

УДК 631.312

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ ПО ОБЕРТОВОМУ СФЕРИЧНОМУ СЕГМЕНТУ

Т. М. Воліна, С. Ф. Пилипака

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття зі спеціальності: 131 – прикладна механіка.

Кореспонденція авторів: t.n.zaharova@ukr.net.

Історія статті: отримано – січень 2021, акцептовано – червень 2021.

Бібл. 7, рис. 9, табл. 0.

Анотація. У статті розглянуто відносний рух частинки по сферичному сегменту, який обертається навколо вертикальної осі. Складено диференціальні рівняння відносного переміщення частинки, які розв'язано чисельними методами. Побудовано відносну та абсолютну траєкторії руху частинки та графіки зміни відносної і абсолютної швидкостей. З'ясовано закономірність руху частинки при її підйомі по поверхні.

Ключові слова: сферичний сегмент, кутова швидкість обертання, відносний рух, частинка, диференціальні рівняння, кінематичні параметри.

Постановка проблеми

Теорія руху частинок по поверхнях, які обертаються навколо вертикальної осі, використовується для проектування пристроїв відцентрової дії. Зокрема, це стосується пристроїв для розсіювання мінеральних добрив, вилучення соку із подрібнених овочів та фруктів, очищення повітря від частинок пилю в циклонах. Частинка здійснює складний рух, який є сумою двох рухів: переносного руху поверхні і відносного руху частинки по поверхні, тобто її ковзання. Досить повно досліджено рух частинок по горизонтальній площині та по поверхні конуса, які обертаються навколо вертикальної осі. Рух частинок по інших поверхнях, що обертаються, має свої особливості.

Аналіз останніх досліджень

Окрім фундаментальної монографії [1], в якій розглянуто прямолінійні зворотно-поступальні коливання, існують праці, присвячені криволінійним коливанням площини. Взагалі задача руху матеріальної частинки по площині, яка здійснює коловий коливальний рух, вперше була розв'язана М.Є. Жуковським в геометричній інтерпретації [2], узагальнена і поширена на випадки еліптичних коливань І.І. Блехманом [3]. П.М. Василенко диференціальні рівняння руху частинки складав у проєкціях на осі рухомої системи координат, жорстко прив'язаної до площини, що коливається, а І.І. Блехман – у проєкціях на осі нерухо-

мої системи координат. П.М. Заїка розглядав переміщення частинок по робочих площинах вібраційних зерноочисних машин [4]. Відносно останніх робіт, дослідження руху матеріальної частинки по шорсткій горизонтальній площині, яка здійснює горизонтальні поступальні коливання по різних кривих, розглянуто в праці [5], а у праці [6] вивчено рух частинок по похилій площині, всі точки якої описують еліпси.

Мета досліджень

Дослідити закономірності руху матеріальної частинки по сферичному сегменту, який зі сталою кутвою швидкістю обертається навколо вертикальної осі.

Результати досліджень

Параметричні рівняння сфери з початком координат в її нижньому полюсі мають вигляд:

$$\begin{aligned} X &= R \sin \varepsilon \cos \alpha; \\ Y &= R \sin \varepsilon \sin \alpha; \\ Z &= R(1 - \cos \varepsilon), \end{aligned} \quad (1)$$

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.

Кут α змінюється в межах $\alpha=0\dots 2\pi$, кут ε – в межах $\varepsilon=0\dots \varepsilon_0$, де від значення кута ε_0 залежить висота сферичного сегмента. Наприклад, при $\varepsilon_0=\pi/2$ сегмент буде дорівнювати половині сфери.

Обертання сегмента будемо розглядати відносно двох систем координат: нерухомої $OXYZ$ і рухомої $Ox_1y_1z_1$, яка буде обертатися разом із сегментом. Якщо сферичний сегмент (1) буде обертатися навколо вертикальної осі з кутвою швидкістю ω , за час t поверхня повернеться на кут $\theta=\omega t$. Застосуємо формули повороту однієї системи координат відносно іншої:

$$\begin{aligned} X &= R \sin \varepsilon \cos \alpha \cos \theta - R \sin \varepsilon \sin \alpha \sin \theta; \\ Y &= R \sin \varepsilon \cos \alpha \sin \theta + R \sin \varepsilon \sin \alpha \cos \theta; \\ Z &= R(1 - \cos \varepsilon). \end{aligned} \quad (2)$$

Після спрощень із урахуванням $\theta=\omega t$ рівняння (2) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} X &= R \sin \varepsilon \cos(\alpha + \omega t); \\ Y &= R \sin \varepsilon \sin(\alpha + \omega t); \\ Z &= R(1 - \cos \varepsilon). \end{aligned} \quad (3)$$

Нехай в початковий момент при $t=0$ дві системи координат збігаються, сферичний сегмент (або диск) не обертається і частинка знаходиться на меридіані в площині OYZ (рис. 1).

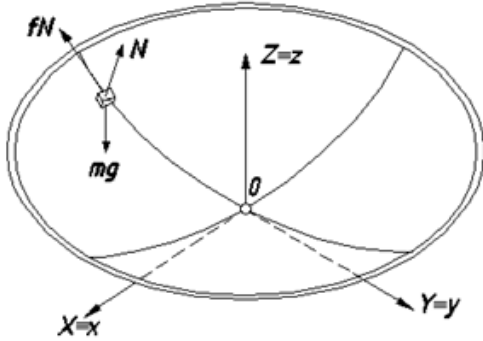


Рис. 1. Розташування частинки на нерухомому сферичному сегменті та схема прикладених до неї сил у разі, коли нерухома і рухома системи координат збігаються.

Fig. 1. The location of the particle on the stationary spherical segment and the scheme of forces applied to it, when the fixed and moving coordinate systems coincide.

До неї прикладені наступні сили: сила ваги mg (m – маса частинки, $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння), реакція поверхні N , та сила тертя fN (f – коефіцієнт тертя), яка не дозволяє частинці рухатися вниз вздовж меридіана в напрямку початку координат. При обертанні диска зі сталою кутовою швидкістю ω за час t він повернеться на кут $\theta=\omega t$ (рис. 2).

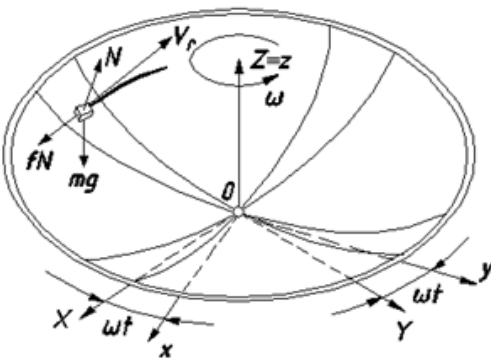


Рис. 2. Розташування частинки, що ковзає по поверхні обертового сферичного сегмента, та схема прикладених до неї сил.

Fig. 2. The location of the sliding particle on the rotary spherical segment and the scheme of applied forces.

Якби частинка не ковзала по диску, то вона повернулася б разом із диском на кут θ і зайняла б положення на тому ж самому меридіані після його повороту. У результаті ковзання частинка займе проміжне положення. Ковзання частинки відбувається в протилежну сторону обертання диска. Напрямок відносної швидкості V_r спрямований по дотичній до траєкторії ковзання частинки (рис. 2).

Рівняння руху частинки будемо складати у вигляді: $m\bar{w}=\bar{F}$, де \bar{w} – вектор прискорення, \bar{F} – результуючий вектор прикладених до частинки сил. Усі вектори будемо визначати в проекціях на осі нерухомої системи координат. Траєкторія відносного руху частинки по відношенню до рухомої системи координат $Oxuz$ опишеться залежністю між криволінійними координатами сфери ε і α . Така залежність може бути задана по різному: $\varepsilon=\varepsilon(\alpha)$, $\alpha=\alpha(\varepsilon)$, або ж через спільну змінну t : $\varepsilon=\varepsilon(t)$, $\alpha=\alpha(t)$. Для нашого випадку роль спільної змінної буде відігравати роль часу t .

Таким чином, при прийнятому взаємозв'язку $\varepsilon=\varepsilon(t)$ і $\alpha=\alpha(t)$ рівняння (1) задають відносну траєкторію руху частинки, а рівняння (3) – абсолютну. Вказані залежності є невідомими і їх потрібно знайти. У подальшому нам потрібні будуть вектори як відносної, так і абсолютної швидкостей. Їх ми визначимо диференціюванням виразів (1) і (3) по часу t . Рівняння (1) і (3) в одному випадку є рівняннями поверхні, коли ε і α є незалежними змінними, а в іншому – лініями (розшукуваними траєкторіями частинки) на поверхні. Для поверхонь ми прийняли позначення рівнянь прописними літерами, а для ліній – строчними, причому для відносної траєкторії будемо використовувати індекс « r », а для абсолютної – « a ». Отже, диференціюванням рівнянь (1) знаходимо відносну швидкість руху (ковзання) частинки по поверхні сферичного диска:

$$\begin{aligned} x'_r &= R\varepsilon' \cos \varepsilon \cos \alpha - R\alpha' \sin \varepsilon \sin \alpha; \\ y'_r &= R\varepsilon' \cos \varepsilon \sin \alpha + R\alpha' \sin \varepsilon \cos \alpha; \\ z'_r &= R\varepsilon' \sin \varepsilon. \end{aligned} \quad (4)$$

Геометрична сума складових (4) дасть величину швидкості ковзання частинки по сферичному диску у відносному русі:

$$\begin{aligned} V_r &= \sqrt{x_r'^2 + y_r'^2 + z_r'^2} = \\ &= R\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}. \end{aligned} \quad (5)$$

Одиничний вектор T дотичної до траєкторії відносного руху в проекціях на осі системи $OXYZ$ одержимо діленням проекцій (4) на величину вектора (5):

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\varepsilon' \cos \varepsilon \cos \alpha - \alpha' \sin \varepsilon \sin \alpha}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}; \\ T_y &= \frac{\varepsilon' \cos \varepsilon \sin \alpha + \alpha' \sin \varepsilon \cos \alpha}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}; \\ T_z &= \frac{\varepsilon' \sin \varepsilon}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Знайдемо напрям дії реакції N поверхні (1). Вона спрямована по нормалі P до поверхні і визначається із векторного добутку двох векторів, дотичних до координатних ліній поверхні. Проекціями цих векторів є частинні похідні рівнянь (1):

$$\begin{aligned} \partial X / \partial \varepsilon &= R \cos \varepsilon \cos \alpha; \\ \partial Y / \partial \varepsilon &= R \cos \varepsilon \sin \alpha; \\ \partial Z / \partial \varepsilon &= R \sin \varepsilon; \\ \partial X / \partial \alpha &= -R \sin \varepsilon \sin \alpha; \\ \partial Y / \partial \alpha &= R \sin \varepsilon \cos \alpha; \\ \partial Z / \partial \alpha &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Після векторного множення векторів (7) і приведення отриманого вектора до одиничного проєкції вектора нормалі P до поверхні запишуться:

$$\begin{aligned} P_x &= -\sin \varepsilon \cos \alpha; \\ P_y &= -\sin \varepsilon \sin \alpha; \\ P_z &= \cos \varepsilon. \end{aligned} \quad (8)$$

Диференціюванням рівнянь (3) знаходимо абсолютну швидкість руху частинки по відношенню до нерухомої системи координат:

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

Диференціюванням виразів (9) знаходимо проєкції вектора абсолютного прискорення на осі нерухомої системи координат:

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

Одиничні вектори T (6) напрямку відносної швидкості V , і (8) нормалі до поверхні P знайдені для нерухомої поверхні. Оскільки поверхня повертається на кут $\theta = \omega t$, то вказані вектори теж потрібно повернути на цей кут, щоб вони відповідали розташуванню частинки. Поворот здійснюємо аналогічно, як і поворот поверхні за формулами (2). Після повороту проєкції вказаних векторів запишуться:

- одиничного вектора дотичної до відносної траєкторії:

$$\begin{aligned} T_X &= \frac{\varepsilon' \cos \varepsilon \cos(\alpha + \omega t) - \alpha' \sin \varepsilon \sin(\alpha + \omega t)}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}; \\ T_Y &= \frac{\varepsilon' \cos \varepsilon \sin(\alpha + \omega t) + \alpha' \sin \varepsilon \cos(\alpha + \omega t)}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$T_Z = \frac{\varepsilon' \sin \varepsilon}{\sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}}.$$

- одиничного вектора нормалі до поверхні:

$$\begin{aligned} P_X &= -\sin \varepsilon \cos(\alpha + \omega t); \\ P_Y &= -\sin \varepsilon \sin(\alpha + \omega t); \\ P_Z &= \cos \varepsilon. \end{aligned} \quad (12)$$

Векторне рівняння $m\bar{w} = \bar{F}$ в проєкціях на осі нерухомої системи координат $OXYZ$ запишеться наступним чином:

$$\begin{aligned} mx''_a &= NP_x - fNT_x; \\ my''_a &= NP_y - fNT_y; \\ mz''_a &= NP_z - fNT_z - mg. \end{aligned} \quad (13)$$

Проєкції одиничних напрямних векторів дотичної T до відносної траєкторії та нормалі до поверхні P

наведено у (11) і (12) відповідно, вирази других похідних абсолютної траєкторії – у (10). Підстановка вказаних виразів у (13) дасть систему трьох рівнянь із трьома невідомими залежностями: $\alpha = \alpha(t)$, $\varepsilon = \varepsilon(t)$ і $N = N(t)$. Розв'яжемо її відносно α'' , ε'' , N і отримаємо:

$$\begin{aligned} \varepsilon'' &= \left[(\omega + \alpha')^2 \cos \varepsilon - \frac{g}{R} \right] \sin \varepsilon - f \frac{\varepsilon' B}{RA}; \\ \alpha'' &= -2\varepsilon'(\omega + \alpha') \operatorname{ctg} \varepsilon - f \frac{\alpha' B}{RA}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$N = mB,$$

де $A = \sqrt{\varepsilon'^2 + \alpha'^2 \sin^2 \varepsilon}$,

$$B = g \cos \varepsilon + R[\varepsilon'^2 + (\omega + \alpha')^2 \sin^2 \varepsilon].$$

Система (14) фактично є системою двох перших рівнянь відносно невідомих залежностей $\alpha = \alpha(t)$ і $\varepsilon = \varepsilon(t)$, а залежність $N = N(t)$ знаходиться після розв'язання цієї системи чисельними методами. Знайдені залежності $\alpha = \alpha(t)$ і $\varepsilon = \varepsilon(t)$ потрібно підставити у рівняння (1) для того, щоб одержати відносну траєкторію руху частинки по сферичному диску, тобто траєкторію ковзання, і у рівняння (3), щоб одержати абсолютну траєкторію руху.

На рис. 3 і 4 чисельними методами побудовано відносну і абсолютну траєкторії руху частинки по диску протягом 2 с при наступних параметрах: $R = 0,5$ м, $\omega = 20$ с⁻¹, $f = 0,3$.

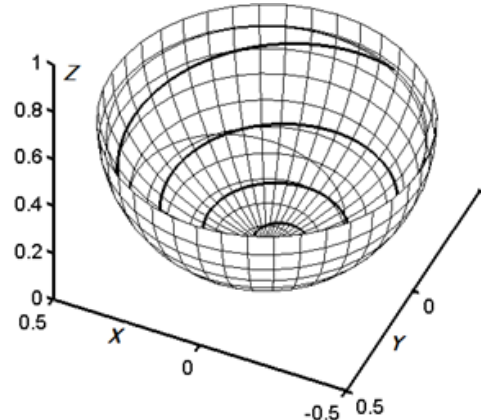


Рис. 3. Відносна (потовщена лінія) і абсолютна траєкторії руху частинки на поверхні сферичного сегмента.

Fig. 3. The relative (thick line) and the absolute trajectory of particle motion on the surface of the spherical segment.

Аналізуючи траєкторії, можна зробити висновок, що частинка ковзає по сфері, піднімаючись до певного положення, потім «залипає» і обертається разом із поверхнею. Це підтверджується графіками відносної і абсолютної швидкостей частинки, наведеними на рис. 5. Абсолютна швидкість частинки V_a визначається, як геометрична сума її проєкцій (9) за (5).

Із графіка на рис. 5 видно, що через 1,6 с після початку руху частинка «залипає», тобто швидкість її ковзання стає рівною нулю, а абсолютна швидкість стає рівною $V_a = 10$ м/с. Із графіка зміни кута ε (рис. 6) видно, що в момент залипання частинки при $t = 1,6$ с він досягає максимального значення $\varepsilon = 85^\circ$, тобто

частинка разом із сегментом обертається по колу, яке практично дорівнює екватору сфери, тобто радіусу сфери R . Виходячи із заданих значень $R=0,5$ м і $\omega=20$ c^{-1} , знаходимо: $V_a=\omega \cdot R=10$ м/с, тобто отримане значення швидкості узгоджується із графіком.

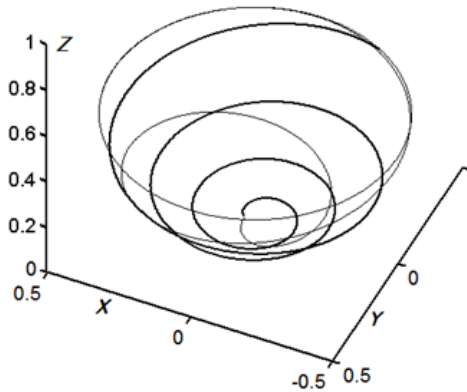


Рис. 4. Відносна (потовщена лінія) і абсолютна траєкторії руху частинки без поверхні сегмента.

Fig. 4. The relative (thick line) and the absolute trajectory of particle motion without the surface of the segment.

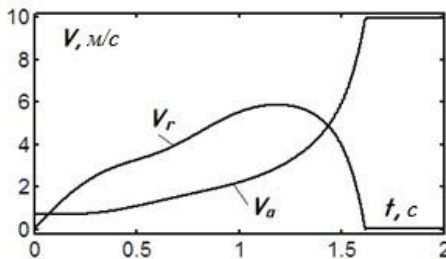


Рис. 5. Графіки відносної V_r і абсолютної V_a швидкостей руху частинки.

Fig. 5. Graphs of relative V_r and absolute V_a velocities of particle motion.

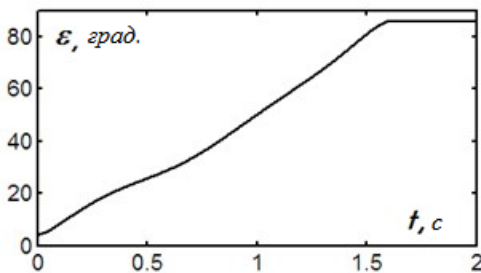


Рис. 6. Графік зміни кута ε .

Fig. 6. Graph of the angle change ε .

Якщо частинка починає свій рух не з нижньої точки сегмента, а дещо вище (наприклад, при $\varepsilon_0=45^\circ$, як показано на рис. 7), то вона швидше досягає верхньої граничної траєкторії, виходячи за межі півсфери. Для цього їй потрібно 0,2 с (рис. 8).

На рис. 9 показаний графік зміни реакції поверхні для частинки масою $m=0,01$ кг.

Рух частинки по внутрішній стінці поверхні, що обертається, має місце в пристроях для витискання соку із перетертих плодів або овочів. Зазвичай там використовується зрізаний конус з отворами в ньому для виходу соку. Рух частинки технологічного матеріалу по внутрішній поверхні конуса відрізняється від

аналогічного руху по поверхні сегмента. Ковзаючи по поверхні конуса, частинка буде підніматися вгору, причому швидкість підйому буде зростати [7]. Для сегмента сфери характерне гальмування швидкості V_r ковзання частинки при її підйомі вгору аж до «залипання» в околі екватора (рис. 5). Але саме у зоні гальмування відбувається найбільш інтенсивне соковиділення, про що свідчить різке зростання тиску на частинку (рис. 9).

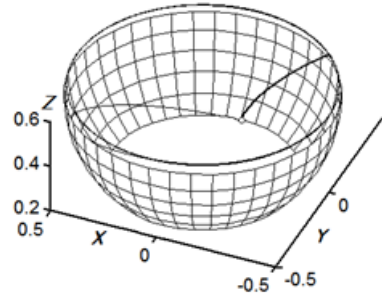


Рис. 7. Відносна (потовщена лінія) і абсолютна траєкторії руху частинки по обмеженій ділянці сегмента.

Fig. 7. Relative (thick line) and absolute trajectory of motion on a bounded area of a segment.

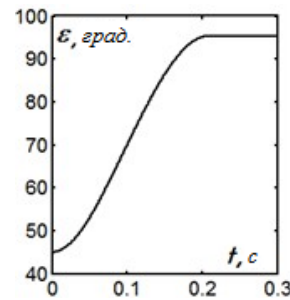


Рис. 8. Графік зміни кута ε для початкового значення $\varepsilon_0=45^\circ$.

Fig. 8. Graph of change of angle ε for initial value $\varepsilon_0=45^\circ$.

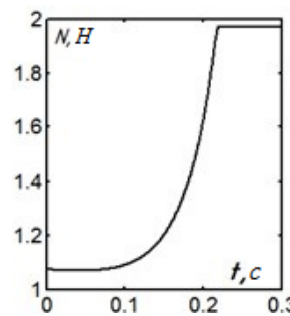


Рис. 9. Графік зміни реакції поверхні для частинки масою $m=0,01$ кг.

Fig. 9. Graph of change of surface reaction for a particle with mass $m=0.01$ kg.

Звичайно, характер руху технологічного матеріалу, яким є мезга, відрізняється від руху частинки. У розглянутій моделі не враховуються перешкоди для руху, якими є отвори у стінці поверхні. Очевидно, при обертанні конуса частина матеріалу рухається вгору і виходить за його межі, не віддавши повністю сік. Інша частина «залипає» і відділяється від поверхні за допомогою механічного пристрою з ручним приво-

дом. Однак поведінка окремої частинки дає якісну картину руху, яка певною мірою може бути перенесена на рух матеріалу. Зокрема, застосування сферичного сегменту дає можливість запобігти самовільному покиданню частиною матеріалу робочої зони.

Висновки

1. Рух частинки по внутрішній шорсткій поверхні сферичного сегмента має свої особливості. Вони стосуються характеру ковзання частинки по поверхні. При попаданні частинки на поверхню в нижній частині сегмента відбувається її розгін із одночасним підйомом вгору. Такий рух характеризується зміною двох швидкостей: відносної, тобто швидкості ковзання, і абсолютної.

2. Відносна швидкість спочатку зростає, а потім зменшується до нуля в момент «залипання» частинки. Абсолютна швидкість частинки весь час зростає і стає постійною після її «залипання». «Залипання» частинки відбувається на висоті, близькій до екватора сфери, причому вона може залипати як нижче, так і вище від нього в залежності від вихідних умов.

Список літератури

1. Pylypaka S., Klendii M., Zaharova T. Movement of the Particle on the External Surface of the Cylinder, Which Makes the Translational Oscillations in Horizontal Planes. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019. Part F2. P. 336–345.
2. Pylypaka S., Klendii M., Kremets T., Klendii O. Particle motion over the surface of a cylinder, which performs translational oscillations in a vertical plane. Engineering Journal. 2018. Vol. 22(3). P. 83–92.
3. Batluk V., Basov M., Klymets V. Mathematical model for motion of weighted parts in curled flow. Econtechmod. An International Quarterly Journal. 2013. Vol. 2. № 3. P. 17–24.
4. Liaposchenko O., Pavlenko I., Nastenko O. The model of crossed movement and gas-liquid flow interaction with captured liquid film in the inertial-filtering separation channels. Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 173. P. 240–243.
5. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60, no 4, P. 313–317. <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0313>.
6. Pylypaka S. F., Nesvidomin V. M., Klendii M. B., Rogovskii I. L., Kresan T. A., Trokhaniak V. I. Conveyance of a particle by a vertical screw, which is limited by a coaxial fixed cylinder. Bulletin of the Karaganda University – Mathematics. 2019. Vol. 95. Issue 3. P. 108–118. doi 10.31489/2019M2/108-119.
7. Пилипака С. Ф., Захарова Т. Н., Несвидомин А. В. Форма оси гибкой несжимаемой полосы при ее толкании по наклонной шероховатой плоскости с постоянной скоростью. MOTROL. Rzeszow. 2013. Vol. 15. No 4. P. 198–205.

References

1. Pylypaka S., Klendii 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. 2. 336–345.
2. Pylypaka S., Klendii M., Kremets T., Klendii O. (2018). Particle motion over the surface of a cylinder, which performs translational oscillations in a vertical plane. Engineering Journal. 22(3). 83–92.
3. Batluk V., Basov M., Klymets V. (2013). Mathematical model for motion of weighted parts in curled flow. Econtechmod. 2(3). 17–24.
4. Liaposchenko O., Pavlenko I., Nastenko O. (2017). The model of crossed movement and gas-liquid flow interaction with captured liquid film in the inertial-filtering separation channels. Separation and Purification Technology. 173. 240–243.
5. Kresan T., Pylypaka S., Ruzhylo Z., Rogovskii I., Trokhaniak O. (2020). External rolling of a polygon on a closed curvilinear profile. Acta Polytechnica. 60(4). 313–317. <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0313>.
6. Pylypaka S. F., Nesvidomin V. M., Klendii M. B., Rogovskii I. L., Kresan T. A., Trokhaniak V. I. (2019). Conveyance of a particle by a vertical screw, which is limited by a coaxial fixed cylinder. Bulletin of the Karaganda University – Mathematics. 95(3). 108–118. doi 10.31489/2019M2/108-119.
7. Pilypaka S. F., Zaharova T. N., Nesvidomin A. V. (2013). The shape of the axis of a flexible incompressible strip when it is pushed along an inclined rough plane at a constant speed. MOTROL. Rzeszow. 15(4). 198–205.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЧКИ ПО ВРАЩАЮЩЕМУСЯ СФЕРИЧЕСКОМУ СЕГМЕНТУ

Т. Н. Волина, С. Ф. Пилипака

Аннотация. В статье рассмотрено относительное движение частички по сферическому сегменту, который вращается вокруг вертикальной оси. Составлены дифференциальные уравнения относительного перемещения частички, которые решены численными методами. Построено относительную и абсолютную траектории движения частички и графики изменения относительной и абсолютной скоростей. Выявлено закономерность движения частички при ее подъеме по поверхности.

Ключевые слова: сферический сегмент, угловая скорость вращения, относительное движение, частичка, дифференциальные уравнения, кинематические параметры.

INVESTIGATION OF PARTICLE MOVEMENT ON ROTARY SPHERICAL SEGMENT

T. M. Volina, S. F. Pylypaka

Abstract. The article considers the relative movement of a particle along a spherical segment that rotates around a vertical axis. Differential equations of relative displacement of a particle have been compiled and solved by numerical methods. The relative and absolute particle

trajectories and the graphs of changes in relative and absolute velocities were constructed. The regularity of the particle's movement when it rises on the surface is clarified.

Key words: spherical segment, angular velocity of rotation, relative movement, particle, differential equations, kinematic parameters.

Т. М. Воліна ORCID 0000-0001-8610-2208.

С. Ф. Пилипака ORCID 0000-0002-1496-4615.