

В.Т. Дмитрів, І.В. Дмитрів, Р.В. Городняк, О.Я. Саган
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ СХОДЖЕННЯ СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ З ВІДЦЕНТРОВОГО КОНУСНОГО ДИСКОВОГО ДОЗАТОРА

© Дмитрів В.Т., Дмитрів І.В., Городняк Р.В., Саган О.Я., 2021

Мета. Розроблення аналітичної моделі та дослідження переміщення частинки по поверхні конусного дискового ротаційного дозатора-змішувача сипких матеріалів. **Методика.** На частинку, яка розміщена на конусному диску, діє сила тяжіння, направлена вертикально вниз, сила тиску вертикальної складової сипкого компоненту. Сила нормальної реакції поверхні конусного диску направлена перпендикулярно до твірної конуса диска-дозатора в заданій точці де розміщена матеріальна частинка. Систему координат декартова. Вісь x напрямлена по твірній від вершини, вісь y перпендикулярна до осі x і z й напрямлена в сторону обертання диска, а вісь z напрямлена вертикально вгору. Вектор відцентрової сили напрямлений вздовж радіуса. Сила Кориоліса напрямлена по дотичній перпендикулярно до осі x в протилежну сторону до напрямку обертання диска. Сила тертя, як результуючий вектор сили, напрямлений в протилежний напрям від напрямку переміщення частинки по диску що зумовлено відцентровою силою. Сила тертя частинки об поверхню диску розкладається на нормальну і радіальну проєкції. Розглядаючи елементарну частинку, як матеріальну точку, диференціальне рівняння руху в векторній формі. Проектуючи векторну рівність на осі X , Y , отримано систему диференціальних рівнянь руху частинки. Для розв'язку диференціальних рівнянь використано числовий метод розв'язку Рунге-Кутта за допомогою функції `rkfixed` в середовищі `MathCad`. **Результати.** Швидкість і траєкторія переміщення частинки сипкого матеріалу залежить від кута твірної конусного диску і частоти його обертання. Із збільшення кута твірної конуса зменшується тривалість переміщення частинки по поверхні конуса й віддаль переміщення. Плавність переміщення визначається кутом між векторами швидкостей v_x і v_y . Плавність зміни напрямку вектора результуючої швидкості уможливує підвищення точності дозування матеріалу і збільшує дискретність. **Наукова новизна.** Вперше отримано систему диференціальних рівнянь руху матеріальної частинки по конусному диску-дозаторі відцентрового типу, що враховують розподіл сил тертя частинки об поверхню диску на нормальну і радіальну проєкції, та їх розв'язок числовим методом Рунге-Кутта. **Практична цінність.** Система диференціальних рівнянь та алгоритм їх розв'язку уможливує моделювання конструкторно-технологічних параметрів відцентрового конусного дискового дозатора сипких матеріалів.

Ключові слова: дозатор дисковий, метод Рунге-Кутта, відцентрова сила, сила Кориоліса, вектор швидкості, система диференціальних рівнянь.

Вступ

Проектування робочих елементів технологічного обладнання, зокрема дискового дозатора-змішувача неможливо без визначення кінематичних параметрів переміщення матеріалу на поверхні робочого органу. У випадку дискового дозатора-змішувача для переміщення матеріалу необхідно визначити траєкторію руху окремої частинки сипкого матеріалу, параметрів взаємодії з рухомою поверхнею, що є важливою прикладною задачею і уможливує на етапі проектування забезпечити високу точність дозування й однорідність процесу змішування. Тому розроблення аналітичної моделі переміщення частинки матеріалу на поверхні дозуючого диску є актуальним.

Аналіз останніх досліджень

Відцентрові дискові дозатори набули широкого використання у різних галузях виробництва і технологіях застосування [1-6]. Зокрема, досліджено рух частинок у вигляді зернини як по дисковій шороховатій поверхні [7] так і з використанням лопаток [8].

При виведенні залежностей не враховано навантаження на частинку від додаткового матеріалу в завантажувальному бункері. При русі частинки по поверхні з прокручуванням, широко

використовується модель сфери. В роботі [9] приведено рішення задачі руху сфери по довільній траєкторії. Ударна взаємодія сферичних частинок з робочими поверхнями машин розглянуто в роботах [10; 11]. Зокрема дослідниками розроблені аналітичні залежності на основі схеми дії сил на частинку для визначення відносної швидкості її руху вздовж лопатки і обґрунтування основних конструкційно-технологічних параметрів робочого органу [12; 13]. Проведені дослідження руху частинки сипкого матеріалу по поверхні ротаційного конуса [14-20].

Однак ряд питань обґрунтування параметрів руху матеріалу по конусних ротаційних поверхнях залишилися не дослідженими, не обґрунтовано радіус диску від кута конуса, частоти обертання і енергетичні показники дозування матеріалу, невстановлені оптимальні конструкційно-кінематичні параметри конусного дозуючого диска в залежності від технологічних факторів.

Тому розроблення аналітичної моделі руху частинки матеріалу по конусному диску в залежності від кінематичних характеристик процесу дозування і характеристик дозуючого матеріалу є актуальним для розрахунку і проектування робочих органів даного типу.

Мета

Розроблення аналітичної моделі та дослідження переміщення частинки по поверхні конусного дискового ротаційного дозатора-змішувача сипких матеріалів.

Постановка задачі

Для дозування сипких матеріалів з одночасним наданням їм кінетичної енергії використаємо конусний диск, який обертаючись, створює відцентрову силу, що регулюється частотою обертання диску. Просторова схема дії сил на матеріальну частинку, яка рухається по диску, наведена рис. 1.

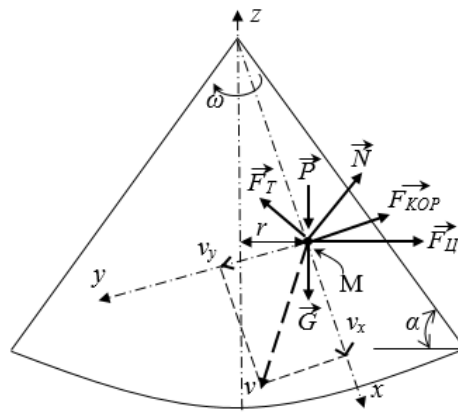


Рис.1. Просторова схема дії сил на матеріальну частинку, яка рухається по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора

Fig. 1. Spatial scheme of action of forces on a material particle moving on the surface of a centrifugal cone disk dispenser

На частинку діє сила тяжіння $G = m \cdot g$, направлена вертикально вниз, сила тиску вертикальної складової сипкого компоненту $P = \rho_{kl} \cdot V_{kl} \cdot g$. Сила нормальної реакції поверхні конусного диску направлена перпендикулярно до твірної і відповідно буде становити $N = m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$, де α – кут між основою і твірною конуса диска.

Систему координат такою, що вісь x напрямлена по твірній від вершини, вісь y перпендикулярна до осі x і z й напрямлена в сторону обертання диска, а вісь z напрямлена вертикально вгору. Вектор відцентрової сили напрямлений вздовж радіусу r_i і становить $F_{Ц} = m \cdot \omega^2 \cdot r_i$. Сила Кориоліса напрямлена по дотичній перпендикулярно до осі x в протилежну сторону до напрямку обертання диска, $F_{КОР} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x}$. Сила тертя, як результуючий вектор сили, напрямлений в протилежний напрям від напрямку переміщення частинки по диску що зумовлено відцентровою силою, $F_T = f_s \cdot N$. Відповідно, у наведених залежностях: ω – кутова

швидкість конусного диска, рад/с; r_i – радіус від осі обертання до частинки, $r_i = x \cdot \cos(\alpha)$, м; ρ_{k1} – густина сипкого матеріалу, що рухається по конусу диска, кг/м³; V_{k1} – об’єм матеріалу над частинкою, що рухається по конусу диска, м³; g – пришвидшення вільного падіння, м/с²; f_3 – зовнішній коефіцієнт тертя ковзання між частинкою сипкого матеріалу і поверхнею конусного диска; \dot{x} – швидкість переміщення частинки по осі x , м/с; m – маса матеріальної частинки, кг.

Розглядаючи елементарну частинку, як матеріальну точку, диференціальне рівняння руху в векторній формі буде мати вигляд:

$$m \ddot{a} = G + F_T + F_{Ц} + N + P + F_{КОР}, \quad (1)$$

Модель переміщення частинки по відцентровому конічному диску

Проектуючи векторну рівність (1) на осі X , Y , одержимо систему диференціальних рівнянь руху частинки у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \ddot{a} X = 0: F_{Ц} \cos \alpha + G \sin \alpha + P \sin \alpha - F_{TX} - m \dot{x} \dot{\omega} = 0 \\ \ddot{a} Y = 0: -F_{КОР} + F_{TY} - m \dot{y} \dot{\omega} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Перепишемо систему диференціальних рівнянь (2), врахувавши складові сил через їх вирази. Сила тертя частинки об поверхню диску розкладається на нормальну і радіальну проекції. Проекції сили тертя на осі X і Y будуть відповідно становити:

$$F_{Tx} = F_T \times \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \quad F_{Ty} = F_T \times \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (3)$$

Знаючи діаметр бункера та зазор між поверхнею диску і торцем бункера, запишемо залежність для визначення подачі:

$$Q = 2 > r > R > h_0 > u, \quad (4)$$

де R – радіус нижньої кромки бункера компонента, м;

h_0 – зазор між торцем бункера і поверхнею конусного диска, м.

Враховуючи радіальну швидкість, подачу дозатора можна визначити за залежністю:

$$Q = x > \cos \alpha > 2 > r > h > \dot{x} \quad (5)$$

де h – товщина шару сипкого матеріалу над конусним диском, м.

Прирівнявши залежності (4) і (5) визначимо товщину шару сипкого матеріалу

$$h = \frac{R > h_0 > u}{x > \cos \alpha > \dot{x}}. \quad (6)$$

Враховуючи вираз абсолютної швидкості $u = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$, залежність (6) буде мати вигляд

$$h = \frac{R > h_0}{x > \cos \alpha} \times \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{\dot{x}}. \quad (7)$$

Рівняння руху частинки по осях X і Y набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} m \ddot{x} = m \omega^2 \times x \times \cos^2 \alpha + m \times g \times \sin \alpha + r_{k1} \times g \times \frac{R > h_0}{x \times \cos \alpha} \times \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{\dot{x}} \times r \times R^2 \times \sin \alpha - \\ - f_3 \times m \times g \times \cos \alpha \times \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} - g \times r_{k1} \times f_3 \times \frac{R > h_0}{x} \times r \times R^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$m \ddot{y} = - 2 \times m \times \omega \times \dot{x} \times \dot{y} + f_3 \times m \times g \times \cos \alpha \times \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + f_3 \times r_{k1} \times g \times \frac{R > h_0}{x} \times \frac{\dot{y}}{\dot{x}} \times r \times R^2. \quad (9)$$

Врахуємо, що маса визначається як $m = \rho_{ki} \cdot h_0 \cdot \pi \cdot R^2$, рівняння (8) і (9) набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = w^2 x \cos^2 \alpha + g \sin \alpha + g \times \frac{R \sin \alpha}{x \cos \alpha} \times \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x} - f_3 \times g \cos \alpha \times \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - g \times f_3 \times \frac{R}{x} \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -2w \times y + f_3 \times g \cos \alpha \times \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + f_3 \times g \times \frac{R}{x} \times \frac{y}{x} \end{cases} \quad (10)$$

Дана система рівнянь (10) розв'язується числовим методом.

Результати досліджень та їх обговорення

Вихідними параметрами є конструкційні розміри диска: радіус конусного диска $R = 0,05$ м; радіус від вісі до початку переміщення частинки $r_0 = 0,005$ м; кут твірної конуса $\alpha = \pi \cdot \theta / 180$, де $\theta = 0, 10, 20$ – кут твірної конуса в град.; прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с²; кутова швидкість обертання конусного диска $w = 39 \dots 64$ рад/с.

Розв'язок системи рівнянь (10) проведено за допомогою функції rkfixed(X, t1, t2, Npoint, D), аргументами якої є: X – вектор початкових умов; t1 і t2 – відповідно початкове і кінцеве значення змінної системи диференціальних рівнянь; Npoint – число розбивок відрізка [t1; t2]; D – оператор диференціювання. Алгоритм числового розв'язку диференціальних рівнянь функції rkfixed використовує метод Рунге-Кутта четвертого порядку точності, з вибором великої кількості точок розбиття відрізка змінного параметра забезпечується висока точність результатів розрахунку.

Результати розв'язку приведені у вигляді матриці (рис.2), перший стовпчик характеризує зміну часу (с), другий – зміну координати x частинки (м), третій – зміну координати y (м), четвертий – радіальна швидкість частинки (м/с), п'ятий – тангенціальна швидкість частинки (м/с).

t, c	x(R), M					y, M	v _x , M/c					v _y , M/c
	0	1	2	3	4		0	1	2	3	4	
85	0.043	0.033	-0.043	2.028	-3.726							
86	0.043	0.034	-0.045	2.095	-3.86							
87	0.044	0.035	-0.047	2.164	-4							
88	0.044	0.036	-0.049	2.235	-4.143							
89	0.045	0.037	-0.051	2.308	-4.291							
90	0.045	0.038	-0.054	2.383	-4.444							
91	0.046	0.039	-0.056	2.461	-4.602							
92	0.046	0.041	-0.058	2.542	-4.765							
93	0.047	0.042	-0.061	2.625	-4.934							
94	0.047	0.043	-0.063	2.711	-5.107							
95	0.048	0.045	-0.066	2.799	-5.286							
96	0.048	0.046	-0.068	2.891	-5.471							
97	0.049	0.047	-0.071	2.985	-5.662							
98	0.049	0.049	-0.074	3.082	-5.859							
99	0.05	0.051	-0.077	3.183	-6.063							
100	0.05	0.052	-0.08	3.287	...							

a)

b)

t, c	x(R), M					y, M	v _x , M/c					v _y , M/c
	0	1	2	3	4		0	1	2	3	4	
0	0	5·10 ⁻³	0	0	0							
1	5·10 ⁻⁴	5.004·10 ⁻³	-4.163·10 ⁻⁸	0.017	-3.057·10 ⁻⁴							
2	1·10 ⁻³	5.017·10 ⁻³	-4.469·10 ⁻⁷	0.037	-1.455·10 ⁻³							
3	1.5·10 ⁻³	5.041·10 ⁻³	-1.636·10 ⁻⁶	0.057	-3.442·10 ⁻³							
4	2·10 ⁻³	5.074·10 ⁻³	-4.028·10 ⁻⁶	0.077	-6.263·10 ⁻³							
5	2.5·10 ⁻³	5.117·10 ⁻³	-8.038·10 ⁻⁶	0.096	-9.916·10 ⁻³							
6	3·10 ⁻³	5.17·10 ⁻³	-1.408·10 ⁻⁵	0.116	-0.014							
7	3.5·10 ⁻³	5.233·10 ⁻³	-2.257·10 ⁻⁵	0.135	-0.02							
8	4·10 ⁻³	5.305·10 ⁻³	-3.392·10 ⁻⁵	0.154	-0.026							
9	4.5·10 ⁻³	5.387·10 ⁻³	-4.853·10 ⁻⁵	0.174	-0.033							
10	5·10 ⁻³	5.479·10 ⁻³	-6.682·10 ⁻⁵	0.193	-0.041							
11	5.5·10 ⁻³	5.58·10 ⁻³	-8.918·10 ⁻⁵	0.212	-0.049							
12	6·10 ⁻³	5.691·10 ⁻³	-1.16·10 ⁻⁴	0.23	-0.058							
13	6.5·10 ⁻³	5.81·10 ⁻³	-1.477·10 ⁻⁴	0.249	-0.069							
14	7·10 ⁻³	5.94·10 ⁻³	-1.847·10 ⁻⁴	0.267	-0.079							
15	7.5·10 ⁻³	6.078·10 ⁻³	-2.273·10 ⁻⁴	0.286	...							

S =

с)

Рис.2. Результати розв'язку системи диференціальних рівнянь (10) за наступних параметрів:
 а - $\theta = 1$, град., $w = 64$ рад/с; б - $\theta = 10$, град., $w = 50$ рад/с; с - $\theta = 20$, град., $w = 39$ рад/с
 Fig. 2. The results of solving the system of differential equations (10) for the following parameters:
 а - $\theta = 1$, deg., $w = 64$ rad/s; б - $\theta = 10$, deg., $w = 50$ rad/s; с - $\theta = 20$, deg., $w = 39$ rad/s

Результати моделювання швидкостей за різних значеннях кутової швидкості обертання і кута твірної диска-дозатора приведено на рис. 3. Траєкторія переміщення частинки сипкого матеріалу по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора і зміна кута між векторами радіальної і абсолютної швидкостей приведені відповідно на рис. 4 і 5.

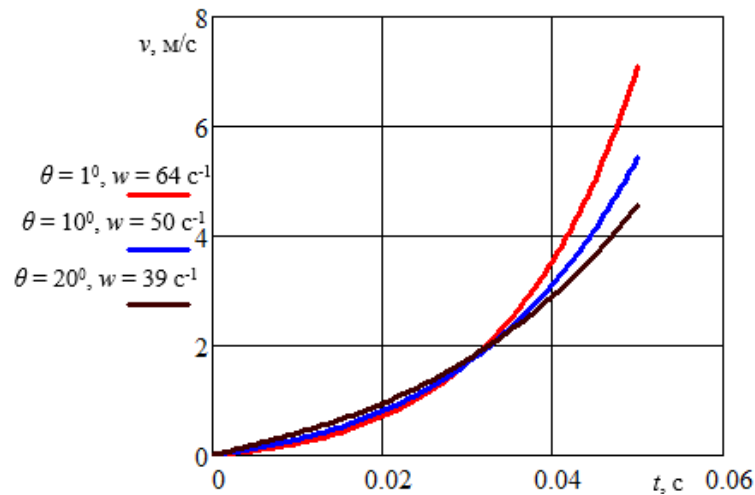


Рис.3. Результати моделювання абсолютної швидкості переміщення частинки сипкого матеріалу по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора
 Fig.3. The results of modeling the absolute speed of movement of a particle of bulk material on the surface of a centrifugal conical disk dispenser

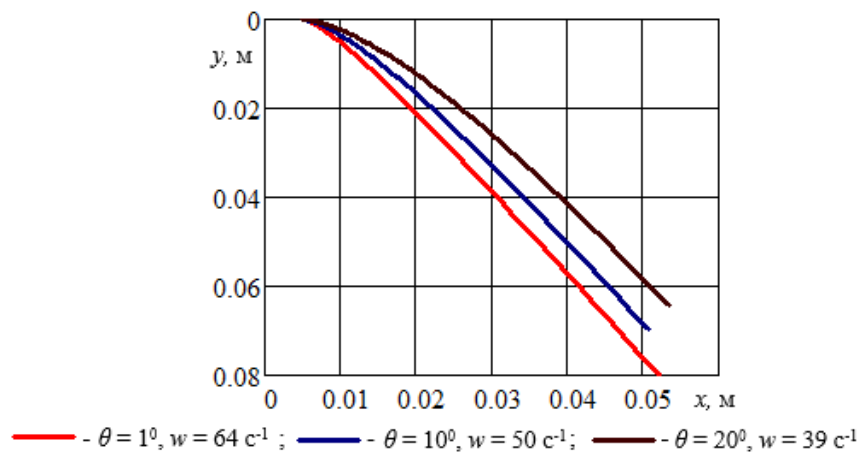


Рис. 4. Траєкторії переміщення частинки по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора
 Fig. 4. The trajectory of the particle on the surface of the centrifugal conical disk dispenser

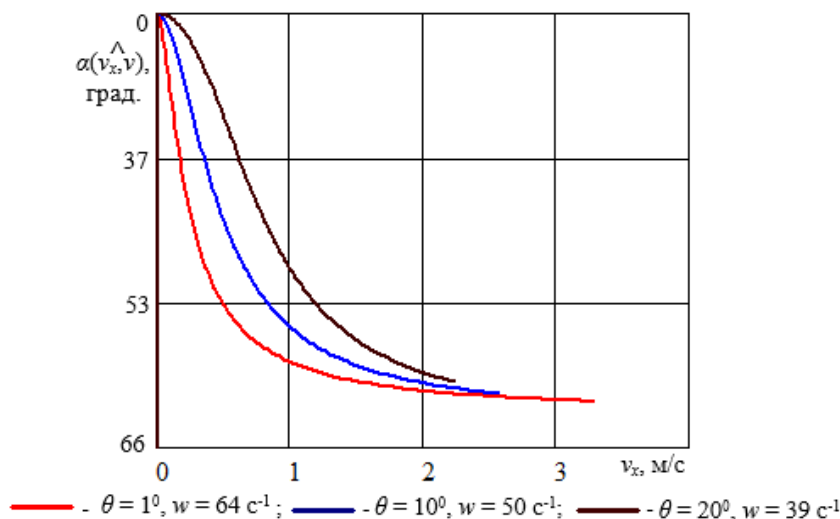


Рис. 5. Зміна кута між векторами радіальної і абсолютної швидкостей при переміщенні частинки сипкого матеріалу по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора

Fig. 5. Changing the angle between the vectors of radial and absolute velocities when moving a particle of bulk material on the surface of a centrifugal conical disk dispenser

Збільшення кута твірної конусного диску зменшує переміщення частинки по координаті y , відповідно зменшується кут між векторами радіальної і абсолютної швидкостей при переміщенні частинки сипкого матеріалу по поверхні відцентрового конусного дискового дозатора. Нами промодельовано для кутів твірної конуса 1, 10 і 20 градусів і кутових швидкостей диска відповідно 64, 50 і 39 рад./с.

Аналіз результатів (рис. 3–5) показує, що збільшення кута твірної конуса уможливорює зменшення частоти обертання диска і покращує плавність зміни абсолютної швидкості переміщення частинки по диску, що покращує плавність і точність дозування сипкого матеріалу.

Висновки

Швидкість і траєкторія переміщення частинки сипкого матеріалу залежить від кута твірної конусного диску і частоти його обертання. Із збільшення кута твірної конуса зменшується тривалість переміщення частинки по поверхні конуса й віддаль переміщення. Плавність переміщення визначається кутом між векторами швидкостей v_x і v_y . Плавність зміни напрямку вектора результуючої швидкості уможливорює підвищення точності дозування матеріалу і зменшує дискретність доз регулювання.

Дана система диференціальних рівнянь та алгоритм їх розв'язку уможливорює моделювання конструкторно-технологічних параметрів відцентрового конусного дискового дозатора-змішувача сипких матеріалів.

Список літератури

1. Khudher A.Y., Himoud M.S., Almaliki S.A. Modulating a Centrifuge Spreader Disc and Evaluating Performance Under Some Different Operating Factors, International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. – 2020. - Vol. 16. - P. 1799–1805. <https://connectjournals.com/03899.2020.16.1799>
2. Marano S., Barker S.A., Raimi-Abraham B.T., Missaghi S., Rajabi-Siahboomi A., Craig D.Q.M. Development of micro-fibrous solid dispersions of poorly water-soluble drugs in sucrose using temperature-controlled centrifugal spinning, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. – 2016. – Vol. 103. – P. 84–94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.03.021>.
3. Wang Y., Huo X. Multiobjective Optimization Design and Performance Prediction of Centrifugal Pump Based on Orthogonal Test, Advances in Materials Science and Engineering. - 2018. – 10 p., <https://doi.org/10.1155/2018/6218178>.

4. Strohmeier O., Keller M., Schwemmer F., Zehnle S., Mark D., von Stetten F., Zengerle R., Paust N. Centrifugal microfluidic platforms: advanced unit operations and applications, *Chemical Society Reviews*. – 2015. – Vol. 44, Iss. 17. – P. 6187-6229, DOI: 10.1039/c4cs00371c .
5. Madadelahi M.M., Acosta-Soto L.F., Hosseini S., Martinez-Chapa S.O., Madou M.J. Mathematical modeling and computational analysis of centrifugal microfluidic platforms: a review, *Lab Chip*. – 2020. – Vol. 20, Iss. 8. – P. 1318-1357, doi: 10.1039/c9lc00775j .
6. Deng G., Wang N., Zhou C., Li J. A. Simplified Analysis Method for the Piezo Jet Dispenser with a Diamond Amplifier, *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18, Iss. 7. – P. 2115-2127, doi:10.3390/s18072115.
7. Смаглій В. І. Рух матеріальної частинки по шорстких дисках, *Наук. вісн. НУБіП України. Серія: Техніка і енергетика АПК*. - 2013. - Вип. 185, Ч. 1. – С. 117-126. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2013_2_13
8. Адамчук О. Теория разгона удобрений рассеивающим рабочим органом центробежного типа, *Научни трудове на Русенския университет*. – 2013. - Т. 52, серия 1. - С. 22-30 . <http://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.1/1.1-3.pdf>
9. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики. – К.: УСХА, 1992. – 512 с.
10. Морозов І.В., Дудін О.В. Модель траєкторії руху зерна по поверхнях сільськогосподарських машин, *Вісник Харківського держ. технічного університету с. г. “Механізація сільськогосподарського виробництва”*. – Харків: ХДТУСГ, 2003. – Вип.21. - С. 124-131. ISBN 5-7987-0176X
11. Рогатинський Р.М. Модель контактної взаємодії частинки вантажу з робочими поверхнями сільськогосподарських машин, *Вісник Харківського держ. технічного університету с. г. “Механізація сільськогосподарського виробництва”*. - Харків: ХДТУСГ, 2003. – Вип.21. - С. 222-228.
12. Адамчук В.В. Вплив параметрів і режимів роботи розсіювального органу на сходження з нього частинок мінеральних добрив, *Вісник аграрної науки*. – 2004. Вип. 12. – С. 42-45.
13. Адамчук В.В. Теорія відцентрових робочих органів машин для внесення мінеральних добрив. – К.: Аграрна наука, 2010. – 117 с.
14. Бойко І.Г., Попов О.А. Дослідження руху частинки сипучого корму по поверхні подаючого конуса ротаційного дозатора, *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства “Сучасні проблеми удосконалення технічних систем і технологій в тваринництві”*. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 95. - С. 72-77. <http://dspace.khntusg.com.ua/handle/123456789/4509>
15. Райхман Д., Симонов А. Обоснование параметров загрузочного устройства роторно-центробежной мельницы для фуражного зерна, *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – 2013. Vol. 5. – P. 123-128.
16. Семенцов В.І., Бойко І.Г. Методика і результати дослідження швидкості сходження частинки з диску відцентрового змішувача, *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства “Технічні системи і технології тваринництва”*. – Харьков: ХНТУСГ, 2015. - Вип. 157. – С. 52-56.
17. Batluk V., Basov M., Klymets V. Mathematical model for motion of weighted parts in curled flow, *Econtechmod. An International Quarterly Journal*. –2013. - Vol. 2, Iss. 3. – P. 17–24.
18. Банга В., Дмитрів В. Теоретичні дослідження індивідуального роздавача-дозатора комбікормів, *Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. – 2007. – Вип. 76(99). – С. 115-118.
19. Садов В.В., Садовая В.А. Обоснование параметров разгонного диска на дробилках с вертикальными валами, *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2009. – Вип. 1 (51). – С. 43-46.
20. Войтюк Д.Г., Пилипака С.Ф. Теоретичні дослідження руху матеріальних частинок в відцентрових апаратах з криволінійними лопатками і змінним кутом їх підйому, *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. - Мелітополь: ТГАТА, 2006. – Вип. 39. - С. 11-20.

V.T. Dmytriv, I.V. Dmytriv, R.V. Gorodnyak, O.Ya. Sahan,
Lviv Polytechnic National University

SIMULATION OF BULK MATERIAL DESCENT FROM CENTRIFUGAL CONE DISC DISPENSER

Aim. Development of an analytical model and study of particle movement on the surface of a conical disk rotary dispenser-mixer of bulk material. **Method.** The particle, which is placed on the conical disk, is subjected to

gravity directed vertically downwards, the pressure force of the vertical component of the bulk component. The force of the normal reaction of the surface of the conical disk is directed perpendicular to the cone generating line of the dispenser disk at a given point where the material particle is located. Cartesian coordinate system. The x-axis is directed along the generator line from the vertex, the y-axis is perpendicular to the x-axis and z-axis and is directed towards the rotation of the disk, and the z-axis is directed vertically upwards. The centrifugal force vector is directed along the radius. The Coriolis force is directed tangentially perpendicular to the x-axis in the opposite direction to the direction of rotation of the disk. The friction force, as the resulting force vector, is directed in the opposite direction from the direction of movement of the particle on the disk due to the centrifugal force. The force of friction of the particle on the surface of the disk decomposes into normal and radial projections. Considering an elementary particle as a material point, the differential equation of motion in vector form. Projecting the vector equality on the X and Y axis, we obtain a system of differential equations of particle motion. The numerical Runge-Kutta solution using the rkfixed function in the MathCad environment was used to solve the differential equations. **Results.** The speed and trajectory of the particles of bulk material depends on the angle of the conical disk and the frequency of its rotation. As the angle of the cone generating line increases, the duration of movement of the particle on the surface of the cone and the distance of movement decreases. The smoothness of movement is determined by the angle between the velocity vectors v_x and v_y . Smooth change of the direction of the vector of the resulting speed makes it possible to increase the accuracy of dosing the material and increases the discreteness. **Scientific novelty.** For the first time, a system of differential equations of motion of a material particle on a conical dispenser of centrifugal type was obtained, which takes into account the distribution of particle friction forces on the disk surface on normal and radial projections and their solution by the Runge-Kutta numerical method. **Practical value.** The application of the obtained system of differential equations and the algorithm of their solution makes it possible to model the design and technological parameters of the disk conical centrifugal dispenser of bulk materials.

Keywords: disc dispenser, Runge-Kutta method, centrifugal force, Coriolis force, velocity vector, system of differential equations.

References

1. Khudher A.Y., Himoud M.S., Almaliki S.A. Modulating a Centrifuge Spreader Disc and Evaluating Performance Under Some Different Operating Factors, International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. – 2020. - Vol. 16. - P. 1799–1805.
2. Marano S., Barker S.A., Raimi-Abraham B.T., Missaghi S., Rajabi-Siahboomi A., Craig D.Q.M. Development of micro-fibrous solid dispersions of poorly water-soluble drugs in sucrose using temperature-controlled centrifugal spinning, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics. – 2016. – Vol. 103. – P. 84–94, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.03.021> .
3. Wang Y., Huo X. Multiobjective Optimization Design and Performance Prediction of Centrifugal Pump Based on Orthogonal Test, Advances in Materials Science and Engineering. - 2018. – 10 p., <https://doi.org/10.1155/2018/6218178> .
4. Strohmeier O., Keller M., Schwemmer F., Zehnle S., Mark D., von Stetten F., Zengerle R., Paust N. Centrifugal microfluidic platforms: advanced unit operations and applications, Chemical Society Reviews. – 2015. – Vol. 44, Iss. 17. – P. 6187-6229, DOI: 10.1039/c4cs00371c .
5. Madadelahi M.M., Acosta-Soto L.F., Hosseini S., Martinez-Chapa S.O., Madou M.J. Mathematical modeling and computational analysis of centrifugal microfluidic platforms: a review, Lab Chip. – 2020. – Vol. 20, Iss. 8. – P. 1318-1357, doi: 10.1039/c9lc00775j .
6. Deng G., Wang N., Zhou C., Li J. A. Simplified Analysis Method for the Piezo Jet Dispenser with a Diamond Amplifier, Sensors (Basel). – 2018. – Vol. 18, Iss. 7. – P. 2115-2127, doi:10.3390/s18072115.
7. Smahlii V. I. Rukh materialnoi chastynky po shorstkykh dyskakh, Nauk. visn. NUBiP Ukrainy. Seriya: Tekhnika y enerhetyka APK. - 2013. - Vyp. 185, Ch. 1. – S. 117-126. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2013_2_13
8. Adamchuk O. Teoriya razgona udobreniy rasseivayuschim rabochim organom tsentrobezhnogo tipa, Nauchni trudove na Rusenskiya unIversitet. – 2013. - T. 52, seriya 1. - S. 22-30. <http://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.1/1.1-3.pdf>
9. Zaika P.M. Izbrannyye zadachi zemledelcheskoy mehaniki. – K.: USHA, 1992. – 512 s.
10. Morozov I.V., Dudin O.V. Model traiektorii rukhu zerna po poverkhniakh silskohospodarskykh mashyn, Visnyk Kharkivskoho derzh. tekhnichnoho universytetu s. h. “Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva”. – Kharkiv: KhDTUSH, 2003. – Vyp.21. - S. 124-131. ISBN 5-7987-0176X

11. Rohatynskyi R.M. Model kontaktnoi vzaiemodii chastynky vantazhu z robochymy poverkhniamy silskohospodarskykh mashyn, Visnyk Kharkivskoho derzh. tekhnichnoho universytetu s. h. "Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva". - Kharkiv: KhDTUSH, 2003. – Vyp.21. - S. 222-228.

12. Adamchuk V.V. Vplyv parametriv i rezhymiv roboty rozsiuvalnoho orhanu na skhodzhennia z noho chastynok mineralnykh dobryv, Visnyk ahrarynoi nauky. – 2004. Vyp. 12. – S. 42-45.

13. Adamchuk V.V. Teoriia vidtsentrovnykh robochykh orhaniv mashyn dlia vnesennia mineralnykh dobryv. – K.: Ahraryna nauka, 2010. – 117 s.

14. Boiko Y.H., Popov O.A. Doslidzhennia rukhu chastynky sypuchoho kormu po poverkhni podaiuchoho konusa rotatsiinoho dozatora, Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva "Suchasni problemy udoskonalennia tekhnichnykh system i tekhnolohii v tvarynnytstvi". – Kharkiv: KhNTUSH, 2010. – Vyp. 95. - S. 72-77. <http://dspace.khntusg.com.ua/handle/123456789/4509>

15. Rayhman D., Simonov A. Obosnovanie parametrov zagruzochnogo ustroystva rotorno-tsentrobezhnoy melnitsyi dlya furazhnogo zerna, Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. Vol. 5. – P. 123-128.

16. Sementsov V.I., Boiko I.H. Metodyka i rezultaty doslidzhennia shvydkosti skhodzhennia chastynky z dysku vidtsentrovoho zmishuvacha, Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva "Tekhnichni systemy i tekhnolohii tvarynnytstva". – Kharkov: KhNTUSH, 2015. - Vyp. 157.– S. 52-56.

17. Batluk V., Basov M., Klymets V. Mathematical model for motion of weighted parts in curled flow, Econtechmod. An International Quarterly Journal. –2013. - Vol. 2, Iss. 3. – P. 17–24.

18. Banha V., Dmytriv V. Teoretychni doslidzhennia indyvidualnoho rozdavacha-dozatora kombikormiv, Zbirnyk naukovykh prats Luhanskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2007. – Vyp. 76(99). – S. 115-118.

19. Sadov V.V., Sadovaya V.A. Obosnovanie parametrov razgonnogo diska na drobilkah s vertikalnyimi valami, Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo ahrarynoho universiteta. – 2009. – Vip. 1 (51). – S. 43-46.

20. Voitiuk D.H., Pylypaka S.F. Teoretychni doslidzhennia rukhu materialnykh chastynok v vidtsentrovnykh aparatakh z kryvoliniinymy lopatkamy i zminnym kutom yikh pidiomu. Pratsi Tavriiskoi derzhavnoi ahrotekhnichnoi akademii. - Melitopol: THATA, 2006. – Vyp. 39. - S. 11-20.