

УДК 631.365.22

© А. А. Ящук; Р.В. Кірчук, к.т.н.
Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЧАСТИНКИ МАТЕРІАЛУ ПОВЕРХНЕЮ СПІРАЛЕПОДІБНОГО АКТИВАТОРА СУШАРКИ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті представлено модель переміщення частинки поверхню спіралеподібного активатора нової конструкції сушарки для сушіння сипких матеріалів, що враховує взаємодію цієї частинки з матеріалом.

СУШАРКА, АКТИВАТОР, СИПКИЙ МАТЕРІАЛ, МОДЕЛЬ, ВЗАЄМОДІЯ, ТРАЄКТОРІЯ.

Постановка проблеми. Запропонована конструкція сушарки сипких сільськогосподарських матеріалів [1, 2], в якій передбачені спіралеподібні робочі органи, які обертаючись навколо своєї осі розпушують і переміщують матеріал, інтенсифікуючи процес видалення вологи і підвищуючи рівномірність сушіння.

Для обґрунтування раціональних конструктивних і режимних параметрів спіралеподібного активатора сушарки необхідно дослідити процес переміщення матеріалу його поверхню.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженням процесу сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів присвячені роботи Ликова А. В. [3], Дідуха В. Ф. [4], Котова Б. І. [5] та інших науковців. Серед науковців, що займалися дослідженням переміщення частинки матеріалу на поверхні робочих органів можна виділити Василенка П.М. [6], Заїку П.М. [7] та інших. Проте процес переміщення частинки поверхню активатора нової конструкції сушарки з врахуванням взаємодії частинки з матеріалом вимагає додаткових досліджень.

Мета дослідження. Метою є розробка математичної моделі, що описує процес переміщення частинки шорсткою спіралеподібною поверхню активатора, який запропоновано використовувати в новій конструкції сушарки для розпушування і перемішування матеріалу, що дасть можливість вийти на раціональні режимні параметри цього робочого органу.

Результати дослідження. Розглянемо форму спіралеподібного активатора, що використовується в нашій сушарці. Активну поверхню (поверхню взаємодії з матеріалом) робочого органу запропонованої

конструкції можна розглядати як об'ємну геометричну фігуру, поверхня якої описана колом, точка центру якого $o' - o'' - o'''$ переміщується в просторі в напрямку циліндричної спіралі з постійним кроком. При цьому, дотична до об'ємної кривої у формі циліндричної спіралі проходить перпендикулярно до площини кола $p' - p'' - p'''$ (рис. 1).

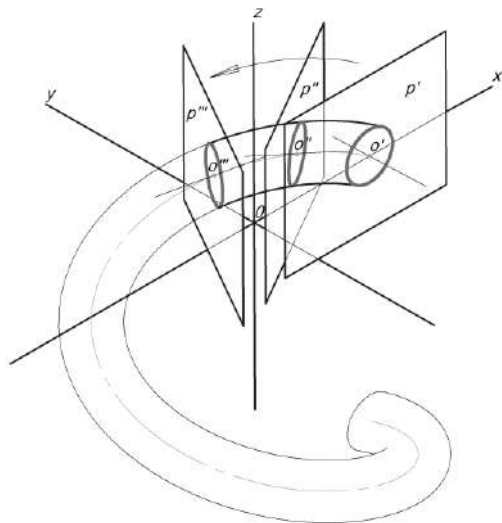


Рис. 1 – Утворення поверхні активатора переміщенням кола з центром o вздовж кривої у формі циліндричної спіралі

Рівняння, що описує форму цієї поверхні (рівняння зв'язку), доцільно представити в циліндричній системі координат, які задаються через радіус r , кут α і координату z . Рівняння спіральної поверхні, що в даному випадку є рівнянням зв'язку у формі $f = f(r, \alpha, z) = 0$ матиме наступний вигляд:

$$z - \sqrt{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2} + \frac{\alpha \cdot k}{2 \cdot \pi} = 0, \quad (1)$$

де R_{cn} – діаметр витка твірної гвинтової лінії спіралі, м; r_{cn} – діаметр кола, що описує поверхню спіралі (товщина витка), м; k – крок спіралі, м.

Відносний рух частинки шорсткою поверхнею в проєкціях на циліндричну систему координат опишемо системою диференціальних рівнянь [6]:

$$\left. \begin{aligned}
 & m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\alpha}^2) = F_r + N \cdot \cos(\bar{e}_r, \bar{n}) - \\
 & -\kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{er}) + (-m \cdot w_{kr}), \\
 & m \cdot (2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\alpha} + r \cdot \ddot{\alpha}) = F_\alpha + N \cdot \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) - \\
 & -\kappa \cdot |N| \cdot \frac{r \cdot \dot{\alpha}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{e\alpha}) + (-m \cdot w_{k\alpha}), \\
 & m \cdot \ddot{\zeta} = F_\zeta + N \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) - \\
 & -\kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{\zeta}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{e\zeta}) + (-m \cdot w_{k\zeta}),
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де m – маса частинки, кг; r, α і ζ – координати відносного руху частинки, м; κ – коефіцієнт тертя шорсткою поверхнею; F_r, F_α і F_ζ – проекції активних сил на осі рухомої системи координат; $\bar{e}_r, \bar{e}_\alpha$ і \bar{e}_ζ – одиничні вектори місцевого координатного базису, направлені по дотичних до координатних ліній r, α і ζ ; \bar{n} – орт нормалі до поверхні; $w_{er}, w_{e\alpha}$ і $w_{e\zeta}$ – проекції прискорень переносного руху, м/с²; $w_{kr}, w_{k\alpha}$ і $w_{k\zeta}$ – проекції Коріолісових прискорень, м/с².

Знайдемо значення направляючих косинусів нормальної реакції $\cos(\bar{e}_r, \bar{n})$, $\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n})$ і $\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n})$, що входять до системи рівнянь (2) на основі теореми векторного числення про значення косинуса кута між двома відрізками прямих, що перетинаються [6]:

$$\begin{aligned}
 \cos(\bar{e}_r, \bar{n}) &= \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\xi) \cdot \cos(\bar{e}_\xi, n) + \\
 &+ \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\eta) \cdot \cos(\bar{e}_\eta, n) + \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\zeta) \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, n),
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) &= \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\xi) \cdot \cos(\bar{e}_\xi, n) + \\
 &+ \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\eta) \cdot \cos(\bar{e}_\eta, n) + \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\zeta) \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, n),
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) = \cos(\bar{n}, \bar{\zeta}), \quad (5)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \cos(\bar{e}_\xi, \bar{n}) &= \cos(\bar{\xi}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \xi}}{\Delta f}, \\ \cos(\bar{e}_\eta, \bar{n}) &= \cos(\bar{\eta}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \eta}}{\Delta f}, \\ \cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) &= \cos(\bar{\zeta}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \zeta}}{\Delta f}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

а також

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\xi) = \frac{\xi}{r} = \cos(\alpha), \quad (7) \quad \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\eta) = \frac{\eta}{r} = \sin(\alpha), \quad (8)$$

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\zeta) = 0, \quad (9) \quad \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\xi) = -\sin \alpha, \quad (10)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\eta) = \cos \alpha, \quad (11) \quad \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\zeta) = 0. \quad (12)$$

$$\text{В (6) } \Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} - \text{модуль градієнта.}$$

Після підстановки (6–12) в (3–5) із врахуванням залежностей, що описують взаємозв'язок між декартовими і циліндричними координатами

$$\left. \begin{aligned} \xi &= r \cdot \cos(\alpha), \\ \eta &= r \cdot \sin(\alpha), \\ \zeta &= \zeta, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

отримаємо:

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{n}) = - \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot (R_{cn} - r)}{\sqrt{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2} \cdot \sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}}, \quad (14)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) = \frac{2 \cdot k}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}}, \quad (15)$$

$$\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}}. \quad (16)$$

Знайдемо прискорення переносного руху w_e за умови, що початки нерухомої і рухомої систем координат лежать в одній точці, $z = \zeta$ і обертання рухомої системи координат навколо осі z відбувається з постійною кутовою швидкістю:

$$w_e = r \cdot \omega_e^2, \quad (17)$$

де ω_e – кутова швидкість обертання робочого органа, рад./с.

В проєкціях на дотичні до координатних ліній:

$$\left. \begin{aligned} w_{er} &= r \cdot \omega_e^2, \\ w_{e\alpha} &= 0, \\ w_{e\zeta} &= 0, \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Прискорення Кориоліса:

$$\left. \begin{aligned} w_{kr} &= -2 \cdot \omega_e \cdot r \cdot \dot{\alpha}, \\ w_{k\alpha} &= 2 \cdot \omega_e \cdot \dot{r}, \\ w_{k\zeta} &= 0, \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Розглянемо проєкції активних сил F_r , F_α і F_ζ на координатні осі r , α і ζ , що діють на частинку.

На частинку масою m діє сила тяжіння $m \cdot g$ направлена вздовж координатної осі ζ , направлена в протилежному до неї напрямку:

$$F_{тяж.} = -m \cdot g. \quad (20)$$

Частинка, перебуваючи в середовищі сипкого матеріалу, постійно взаємодіє з іншими частинками матеріалу, що визначає характер переміщення цієї частинки. Зважаючи на це розглядати переміщення цієї частинки без врахування її взаємодії з іншими частинками не можна.

Перемішування сипкого матеріалу є складним процесом. Характер переміщення частинок матеріалу в сипкому середовищі залежить від багатьох факторів, зокрема властивостей матеріалу, конструктивних і режимних параметрів робочих органів машин і є складним для опису. Теорія, пов'язана з перемішуванням сипкого середовища, розвинена досить слабо і, в основному, базується на емпіричних залежностях і експериментальних коефіцієнтах

встановлених для окремих матеріалів при їх взаємодії з певними робочими органами машин.

Ставлячи за мету дослідити вплив конструктивних і режимних параметрів робочих органів на інтенсивність розпушування і перемішування матеріалу (такого як ворох насіння льону олійного) шляхом визначення впливу цих параметрів на характер траєкторії руху частинки спіралеподібною поверхнею, процес взаємодії частинки з сипким середовищем розглядатимемо з певним наближенням, керуючись наступними припущеннями:

- в будь-який момент часу частинка, що перебуває в об'ємі матеріалу, контактує одночасно з n іншими частинками матеріалу. Кількість частинок n є непостійною в часі і змінюється в певному інтервалі. Їх мінімальна і максимальна кількість залежить від форми частинок, їх орієнтації в просторі, насипної щільності матеріалу та інших факторів;

- сили, які діють на частинку в результаті її взаємодії з іншими частинками середовища, розглядаються як результуюча сила рівна векторній сумі цих сил. Величина і напрям цієї сили приймається випадково величиною, що варіюються з часом в певних інтервалах;

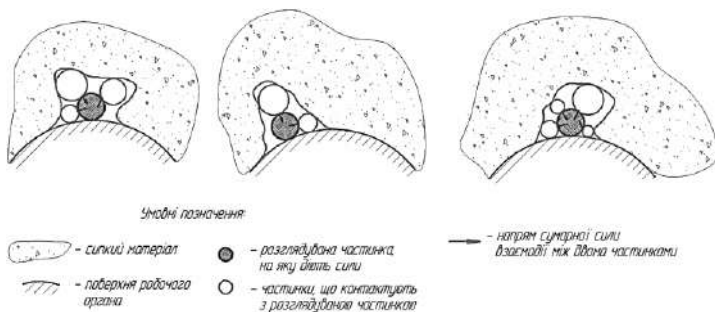


Рис. 2 – Схематичне зображення можливих варіантів взаємодії частинки з матеріалом на поверхні робочого органа

- вектор результуючої сили взаємодії матеріалу з частинкою, яка розглядається, лежить на площині, що дотична до спіралеподібною поверхні робочого органа в точці його контакту з цією частинкою. Оскільки, за умовами задачі, траєкторія руху частинки лежить на поверхні спіралеподібною поверхні активатора, то враховуємо лише складову проекції цієї сили на дотичну до поверхні площину в точці контакту з частинкою. Перпендикулярна до цієї площини складова сили урівноважується нормальною реакцією N ;

- величина результуючої сили змінюється від 0 до певного максимального значення, що залежить від властивостей матеріалу, умов і режимів роботи сушарки.

Точність моделі визначатиметься тим, на скільки правильно підібрані значення максимальної результуючої сили, а також характеру зміни її величини і напрямку відповідно до реальних умов.

Сила взаємодії:

$$\bar{F}_{\text{вз.}}^r = \bar{F}_{\text{вз.}}^{\tau} + \bar{F}_{\text{вз.}}^n. \quad (21)$$

Приймаючи, що нормальна складова результуючої сили $\bar{F}_{\text{вз.}}^n$ урівноважується нормальною реакцією поверхні N , то достатньо буде задати проекцію тангенціальної складової сили $\bar{F}_{\text{вз.}}^{\tau}$ на дотичні до координатних ліній r , α і ζ .

$\bar{F}_{\text{вз.}}^{\tau}$ лежить в площині T , дотичній до криволінійної поверхні в точці контакту з частинкою (рис. 3).

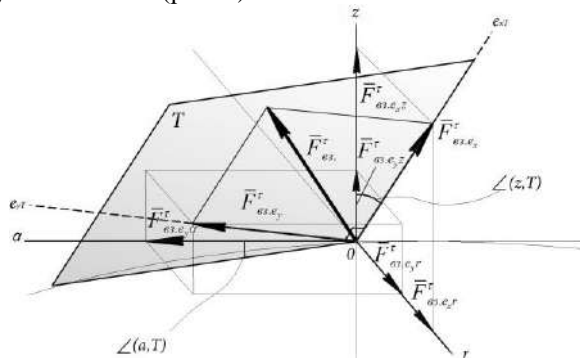


Рис. 3 – Тангенціальна складова сили взаємодії частинки на поверхні робочого органа з матеріалом і її проекція на циліндричні координати r , α і ζ

Розглянемо тангенціальну складову сили взаємодії частинки з матеріалом $\bar{F}_{\text{вз.}}^{\tau}$, яка лежить в площині T . Щоб задати напрямок дії цієї сили введемо місцевий координатний базис прямокутної системи координат на площині T з ортами осей $\bar{e}_{x',\tau}$ і $\bar{e}_{y',\tau}$ і початком відліку в точці O контакту частинки з поверхнею, розмістивши при цьому один з одиничних векторів $\bar{e}_{x',\tau}$ в площині дотичній до координатних ліній r, z , тоді

$$\bar{F}_{\alpha}^{\tau} = \bar{F}_{\alpha x'}^{\tau} + \bar{F}_{\alpha y'}^{\tau} \quad (22)$$

$$|\bar{F}_{\alpha}^{\tau}| = \sqrt{|\bar{F}_{\alpha x'}^{\tau}|^2 + |\bar{F}_{\alpha y'}^{\tau}|^2} \quad (23)$$

Тангенціальну складову сили взаємодії \bar{F}_{α}^{τ} і її проєкції на координати з ортами осей $\bar{e}_{x'\tau}$ і $\bar{e}_{y'\tau}$ визначатимемо в такій послідовності:

$$|\bar{F}_{\alpha}^{\tau}| = \text{rand} \left[0, |\bar{F}_{\alpha \max}^{\tau}| \right], \quad (24)$$

$$\pm \bar{F}_{\alpha x'}^{\tau} = \text{rand} \left[0, |\bar{F}_{\alpha x'}^{\tau}| \right], \quad (25)$$

$$\pm \bar{F}_{\alpha y'}^{\tau} = \sqrt{|\bar{F}_{\alpha}^{\tau}|^2 - |\bar{F}_{\alpha x'}^{\tau}|^2}, \quad (26)$$

де $\text{rand}[a, b]$ – випадкова величина, що підкоряється нормальному закону розподілу та імітує значення результуючої сили взаємодії частинки з матеріалом. Генерується з певною періодичністю в інтервалі чисел від мінімального a до максимального b .

Знак « \pm » означає, що сили можуть бути прикладені як в прямому, так і в протилежному напрямку відносно орт $\bar{e}_{x'\tau}$ і $\bar{e}_{y'\tau}$ координатних осей місцевого координатного базису на дотичній площині.

Знайдемо проєкції $\bar{F}_{\alpha x'}^{\tau}$ і $\bar{F}_{\alpha y'}^{\tau}$ тангенціальної складової сили \bar{F}_{α}^{τ} на дотичні до координатних ліній r , α і ζ циліндричної системи координат як

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_{\alpha r}^{\tau} &= \bar{F}_{\alpha x' r}^{\tau} + \bar{F}_{\alpha y' r}^{\tau} = \bar{F}_{\alpha x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_r) + \bar{F}_{\alpha y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{y'\tau}, \bar{e}_r), \\ \bar{F}_{\alpha \alpha}^{\tau} &= \bar{F}_{\alpha x' \alpha}^{\tau} + \bar{F}_{\alpha y' \alpha}^{\tau} = \bar{F}_{\alpha x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{x'\tau}) + \bar{F}_{\alpha y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{y'\tau}), \\ \bar{F}_{\alpha \zeta}^{\tau} &= \bar{F}_{\alpha x' \zeta}^{\tau} + \bar{F}_{\alpha y' \zeta}^{\tau} = \bar{F}_{\alpha x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_{\zeta}) + \bar{F}_{\alpha y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{y'\tau}, \bar{e}_{\zeta}). \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Щоб спроектувати складові сили $\bar{F}_{\alpha e_{x\tau}}^{\tau}$ і $\bar{F}_{\alpha e_{y\tau}}^{\tau}$ на дотичні до координатних ліній r , α і ζ необхідно встановити значення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$, $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{x'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\zeta}, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_{\zeta}, \bar{e}_{y'\tau})$.

Зважаючи на те, що складова результуючої сили $\bar{F}_{\alpha x'}^{\tau}$ лежить в площині $r\zeta$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{x'\tau}) = 0$.

Визначимо значення кутів $\angle(r, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau})$. Для цього розглянемо рівняння поверхні (1) з фіксованим значенням α (рис. 4). Тоді функція набуде вигляду $\zeta = f(r)$ і опише коло на площині $r\zeta$ утворене перетином об'ємної спіральної поверхні (1) цією площиною.

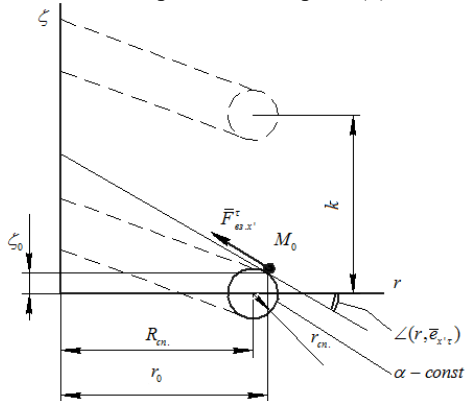


Рис. 4 – Схема до визначення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau})$

Значення кута $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$ для нашої функції $\zeta = f(r)$ можна знайти за формулою [8]:

$$\operatorname{tg}(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau}) = \frac{df}{dr}. \quad (28)$$

Тоді

$$\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau}) = 90^\circ - \angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau}) = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_{cn} - r}{\sqrt{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}} \right). \quad (29)$$

Значення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{y'\tau})$ знайдемо за відомими косинусами кутів $\cos(\bar{e}_r, \bar{n})$, $\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n})$ і $\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n})$, (21–23), між нормаллю до поверхні і дотичними до координатних ліній r , α і ζ (рис. 5).

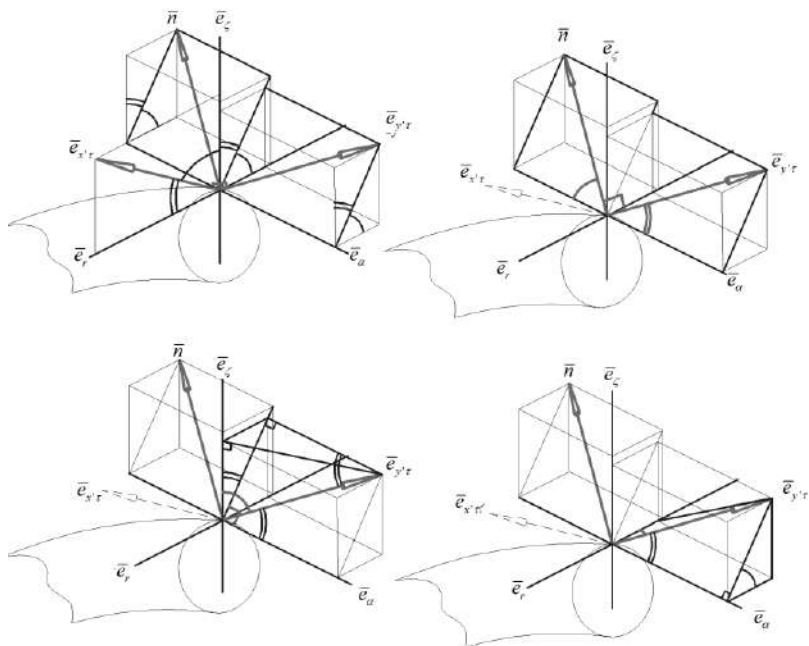


Рис. 5 – Схема до визначення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y^{\prime}\tau})$, $\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y^{\prime}\tau})$ і $\angle(\bar{e}_z, \bar{e}_{y^{\prime}\tau})$

$$\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y^{\prime}\tau}) = 90^\circ - \angle(\bar{e}_\alpha, \bar{n}), \quad (30)$$

$$\cos(\bar{e}_z, \bar{e}_{y^{\prime}\tau}) = \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) \cdot \cos(\bar{e}_z, \bar{e}_{x^{\prime}\tau}) \quad (31)$$

і

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_{y^{\prime}\tau}) = \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) \cdot \cos(\bar{e}_{x^{\prime}\tau}, \bar{e}_z). \quad (32)$$

Сумарні проєкції сил на дотичні до координатних ліній

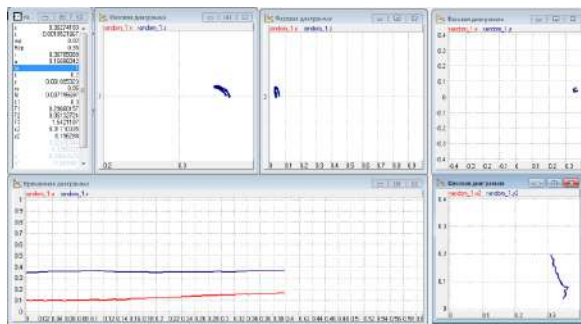
$$\left. \begin{aligned} F_r &= \bar{F}_{r.гз.}^{\tau} \\ F_\alpha &= \bar{F}_{\alpha.гз.}^{\tau} \\ F_z &= -m \cdot g + \bar{F}_{z.гз.}^{\tau} \end{aligned} \right\}. \quad (33)$$

Підставивши (14–20) в (2) і приєднавши рівняння зв'язку (1) отримаємо систему:

$$\left. \begin{aligned}
 m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\alpha}^2) &= \bar{F}_{r, \theta z}^{\tau} - N \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot (R_{cn} - r)}{\sqrt{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2} \cdot \sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}} - \\
 &- \kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} - m \cdot (r \cdot \omega_e^2 - 2 \cdot \omega_e \cdot r \cdot \dot{\alpha}), \\
 m \cdot (2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\alpha} + r \cdot \ddot{\alpha}) &= \bar{F}_{\alpha, \theta z}^{\tau} + N \cdot \frac{2 \cdot k}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}} - \\
 &- \kappa \cdot |N| \cdot \frac{r \cdot \dot{\alpha}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} - m \cdot 2 \cdot \omega_e \cdot \dot{r}, \\
 m \cdot \ddot{\zeta} &= -m \cdot g + \bar{F}_{z, \theta z}^{\tau} + N \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_{cn}^2}{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2}}} - \\
 &- \kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{\zeta}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}}, \\
 \zeta - \sqrt{r_{cn}^2 - (R_{cn} - r)^2} + \frac{\alpha \cdot k}{2 \cdot \pi} &= 0.
 \end{aligned} \right\} (34)$$

Система складається з чотирьох рівнянь, які містять три невідомі координати, перші і другі похідні від них по часу, а також невідому нормальну реакцію N і з врахуванням (24–33) у випадку взаємодії частинки з матеріалом, підлягає розв’язку на комп’ютері з використанням числових методів.

Розв’язок системи одержано за допомогою програми ModelVision Studium 3.2 Free методом Рунге–Кутти 4-го порядку (рис. 6).



а)

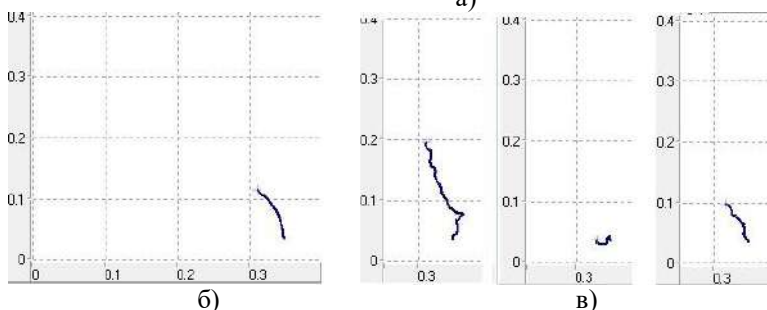


Рис. 6 – Реалізація моделі для наступних параметрів: $r_{cn} = 0,02$ м, $R_{cn} = 0,35$ м, $k = 0,3$ м, $\omega = 1$ рад./с., $\kappa = 0,2$, $m = 0,05$ кг, $|\bar{F}_{вз. max}^r| = 3,5$ Н: а) графіки, що характеризують зміну параметрів r , α і ζ з часом для заданих параметрів; б) горизонтальна проекція траєкторії абсолютного руху частинки на шорсткій спіральній поверхні без врахування сил взаємодії частинки з матеріалом; в) характер руху частинки при врахуванні сил взаємодії частинки з матеріалом

Висновки. Розроблено математичну модель, що описує переміщення частинки шорсткою поверхнею активатора спіралеподібної форми запропонованої сушарки і враховує взаємодію матеріальної частинки з матеріалом, в якому вона перебуває під час руху. Одержано розв’язок диференціальних рівнянь моделі у вигляді графіків траєкторії руху частинки з часом. Одержана модель дає можливість аналізувати вплив різних факторів на характер руху частинки сипкого матеріалу на поверхні робочого органу, що дозволить вийти на раціональні режимні і конструктивні параметри

спіралеподібного робочого органа, призначеного для розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння.

Література

1. Пат. № 69227 Україна, МПК (2006) F26 B17/12, F26 B17/18. Сушарка для сипких матеріалів / Ящук А.А., Кірчук Р.В., Дідух В.Ф. заявник і власник патенту Луцький національний технічний університет.; заявл. 26.09.2011.; опубл. 25.04.2012. Бюл. № 8.

2. Ящук А.А. Обґрунтування параметрів спіралеподібних робочих органів сушарки для насіння льону олійного / А.А. Ящук, Р.В. Кірчук // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету [Текст] : серія: Технічні науки. – Вінниця : Видавничий центр ВНАУ, 2012. – Вип. 10 Т.2. (59), – С. 96 – 101.

3. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 472 с., ил.

4. Дідух В. Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.

5. Котов Б. И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / УААН, Ин-т механизации и электрификации с.х. / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.

6. Василенко П.М. Методика построения расчётных моделей функционирования механических систем (машин и машинных агрегатов): учебное пособие / П.М. Василенко, В.П. Василенко. – К: КИСМ, 1980. – 138 с.

7. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики: практ. пособие / П.М. Заика. – Киев: УСХА, 1992. – 512 с.

8. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3-х т. (Т.1) / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1962. – 616 с.

Рецензент д.т.н., проф. В.Ф. Дідух