням проекцій (3) на величину швидкості (4). Враховуючи те, що сила тертя $f \cdot N$ спрямована в протилежну сторону вектору V_r відносної швидкості, запишемо одиничний напрямний вектор дії сили тертя з протилежним знаком:

$$f \cdot N: \left\{ -\frac{u'}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}}; -\frac{R\alpha' \cos \alpha}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}}; -\frac{R\alpha' \sin \alpha}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}} \right\}. \quad (5)$$

Реакція поверхні N спрямована від точки на циліндрі до осі обертання (рис. 1,б). Якщо радіус-вектор точки на циліндрі визначається другим і третім виразом рівнянь (1), то реакція поверхні визначиться цими ж виразами, але з протилежним знаком. Скоротивши вирази на R , запишемо проекції одиничного вектора реакції N :

$$N: \{0; -\sin \alpha; \cos \alpha\}. \quad (6)$$

При обертанні поверхні циліндра з кутовою швидкістю ω за час t він повернеться на кут $\theta = -\omega \cdot t$ (за годинниковою стрілкою). Твірна циліндра, яка була в нижньому положенні в точці A , займе положення в точці C (рис. 1,б). Після повороту циліндра (1) навколо осі OX на кут $\theta = -\omega \cdot t$ запишемо:

$$\begin{aligned} X &= u; \\ Y &= R \sin \alpha \cos \theta + R \cos \alpha \sin \theta; \\ Z &= R \sin \alpha \sin \theta - R \cos \alpha \cos \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Після спрощень з урахуванням $\theta = -\omega \cdot t$ рівняння (7) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} X &= u; \\ Y &= -R \sin(\omega t - \alpha); \\ Z &= -R \cos(\omega t - \alpha). \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (8) при $\alpha = \alpha(t)$ і $u = u(t)$ є рівняннями абсолютної траєкторії руху частинки. Циліндр повернувся на кут $\theta = -\omega \cdot t$, а частинка за цей час, ковзаючи по циліндру в протилежну сторону, повернулася на кут $\alpha = \alpha(t)$ і зайняла положення в точці B (рис. 1,б). Знайдемо абсолютну швидкість частинки диференціюванням рівнянь (8) і перейшовши до строчних літер з індексом «а»:

$$\begin{aligned} x'_a &= u'; \\ y'_a &= -R(\omega - \alpha') \cos(\omega t - \alpha); \\ z'_a &= R(\omega - \alpha') \sin(\omega t - \alpha). \end{aligned} \quad (9)$$

Диференціюванням рівнянь (8) знаходимо проекції вектора абсолютного прискорення:

$$\begin{aligned} x''_a &= u''; \\ y''_a &= R(\omega - \alpha')^2 \sin(\omega t - \alpha) + R\alpha'' \cos(\omega t - \alpha); \\ z''_a &= R(\omega - \alpha')^2 \cos(\omega t - \alpha) - R\alpha'' \sin(\omega t - \alpha). \end{aligned} \quad (10)$$

Одиничні напрямні вектори дії сили тертя $f \cdot N$ (5) і реакції N поверхні (6) знайдені для нерухомого циліндра. Оскільки поверхня повертається на кут $\theta = -\omega \cdot t$, то вказані вектори теж потрібно повернути на цей кут, щоб вони відповідали розташуванню частинки. Поворот здійснюється аналогічно повороту поверхні згідно формул (7). Після повороту проекції вказаних векторів запишуться:

– одиничного напрямного вектора дії сили тертя $f \cdot N$:

$$f \cdot N: \left\{ -\frac{u'}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}}; -\frac{R\alpha' \cos(\omega t - \alpha)}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}}; \frac{R\alpha' \sin(\omega t - \alpha)}{\sqrt{u'^2 + R^2\alpha'^2}} \right\}. \quad (11)$$

– одиничного напрямного вектора дії сили реакції N :

$$N: \{0; \sin(\omega t - \alpha); \cos(\omega t - \alpha)\}. \quad (12)$$

Складемо векторне рівняння $m\bar{w} = \bar{F}$ в проекціях на осі нерухомої системи координат $OXYZ$ для горизонтального циліндра, оскільки відомі проекції (10) вектора абсолютного прискорення і напрямні вектори прикладених сил ваги частинки mg (2), тертя $f \cdot N$ (11) і реакції N (12):

$$\begin{aligned}
mx_a'' &= -fN \frac{u'}{\sqrt{u'^2 + R^2 \alpha'^2}}; \\
my_a'' &= -fN \frac{R\alpha' \cos(\omega t - \alpha)}{\sqrt{u'^2 + R^2 \alpha'^2}} + N \sin(\omega t - \alpha); \\
mz_a'' &= -mg + fN \frac{R\alpha' \sin(\omega t - \alpha)}{\sqrt{u'^2 + R^2 \alpha'^2}} + N \cos(\omega t - \alpha).
\end{aligned} \quad (13)$$

При підстановці у (13) виразів прискорення (10) ми отримуємо систему трьох рівнянь із трьома невідомими залежностями: $\alpha=\alpha(t)$, $u=u(t)$ і $N=N(t)$. Нею потрібно користуватися у тому випадку, коли в напрямі осі OX задається початкова швидкість u' ковзання частинки. При $u''=u'=0$ (тобто, при ковзанні частинки по колу) перше рівняння (13) перетворюється у тотожність $0=0$. Розв'язавши систему із двох інших відносно $\alpha''=\alpha''(t)$ і $N=N(t)$, отримуємо:

$$\alpha'' = \frac{g}{R} [\sin(\omega t - \alpha) - f \cos(\omega t - \alpha)] - f(\omega - \alpha')^2. \quad (14)$$

$$N = m [R(\omega - \alpha')^2 + g \cos(\omega t - \alpha)]. \quad (15)$$

Рівняння (14) є диференціальним і може бути розв'язане самостійно. Можна припустити, що при обертанні горизонтального циліндра частинка, що знаходиться внизу (точка А, рис. 1, б) буде обертатися з циліндром без ковзання до точки С, а потім буде ковзати вниз до певної точки внизу і цей процес буде повторюватися.

Результати досліджень. Чисельне інтегрування рівняння (14) показало, що таке припущення справедливе тільки для невеликих кутових швидкостей. Важливу роль при чисельному інтегруванні відіграють початкові умови, від яких, як буде показано далі, залежить характер руху частинки. Вихідними умовами було передбачено, що частинка в початковий момент знаходиться на нижній твірній циліндра і кутова швидкість ковзання відсутня, тобто $\alpha = \alpha' = 0$. На рис. 2 побудовані графіки зміни кінематичних характеристик руху частинки протягом 3 с

при $R=0,2$ м, $f=0,3$ і різних кутових швидкостях обертання циліндра. Вгорі побудовано графік зміни кута α , а внизу – різниці кутів $\omega \cdot t - \alpha$. Горизонтальна ділянка графіка $\alpha = \alpha(t)$, яка періодично повторюється, свідчить про те, що в цей момент часу ковзання відсутнє, частинка «залипає» і обертається разом із циліндром. «Залипання» (підйом вгору) періодично чергується з ковзанням (опускання вниз). Графік зміни різниці кутів $\omega \cdot t - \alpha$ показує амплітуду коливань у кутовому вимірі.

Обговорення. З графіків видно, що амплітуда коливань частинки збільшується по мірі зростання кутової швидкості обертання циліндра. Якщо при $\omega = 2$ с⁻¹ частинка при підйомі вгору поверталася приблизно на 35° і опускалася майже до нуля (тобто до нижньої твірної), то при $\omega = 10$ с⁻¹ ці кути становлять відповідно 165° і -40°, тобто частинка коливається по колу, охоплюючи більше половини його дуги. При подальшому зростанні кутової швидкості ω обертання циліндра частинка практично «залипає» і обертається разом із ним.

Якщо в початковий момент надати частинці кутової швидкості ковзання $\alpha' = \omega$, тобто на початку руху її абсолютна швидкість обертання дорівнюватиме нулю, то подальший рух частинки відрізнятиметься від розглянутих випадків. Для прикладу візьмемо $\omega = 10$ с⁻¹ (графік зображено на рис. 2, б внизу для початкових умов $\alpha = \alpha' = 0$). Змінимо тільки одну початкову умову: $\alpha = 0$, $\alpha' = \omega$. Така заміна суттєво змінила характер коливань – їх амплітуда зменшилася (рис. 3, а).

Теоретичні дослідження показали, що при збільшенні кутової швидкості обертання циліндра частинка не «залипає», а коливається з тією ж амплітудою (в межах 0°...35°), тобто кутова швидкість обертання циліндра в такому випадку не впливає на амплітуду коливань. Однак друга вихідна умова, доповнена до першої, впливає. На рис. 3, б побудовано аналогічний графік, коли $\alpha = -15^\circ$, тобто в початковий момент частинка подається не в нижню точку циліндра, а дещо вище в напрямі його обертання. Амплітуда коливань зменшилася і знаходиться в межах 15°...18,5°, при цьому не важко замітити, що в обох випадках (рис. 3, а, б)

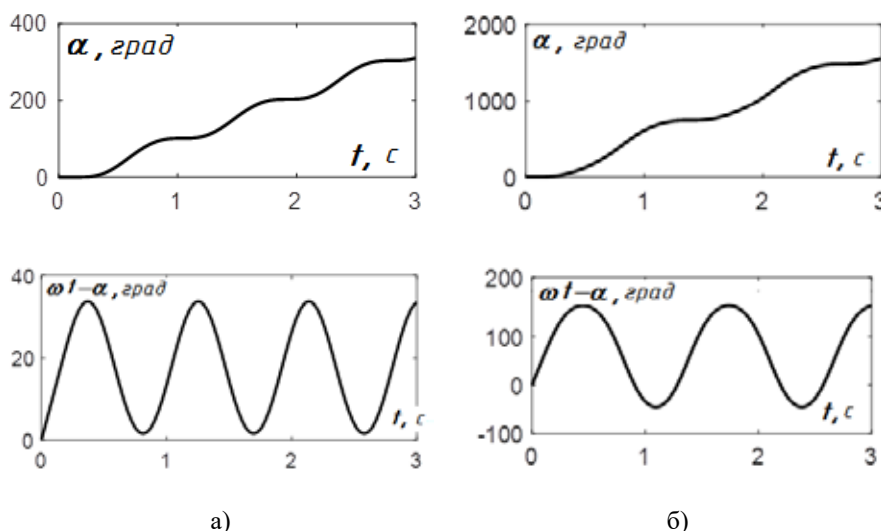


Рис. 2. Графіки зміни кута ковзання α і кута відхилення частинки $\omega \cdot t - \alpha$ від нульового значення в абсолютному русі: а) $\omega = 2$ с⁻¹; б) $\omega = 10$ с⁻¹

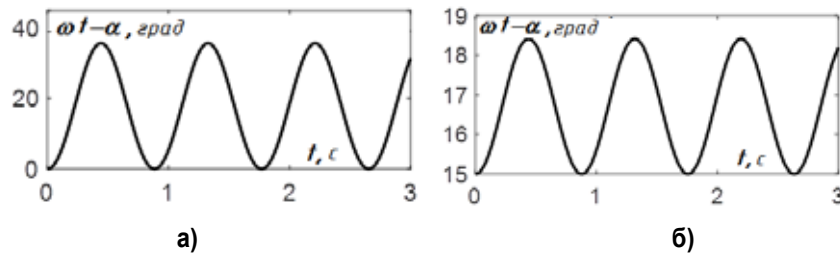


Рис. 3. Графіки зміни кута відхилення частинки $\omega \cdot t - \alpha$ від нульового значення в абсолютному русі при $\omega = 10$ с⁻¹ і різних початкових умовах інтегрування: а) $\alpha' = \omega$, $\alpha = 0$; б) $\alpha' = \omega$, $\alpha = -15^\circ$

коливання відбуваються відносно середньої точки, яка в кутовому вимірі дорівнює приблизно 17° . Якщо вихідною умовою взяти $\alpha = -17^\circ$, то амплітуда коливань практично зникає і частинка в абсолютному русі залишається нерухомою. Підтвердженням цього є частковий розв'язок диференціального рівняння (14) для відповідних початкових умов.

Висновки. При попаданні частинки на внутрішню поверхню горизонтального циліндра, який обертається із кутовою швидкістю ω навколо власної осі вона починає здійснювати коливальний рух у площині поперечного перерізу циліндра із певною амплітудою у кутовому

вимірі. Величина амплітуди залежить від точки попадання частинки, коефіцієнта тертя та початкової абсолютної швидкості. За належних вихідних умов, які визначаються аналітично, частинка в абсолютному русі може бути нерухомою, знаходячись в точці циліндра на певній відстані від нижньої точки в кутовому вимірі по ходу обертання циліндра. Велике значення має величина кутової швидкості обертання. При досягненні певної величини частинка практично «залипає» і обертається разом із циліндром. Перспективи подальших досліджень полягають в експериментальній перевірці отриманих теоретичних результатів.

Бібліографічні посилання:

1. Abbou-ou-Cherif, E. M., Piron, E., Chateaneuf, A., Miclet, D., Lenain, R., Koko, J. (2017). On-the-field simulation of fertilizer spreading. Part 1 – Modeling. *Computers and Electronics in Agriculture* 142(A), 235–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.006>.
2. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Holovach, I., Boris, A., Kiurchev, S., Ilnatiev, Y., Olt, J. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research*, 18(2), 1177–1188. doi: <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>.
3. Golub, G. A., Szalay, K., Kukharets, S. M., Marus, O. A. (2017). Energy efficiency of rotary digesters. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 13 (1), 35–49. doi: <https://doi.org/10.1556/446.13.2017.3>.
4. Kobets, A. S., Ponomarenko, N. O., Kharytonov, M. M. (2017). Construction of centrifugal working device for mineral fertilizer spreading. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 51(1), 5–14.
5. Konopatskiy, E. V., Bezditnyi, A. A. (2020). Geometric modeling of multifactor processes and phenomena by the multidimensional parabolic interpolation method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1441 (1), 012063. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1441/1/012063>.
6. Konopatskiy, E., Bezditnyi, A., Shevchuk, O. (2020). Modeling Geometric Varieties with Given Differential Characteristics and Its Application. *Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (GraphiCon 2020)*, Part 2, short31-1–short31-8. doi: <https://doi.org/10.51130/graphicon-2020-2-4-31>.
7. Konopatskiy, E., Voronova, O., Bezditnyi, A., Shevchuk, O. (2020). About one method of numeral decision of differential equalizations in partials using geometric interpolants. *CPT2020 The 8th International Scientific Conference on Computing in Physics and Technology Proceedings*. doi: https://doi.org/10.30987/conferencearticle_5fce27708eb353.92843700.
8. Kurzthaler, C., Zhu, L., Pahlavan, A., Stone, H. (2020). Particle motion nearby rough surfaces. *Phys. Rev. Fluids*, 5, 082101(R). doi: [10.1103/PhysRevFluids.5.082101](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.082101).
9. Loveikin, V. S., Romesevych, Yu. O. (2017). Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 55–61.
10. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. (2012). Designing Thrust Sliding Bearings of High Bearing Capacity. *Procedia Engineering*, 39, 148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>.
11. 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. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, F2, 336–345. doi: [10.1007/978-3-319-93587-4_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_35).
12. 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. doi: [10.35633/inmateh-62-08](https://doi.org/10.35633/inmateh-62-08).
13. Tarelnik, V. B., Martsinkovskii, V. S., Zhukov, A. N. (2017). Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53 (1-2), 114–120. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>.
14. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Dovzyk, M., Tarelnyk, N., Gorovoy, S. (2017). New sulphiding method for steel and cast iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012049. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012049>.
15. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Belous, A., Gerasimenko, V., Zakharov, M. (2017). New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012048. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012048>.

Pylypaka S. F., Doctor of Technical Science, Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Volina T. M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Nesvidomin A. V., PhD, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Babka V. M., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Hryshchenko I. Yu., PhD, Associate Professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The motion of a particle on a horizontal cylinder that rotates around its own axis

Cylindrical surfaces are an integral part of agricultural machinery. In hoisting and transport machines, cylindrical surface is a casing, inside which the working body rotates. The interaction of particles with the surface of the cylinder, which rotates around its own axis, leads to their sliding, the nature of which depends on the angle of the cylinder. The article investigates the motion of a particle on the inner surface of a horizontal cylinder that rotates around its axis with a constant angular velocity. It is clear that the motion of an individual particle cannot be identified with the motion of a material consisting of individual particles, but it makes possible to determine the laws of motion that can be in some way transferred to the material. In addition, the study of body motion in some cases can be reduced to a particle. This applies to the case when the forces of inertia from the rotation of the body can be neglected due to the small angular velocities of their rotation. When a particle hits the inner surface of a horizontal cylinder that rotates with an angular velocity ω around its own axis, it begins to oscillate in the cross-sectional plane of the cylinder with a certain amplitude in the angular dimension. The value of the amplitude depends on the point of impact of the particle, the coefficient of friction and the initial absolute velocity. Differential equations of motion are compiled in projections on the axis of a fixed coordinate system and are solved by numerical methods. Under the appropriate initial conditions, which are determined analytically, the particle in absolute motion can be stationary, being at a point on the cylinder at a certain distance from the lowest point in the angular dimension during the rotation of the cylinder. The value of the angular velocity has great importance. When it reaches a certain value, the particle practically "sticks".

Key words: particle, rotational motion, horizontal cylinder, sliding, angular velocity, differential equations, trajectory.