

УДК 693.542.523

І.І.Назаренко, д-р техн. наук, професор КНУБА
М.О. Клименко, асистент КНУБА

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ МАТЕРІАЛУ В МЕЖОВОМУ ШАРІ ОБЕРТОВОГО БАРАБАНА

Вступ. Динаміка руху матеріалу при дослідженні змішування в частково заповнених обертових барабанах є предметом чисельних експериментальних та теоретичних досліджень [1-4].

Складність одержання оптимальних параметрів обертових барабанів обумовлена недостатніми дослідженнями механіки руху будівельних сумішей в них. Вивчення руху сумішей в гладких обертових барабанах ведуться в двох напрямках:

1. Установлення закономірностей руху окремої частки і виведення розрахункових формул для малих коефіцієнтів заповнення барабана (2...5%);

2. Визначення параметрів руху значних кількостей будівельних сумішей (до 40 %).

В даний час численні дослідження окремих питань руху будівельних сумішей уздовж осі обертового барабана не привели до створення теорії, яка дає задовільне обґрунтування закономірностей, що спостерігаються на практиці. Внаслідок цього конструювання машин барабанного типу ґрунтується на емпіричних даних, недостатньо повних і часто не узгоджених між собою, що утрудняє кількісну оцінку впливу тих або інших факторів на роботу обертових барабанів.

Створення методів кількісного аналізу руху сипучих матеріалів в обертових барабанах представляє великий практичний інтерес і необхідно для вибору оптимальних режимів експлуатації розглянутих машин. При створенні кількісного методу оцінки руху матеріалу в барабані, коли фізико-механічні властивості матеріалу змінюються несуттєво або залишаються постійними, виявляється ряд задач, вирішенню яких і присвячені дані дослідження.

Метою даної роботи є

1. Вивчення закономірностей руху будівельних сумішей у нормальній площині обертових барабанів.

2. Встановлення аналітичних залежностей осьової швидкості і продуктивності обертових барабанів, що зв'язують експлуатаційні параметри барабана з фізико-механічними властивостями будівельних сумішей.

Виклад основного матеріалу. У машинах барабанного типу рух і розподіл матеріалу вздовж осі обертового барабана залежить від багатьох факторів, пов'язаних з конструкцією машин, режимами їхньої експлуатації і фізико-механічними властивостями самих будівельних сумішей.

В машинах, що працюють при відносно малих колових швидкостях обертання барабана (до 1 м/с), можна спостерігати два види руху будівельних сумішей:

1. коливальне;

2. каскадне - рух з обваленням і перемішуванням.

Колівальний рух матеріалу спостерігається при дуже малих ступенях заповнення барабана ($\varphi \leq 0,03$) і в промислових умовах воно практично не зустрічається. Внаслідок цього в даній роботі не вивчаються закономірності такого виду руху.

Вивчення характеру руху будівельних сумішей в поперечному перерізі барабана показало, що загальний потік складається з потоку часток матеріалу, що піднімається, і потоку, що скочується.

Потік, що піднімається, являє собою шар матеріалу у виді сегмента, що обертається разом з барабаном за рахунок сил тертя. Основними параметрами, що визначають кількість



матеріалу, який знаходиться в шарі, що піднімається, ϵ : діаметр барабана, колова швидкість обертання і заповнення барабана матеріалом, а також властивості суміші.

Потік, що скочується, можна розглядати як відносний рух часток матеріалу вздовж нерухомого (нейтрального) шару під дією ваги і сил внутрішнього тертя, яке є результатом прояву різного роду взаємодії між частками.

Оскільки на вільній поверхні сегмента будівельних сумішей сили внутрішньої взаємодії незначні, а на нейтральному шарі ця взаємодія найбільша, то швидкості часток матеріалу в радіальному напрямку за товщиною шару, що скочується, розподіляються нерівномірно. Найбільші швидкості будуть мати частки, що знаходяться на вільній поверхні, а швидкість часток, що знаходяться в нейтральному шарі, буде мінімальною.

Кількість матеріалу в потоці, що скочується, визначається товщиною шару, що скочується, кутом нахилу поверхні сегмента матеріалу в барабані, реологічними характеристиками матеріалу, що характеризують взаємодію між окремими частками.

З загальної картини поведінки будівельних сумішей в площині обертання барабана, рух матеріалу у потоці, що скочується, можна представити як циркуляційний потік, подібний до потоку в'язко-пластичних середовищ. В подальшому аналізі руху шару матеріалу, що скочується, у поперечному перерізі обертового барабана використовуються основні положення гідродинаміки в'язко-пластичних середовищ.

Швидкість руху часток у шарі, що скочується, визначає осьову швидкість переміщення матеріалу в обертовому барабані. Одержати суворі аналітичні рівняння, що описують рух матеріалу в площині обертання барабана, важко. Тому в даній роботі застосовуються деякі припущення, що зберігають основний фізичний зміст задачі, але значно спрощують математичні операції.

Дослідження поставленої задачі базується на методі "в'язкої течії", в якому у першому наближенні рух матеріалу приймається як рух в'язко-пластичного середовища і використовується підхід до розв'язання гідродинамічної задачі з подібними граничними умовами. Вихідними рівняннями є: рівняння руху (рівноваги) і рівняння, що описує реологічні властивості будівельних сумішей.

При вирішенні задачі приймається гіпотеза про суцільність середовища і робляться наступні допущення:

1. Інерційні сили часток, що рухаються, незначні через їхню малу швидкість в порівнянні з масовими і тому не враховуються;

2. Довжина шару, що скочується по поверхні укусу велика в порівнянні з його товщиною, тому не враховуються кінцеві ефекти в крайніх точках $\delta=\delta_0$ і $\delta=0$.

Зроблені припущення дозволяють скласти рівняння руху (рівноваги) шару, що скочується, в циліндричних координатах уздовж осі δ (рис. 1)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\delta}}{\partial \delta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\delta}) \pm \rho g_{\delta} = 0. \quad (1)$$

При $\frac{\partial \sigma_{\delta}}{\partial \delta} = 0$, $\frac{r}{h} \gg 1$ рівняння (1) можна перетворити і записати наступним чином

$$\frac{\partial \tau_{r\delta}}{\partial r} - \rho g_{\delta} = 0, \quad (2)$$

$$g_{\delta} = g \sin \beta. \quad (3)$$

У випадку, коли $\tau_{r\delta}$ є функцією тільки від δ , рівняння (2) може бути записане в вигляді

$$\frac{d\tau}{dr} - \rho g \sin \beta = 0. \quad (4)$$

Реологічне рівняння, що зв'язує дотичне напруження зі швидкістю скочування часток будівельних сумішей по поверхні укусу має такий вигляд

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dV_{\text{СК}}}{dr}. \quad (5)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (4) і (5), отримуємо аналітичну залежність для визначення швидкості руху матеріалу по поверхні укосу

$$V_{\text{СК}} = \frac{\rho g}{\eta} \sin \beta \left(\frac{r^2}{2} - R_\delta r \right) - \frac{\tau_0}{\eta} r + C. \quad (6)$$

При $r = R_\delta + h = R_C$, $V_{\text{СК}} = 0$

$$C = -\frac{\rho g}{\eta} \sin \beta \left(\frac{R_C^2}{2} - R_\delta R_C \right) + \frac{\tau_0}{\eta} R_C, \quad (7)$$

$$V_{\text{СК}} = -\frac{\rho g}{\eta} \sin \beta \left(\frac{R_C - r^2}{2} - R_\delta (R_C - r) \right) + \frac{\tau_0}{\eta} (R_C - r). \quad (8)$$

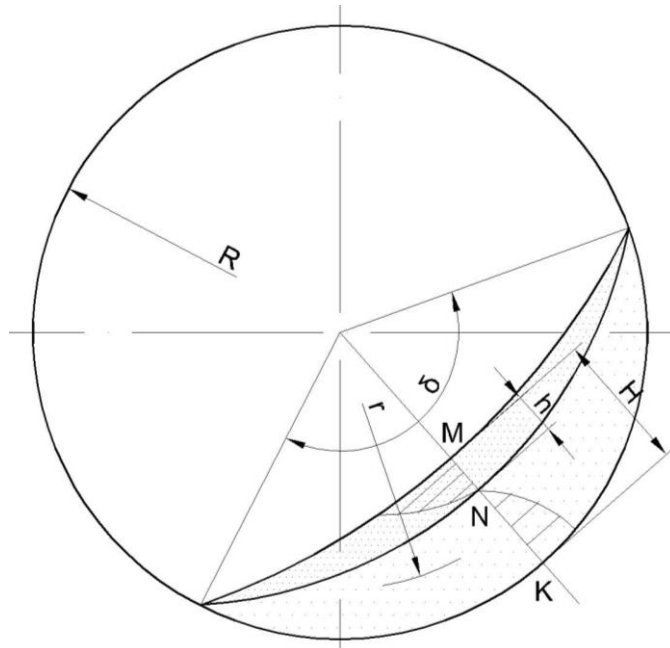


Рисунок 1. Схема руху матеріалу в площині обертання барабана.

Кількість матеріалу в шарі, що скочується, який проходить через переріз MN (рис. 1) в одиницю часу, визначається виразом

$$Q_{\text{СК}} = L \int_{R_C}^{R_\delta} V_{\text{СК}} dr. \quad (9)$$

Підставляючи $V_{\text{СК}}$ з (8) у (9) і інтегруючи в межах $R_\delta - R_C$, отримаємо

$$Q_{\text{СК}} = L \left[\frac{\rho g}{\eta} \sin \beta \frac{(R_C - R_\delta)^3}{3} - \frac{\tau_0}{\eta} \frac{(R_C - R_\delta)^2}{2} \right]. \quad (10)$$

Так як $R_C - R_\delta = h$, то (11)

$$Q_{\text{СК}} = L \left[\frac{\rho g}{3\eta} h^3 \sin \beta - \frac{\tau_0}{2\eta} h^2 \right]. \quad (12)$$

Товщина шару, що скочується, h знаходиться з умови нерозривності потоку, тобто кількість матеріалу, що скочується по поверхні укосу, дорівнює кількості матеріалу, що піднімається разом з барабаном

$$Q_{\text{СК}} = Q_{\text{П}}. \quad (13)$$



Кількість матеріалу, що піднімається, знаходиться з виразу

$$Q_{\Pi} = \frac{\omega R}{r} (H - h)L. \quad (14)$$

Прирівнюючи рівняння (12) і (14) і вводячи позначення $\frac{\rho g}{3\eta} = A$, $\frac{\tau_0}{2\eta} = B$, $\frac{\omega R}{r} = C$,

одержимо вираз для товщини шару, що скочується

$$Ah^3 - Bh^2 = C(H - h). \quad (15)$$

Товщина сегмента матеріалу визначається з рівняння

$$H = k \cdot \sin \frac{\pi}{\delta_0} \delta. \quad (16)$$

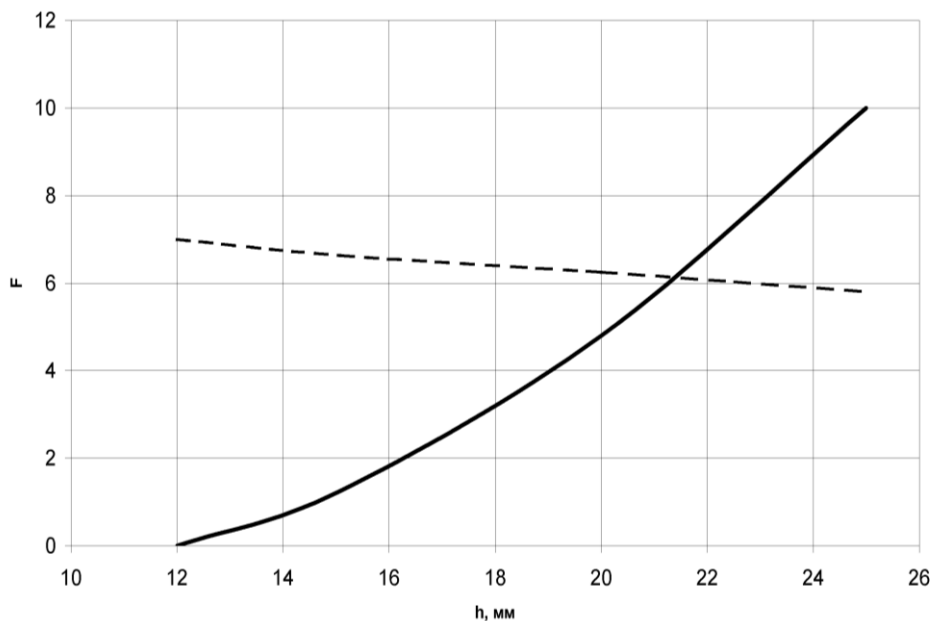


Рисунок 2. Графічний спосіб визначення товщини шару, що скочується.

Товщина шару, що скочується, знаходиться графічним методом. Для цього будується графік залежностей

$$Ah^3 - Bh^2 = f_1(h) \text{ і } C(H - h) = f_2(h).$$

Точка перетинання кривих буде характеризувати значення товщини шару будівельних сумішей, що скочується, в обертовому барабані (рис. 2).

Швидкість руху матеріалу вздовж осі обертового барабана залежить від швидкості руху часток у поперечній площині барабана. Співвідношення повздовжніх і поперечних складових швидкостей залежить від кута нахилу барабана, швидкості обертання і ступеня його заповнення, фізико-механічних властивостей матеріалу та інших факторів.

Для отримання рівняння осьової швидкості матеріалу будується трикутник швидкостей частки, що знаходиться в шарі, що скочується. Позначивши час підйому і час скочування частки відповідно через t_{Π} і $t_{СК}$, а їхнє співвідношення $\frac{t_{\Pi}}{t_{СК}} = \lambda$, одержимо

$$S = V'_{OC} \cdot t_{СК}, \quad (17)$$

$$V_{OC} = \frac{S}{t_{\Pi} + t_{СК}} = \frac{V'_{OC}}{\lambda + 1} = \frac{V_{СК} \cdot \text{tg} \xi}{\lambda + 1}, \quad (18)$$

$$\text{tg} \xi = \frac{\text{tg} \alpha + \text{tg} \zeta \cos \beta}{\sin \beta}. \quad (19)$$

Підставляючи $\text{tg} \xi$ в (18), будемо мати

$$V_{oc} = \frac{V_{ck}}{(\lambda + 1)\sin\beta} (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\xi \cos\beta). \quad (20)$$

Вираз $\operatorname{tg}\xi \cos\beta$ визначено у виді рівняння регресії, знайденого статистичним методом на основі математичної обробки результатів експериментів. В якості незалежних змінних були обрані:

n - швидкість обертання барабана, об/хв;

$\operatorname{tg}\alpha$ - тангенс кута нахилу барабана до горизонту;

$\sin^3 \frac{\delta}{2}$ - ступінь заповнення барабана матеріалом.

Рівняння регресії записується у виді:

$$\operatorname{tg}\xi \cos\beta = b_0 + b_1 n + b_2 \alpha + b_3 \sin^3 \frac{\delta}{2}. \quad (21)$$

Величина λ знаходиться за наступним рівнянням

$$\lambda = \frac{3 \sqrt{R_\delta^2 - R_0^2} (H - h)}{2 h \cdot (2R - H) \sin \frac{\delta}{2}}. \quad (22)$$

Продуктивність обертового барабана визначається добутком середньої осьової швидкості на площу сегмента матеріалу

$$Q = V_{oc} \cdot F_{сегм}. \quad (23)$$

Отже, площа сегмента матеріалу знаходиться по відомій формулі

$$F_{сегм} = \frac{1}{2} R^2 (\delta - \sin \delta), \quad (24)$$

$$Q = \frac{1}{2} R^2 (\delta - \sin \delta) \cdot V_{oc}. \quad (25)$$

Основні результати роботи.

1. Досліджено рух будівельних сумішей в площині нормальної осі обертання барабана і встановлено, що загальний потік матеріалу в шарі, що скочується, можна розглядати як циркуляційний потік, подібний потоку в'язко-пластичних середовищ. Зв'язок дотичних напружень зі швидкістю скочування часток матеріалу по поверхні укусу можна описати рівнянням (5).

2. Отримана залежність для визначення середньої швидкості скочування часток по поверхні укусу з урахуванням розподілу швидкостей по довжині поверхні і товщині шару, що скочується.

3. Отримана залежність для визначення товщини шару, що скочується, на будь-якій ділянці потоку.

4. Виведено залежність середньої швидкості руху сипучої маси вздовж осі обертового барабана, що зв'язує експлуатаційні параметри барабана з фізико-механічними властивостями оброблюваного будівельних сумішей.

Література

1. Канторович З.Б. Машины химической промышленности. – М.: Машиностроение, 1965. – 416с.
2. Свиридов М.М. Исследование движения сыпучего материала на внутренних устройствах машин с вращающимися барабанами. – Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1976.
3. Khakhar D.V., Shinbrot T., McCarthy J.J. and Ottino J.M., Phys. Fluids. – 1997. - №9.
4. Першин В.Ф. Исследование, разработка и методика расчета режимных и геометрических параметров машин барабанного типа. – Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1979.