

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ОПТИМІЗАЦІЯ ВЕЛИЧИНИ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ЗМІШУВАЧІВ БАРАБАННОГО ТИПУ

Обґрунтовано умову підвищення рівномірності змішування барабаними змішувачами шляхом рівномірного розподілу матеріалу по поверхні завалу суміші спадаючим з перемішуючої лопатки потоком. Встановлено, що для повного розосередження компонентів суміші спадаючим потоком, необхідно щоб матеріал, який спадає з лопатки в останню чергу, досягав точки сполучення вільної поверхні матеріалу та обичайки барабана. Розроблена математична модель для визначення величини кутової швидкості барабанного змішувача, за якої матиме місце повне розосередження матеріалу по вільній поверхні сегменту суміші спадаючим потоком матеріалу з лопатки. Використано розв'язок диференційного рівняння для визначення радіальної швидкості руху частинки по лопатці барабана та проведено комп'ютерне моделювання для отримання графічного рішення системи рівнянь.

Ключові слова: барабанний змішувач, ширина лопатки, кутова швидкість, радіальна швидкість, коефіцієнт заповнення.

Постановка проблеми

Виробництво якісного комбікорму в умовах господарств вимагає вирішення питання щодо технічного забезпечення змішування кормових добавок. Високий рівень рівномірності змішування компонентів кормових добавок забезпечують змішувачі барабанного типу. При гладкій поверхні барабана змішування проходить лише в зоні площини сегмента матеріалу. Для покращення перерозподілу порцій матеріалу при обертанні на внутрішній поверхні камери

встановлюють лопатки. Вони бувають різні за формою (плоскими, жолобковими, щілинними, гвинтовим та ковшовими) та за розміщенням до площини обертання (радіальними, з відхиленням вперед).

У залежності від форми та розміщення перемішуючої лопатки залежить кількість захопленого нею матеріалу, кут підйому лопатки до моменту повної розгрузки, ступінь розосередження матеріалу в камері змішування. Це, в свою чергу визначає рівномірність перемішування компонентів суміші. Відомі залежності рівномірності змішування матеріалу від конструктивних, кінематичних та технологічних параметрів ґрунтувалися на експериментальних дослідженнях. Питання теоретичного обґрунтування залежностей якісних показників процесу змішування наразі недостатньо науково досліджені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У відповідності до процесу роботи барабанного змішувача з радіальними лопатками матеріал всередині камери послідовно проходить чотири стадії переміщення: разом з барабаном у монолітному стані, скочування по вільній поверхні матеріалу, що підіймається, рух по перемішуючій лопатці після виходу її із заповненої частини камери та вільне падіння після сходу з лопатки.

Аналіз руху матеріалу при сході його з краю лопатки частково розкритий в роботах Першина В.Ф. Визначено швидкість падіння, час досягнення межі завалу матеріалу та координати у будь-який момент часу.

Лопатки краще утримують моноліт матеріалу в барабанній камері при підніманні сегменту суміші та інтенсифікують процес перемішування компонентів [1, 2, 3].

Після досягнення частками матеріалу краю лопатки, він починає падати за параболічними траєкторіями. Як показано в роботі [4], найбільш віддалені від поверхні лопатки часточки, що більш близькі до вільної поверхні потоку на лопатці, на момент початку руху мають більшу швидкість, ніж часточки, занурені в масу матеріалу. Тому падаючі часточки утворюють віялоподібний потік і вектори їх швидкості за величиною і напрямком розташовуються на певній ділянці кута між дотичними, проведеними до зовнішніх ділянок траєкторій падіння.

Для повного розосередження компонентів падаючим потоком, необхідно щоб матеріал, який падає з лопатки в останню чергу, досягав точки сполучення вільної поверхні матеріалу та обичайки барабана. За більших кутів розвантаження лопатки часточки матеріалу потрапляють на стінки барабана та повертаються в загальний потік. За малих кутів розвантаження матеріал сходить одразу після виходу лопатки за межі завалу. Кути розвантаження залежать від величини кутової швидкості барабана.

Мета, завдання та методика досліджень

Визначити залежність величини кутової швидкості, при якій матиме місце повне розосередження матеріалу по вільній поверхні сегменту суміші та залежних від неї кінематичних, конструкційних і технологічних параметрів змішувача барабанного типу.

Для визначення умов повного розсіювання компонентів по вільній поверхні матеріалу використано систему рівнянь, яка поєднує рівняння падіння часточок матеріалу за параболічною траєкторією, рівняння межі завалу матеріалу у барабані та рівняння кола, що описує переріз барабана, розташованого горизонтально. Для визначення радіальної швидкості руху частинки по лопатці барабана використано розв'язок диференційного рівняння, яке пов'язує радіальну швидкість руху частинки по лопатці в залежності від її радіального положення. Числове значення кутової швидкості визначалося шляхом комп'ютерного моделювання.

Результати досліджень

Початкова швидкість матеріалу при вільному падінні в незаповненому просторі камери визначається швидкістю, набутою часточкою при її сходженні з лопатки та кутовою швидкістю обертання барабана. Для рівномірного розподілу матеріалу по поверхні завалу суміші необхідно визначити умови, при яких часточки, що сходять з лопатки останні досягали межі завалу в точці контакту з обичайкою барабана (рис. 1).

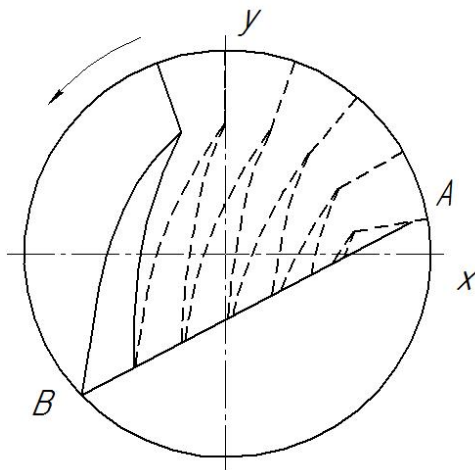


Рис. 1. Схема розподілу матеріалу по поверхні завалу при падінні часточок з лопатки в змішувачі барабанного типу

Приймаємо, що траєкторія положення всякої часточки при падінні з прив'язкою до системи координат XOY може бути подана рівнянням параболи у наступному вигляді:

$$\begin{cases} x = (R - l)\cos\varphi - V_0 t \cos\gamma_0; \\ y = (R - l)\sin\varphi - V_0 t \sin\gamma_0 - \frac{gt^2}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

де x, y – координати частинки під час польоту по траєкторії, м;

R – радіус барабана, м;

l – ширина лопатки, м;

φ – кут повороту лопатки від горизонтальної вісі, рад.;

V_0 – абсолютна початкова швидкість польоту частинки при сходженні з лопатки, м/с;

γ_0 – початковий кут нахилу вектора швидкості польоту частинки до горизонту, рад.;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

t – поточний час польоту частинки, с.

Беручи до уваги, що поверхню верхньої межі завалу з достатнім ступенем допущення можна приймати як хорду сегмента з кутом сектора 2δ , її рівняння [5] матиме такий вигляд:

$$y = xtg\alpha - R \frac{\cos\delta}{\cos\alpha}; \quad (2)$$

де α – кут нахилу поверхневого шару матеріалу, рад.;

δ – половина центрального кута сегменту матеріалу, рад.

Для визначення умов повного розсіювання компонентів по вільній поверхні матеріалу необхідно знайти рішення системи рівнянь, яка поєднує рівняння падіння часточок матеріалу за параболічною траєкторією, рівняння межі завалу матеріалу у барабані та рівняння кола, що описує переріз барабана, розташованого горизонтально:

$$\begin{cases} y = (R - l)\sin\varphi - \frac{(R - l)\cos\varphi - x}{\cos\gamma_0} \sin\gamma_0 - \frac{g}{2} \left(\frac{(R - l)\cos\varphi - x}{V_0 \cos\gamma_0} \right)^2; \\ y = xtg\alpha - R \frac{\cos\delta}{\cos\alpha}; \\ R^2 = x^2 + y^2. \end{cases} \quad (3)$$

З другого та третього рівняння системи визначаємо координати точки перетину кола, що описує переріз барабана, розташованого горизонтально та межі завалу матеріалу у барабані:

$$R^2 - R^2 \frac{\cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} = x^2 + x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - 2x \operatorname{tg} \alpha R \frac{\cos \delta}{\cos \alpha}$$

$$x^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) - 2x \operatorname{tg} \alpha R \frac{\cos \delta}{\cos \alpha} - R^2 \left(1 - \frac{\cos^2 \delta}{\cos^2 \alpha} \right) = 0$$

$$x_{1,2} = R \sin \alpha \cos \delta \pm R \cos \alpha \sin \delta$$

$$x_1 = R \sin \alpha \cos \delta + R \cos \alpha \sin \delta = R \sin(\alpha + \delta)$$

$$x_2 = R \sin \alpha \cos \delta - R \cos \alpha \sin \delta = R \sin(\alpha - \delta) = -R \sin(\delta - \alpha)$$

$$y_1^2 = R^2 - x_1^2 = R^2 [1 - \sin^2(\alpha + \delta)] = R^2 \cos^2(\alpha + \delta)$$

$$y_1 = R \cos(\alpha + \delta)$$

$$y_2^2 = R^2 - x_2^2 = R^2 [1 - \sin^2(\alpha - \delta)] = R^2 \cos^2(\alpha - \delta)$$

$$y_2 = R \cos(\alpha - \delta) = -R \cos(\delta - \alpha)$$

Із отриманих рішень вибираємо корені рівняння, які відповідають точці перетину кола, що описує переріз барабана, розташованого горизонтально, та межі завалу матеріалу у барабані, що знаходиться зліва від вертикальної вісі Y .

Таким чином, необхідне рішення буде мати вигляд:

$$\begin{cases} x_2 = -R \sin(\delta - \alpha); \\ y_2 = -R \cos(\delta - \alpha). \end{cases} \quad (4)$$

Підставимо значення координат перетину x_2 та y_2 у рівняння параболи:

$$-R \cos(\delta - \alpha) = (R - l) \sin \varphi - \frac{(R - l) \cos \varphi + R \sin(\delta - \alpha)}{\cos \gamma_0} \sin \gamma_0 - \frac{g}{2} \left(\frac{(R - l) \cos \varphi + R \sin(\delta - \alpha)}{V_0 \cos \gamma_0} \right)^2 \quad (5)$$

Приймаючи постійними (рис. 2) величину радіуса барабана R , ширину лопатки l , центрального кута сегменту матеріалу в барабані δ , кута нахилу поверхневого шару матеріалу α та визначивши змінні величини – кут повороту лопатки від горизонтальної вісі $\varphi = \theta_0 + \omega t_p$, початковий кут нахилу вектора швидкості польоту частинки до горизонту $\gamma_0 = \omega t_p - \arctg \frac{\omega(R - l)}{V_R}$, початкову

швидкість польоту частинки при сходженні з лопатки $V_0 = \sqrt{\omega^2(R-l)^2 + V_R^2}$
можемо записати:

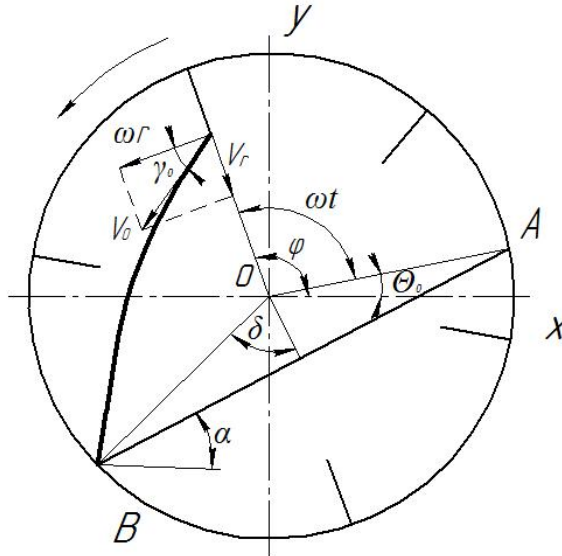


Рис. 2. Схема дії сил у поперечному перерізі барабана при падінні часточок матеріалу з лопатки

$$\begin{aligned}
 & -R \cos(\delta - \alpha) = \\
 & = (R-l) \sin(\theta_0 + \omega t_p) - \\
 & - \frac{(R-l) \cos(\theta_0 + \omega t_p) + R \sin(\delta - \alpha)}{\cos\left(\omega t_p - \operatorname{arctg} \frac{\omega r}{V_R} (R-l)\right)} \sin\left(\omega t_p - \operatorname{arctg} \frac{\omega(R-l)}{V_R}\right) - \\
 & - \frac{g}{2} \left[\frac{(R-l) \cos(\theta_0 + \omega t_p) + R \sin(\delta - \alpha)}{\sqrt{\omega^2(R-l)^2 + V_R^2} \cos\left(\omega t_p - \operatorname{arctg} \frac{\omega(R-l)}{V_R}\right)} \right]^2
 \end{aligned}$$

(5)

де θ_0 – початковий кут виходу лопатки із матеріалу, рад.;

ω – кутова швидкість барабана, рад./с;

t_p – час повороту барабана від виходу лопатки із матеріалу до її повного розвантаження, с;

V_R – радіальна швидкість руху частинки по лопатці барабана, м/с.

Таким чином, можливість надходження останньої частинки матеріалу із лопатки в задану точку параболічної траєкторії розсіювання в барабані визначається кутовою швидкістю барабана.

Для визначення радіальної швидкості руху частинки по лопатці барабана скористаємося розв'язком диференційного рівняння [6], яке має вигляд:

$$V_R = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 t_p) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 t_p) + \frac{g}{\sqrt{4\omega^2 + k_1^2}} \cos\left(\theta_0 + \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} + \omega t_p\right). \quad (6)$$

$$\lambda_1 = -\left(f\omega + \frac{k_1}{2}\right) + \sqrt{\omega^2(1+f^2) + \frac{k_1^2}{4}}; \quad (7)$$

$$\lambda_2 = -\left(f\omega + \frac{k_1}{2}\right) - \sqrt{\omega^2(1+f^2) + \frac{k_1^2}{4}}, \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[R - \frac{g}{\omega\sqrt{(4\omega^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\lambda_2^2}} \times \sin\left(\theta_0 + \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{\omega}{\lambda_2}\right) \right], \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\frac{g}{\omega\sqrt{(4\omega^2 + k_1^2)}} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\lambda_1^2}} \times \sin\left(\theta_0 + \arctg \frac{4f\omega + k_1(1-f^2)}{2[\omega(1-f^2) - fk_1]} - \arctg \frac{\omega}{\lambda_1}\right) - R \right]. \quad (10)$$

де λ_1, λ_2 – корені характеристичного рівняння, с⁻¹; k_l – коефіцієнт пропорційності при ламінарному обтіканні частинки повітрям, с⁻¹; f – коефіцієнт тертя частинки по матеріалу лопатки, відн. од.

Підставивши у рівняння (5) значення радіальної швидкості руху частинки по лопатці барабана у момент її сходження з лопатки $V_R(R-l)$ згідно з рівнянням (6),

є можливість визначити координати положення частинки в цей момент, її абсолютну швидкість V_o та початковий кут нахилу вектора абсолютної швидкості польоту частинки до горизонту γ_0 і які визначають ту траєкторію параболи при польоті частинки, яка відповідає рівнянню (5).

Однак, завдяки наявності трансцендентних функцій у рівняннях (5) та (6), отримати аналітичне рішення для визначення оптимальної кутової швидкості барабана неможливо. У зв'язку з цим, було проведене комп'ютерне моделювання та отримано спільне графічне рішення рівнянь (5) та (6), яке наведено на рис. 3. Рішення отримано із урахуванням таких конструкційних та кінематичних параметрів експериментальної установки: радіус барабана – 0,17 м, розміщення лопаток радіальне, коефіцієнт заповнення камери матеріалом 0,5.

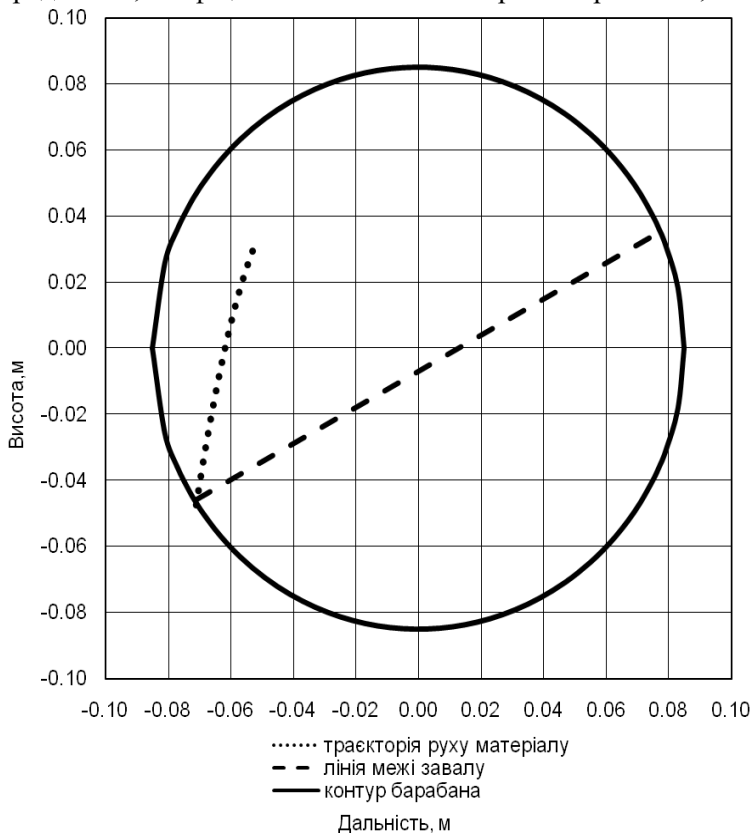


Рис. 3. Графічна інтерпретація сходження матеріалу з лопатки в крайню точку межі завалу

Висновки та перспективи подальших досліджень

При куті повороту лопатки від горизонтальної осі до виходу із суміші 30° та ширині лопатки 25 мм повне розсіювання компонентів матеріалу по вільній поверхні робочого сегменту відбуватиметься при кутовій швидкості барабану в межах від 9,68 до $9,7 \text{ c}^{-1}$.

Література

1. Конструирование и расчет машин химических производств / под ред. Э. Э. Кальман-Иванова / – М. : Наука, 1985. – 408 с.
2. Макаров Ю. И. Отечественное и зарубежное оборудование для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров, Б. М. Ломакин, В. В. Харакос. – М. : ЦИНТИАМ, 1964. – 148 с.
3. Александровский А. А. Исследование процесса смешивания и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу : автореф. дис. на соискание науч. степени доктора техн. наук : спец. 05.04.09 «Химическое машиностроение» / А. А. Александровский. – Казань, 1976. – 48 с.
4. Першин В. Ф. Машины барабанного типа: основы теории, расчета и конструирования / В. Ф. Першин. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1990. – 168 с.
5. Макевнин М. П. Расчет времени падения частиц сыпучего материала в барабанных сушилках с лопастной насадкой / М. П. Макевнин, В. Ф. Першин, М. М. Свиридов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1984. – № 9. – С. 31–32.
6. Голуб Г. А. Агропромислове виробництво їстівних грибів. Механіко-технологічні основи / Г. А. Голуб. – К. : Аграр. наука, 2007. – 332 с.