

УДК 621.225:69.002.51

М.П. Ремарчук, д-р техн. наук,
Я.А. Ковальова

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ГІДРОДИНАМІЧНЕ ПОДРІБНЕННЯ МАТЕРІАЛІВ В КІЛЬЦЕВИХ КОНФУЗОРНО-ДИФУЗОРНИХ ЗАЗОРАХ

Процесс измельчения материалов основан на использовании теории гидродинамики. Данными исследованиями определены параметры процесса измельчения порошков и предложен удельный показатель для установления рациональных параметров рабочей поверхности мельницы.

Comminuting process of materials is grounded on use of the theory of hydrodynamics. The given researches define parameters of comminuting process of powder and the specific parametre for determination of rational parameters of a working surface of the mill is offered.

Вступ

Одним із основних напрямів підвищення ресурсу роботи автошляхів, промислових і громадських споруд є застосування в будівництві тонкодисперсних матеріалів (порошків). Отримання таких матеріалів можна досягти створенням нових ефективних засобів для подрібнення матеріалів, базуючись на теоретичних і експериментальних дослідженнях.

Аналіз наукових джерел

Механіка тонкодисперсних матеріалів на сьогоднішній день мало вивчена, не дивлячись на їх широке застосування у різних галузях промисловості. Тому прогнозування їх закономірностей є чималою проблемою, вирішення якої вимагає проведення фундаментальних досліджень [1]. Вчені, аналізуючи поведінку цих матеріалів, використовують гідромеханічну модель, у якій тонкодисперсні матеріали розглядаються з точки зору механіки суцільного середовища [2]. При цьому одним із методів дослідження поведінки матеріальних середовищ є статистичний метод. Раніше процес подрібнення порошків [3] вивчався за припущення, що вони ведуть себе у щільності як в'язка рідина.

У роботі [4] викладається принцип гідродинамічного змащування підшипника, конструктивне рішення якого показано на рисунку 1. Позицією 1 позначено робочу, а позицією 2 — неробочу зону змащування підшипника. У сучасній науковій літературі гідродинамічне змащування представлено, зокрема, в роботах [5] і [6]. Згідно дослідження [5] для кільцевого каналу розрахункову схему можна представити у вигляді розгортки робочої зони змащування підшипника, як це показано на рисунку 2.

На рисунку 2 позначення характеризують наступне: x, y — декартова система координат; u_0 — лінійна швидкість переміщення гладкої поверхні; ℓ — довжина конфузورного каналу; h_0, h_1 — мінімальне і максимальне значення зазору в кільцевому каналі; h — поточне значення зазору по координаті x ; P_0 — тиск на вході і виході конфузорного каналу.

Умови змащування в шпінті підшипника — в зоні контакту з поверхнями змащуваних деталей.

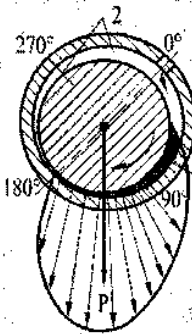


Рисунок 1 — Схема роботи підшипника.

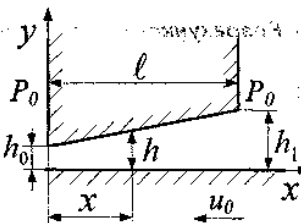


Рисунок 2 — Розгортка каналу підшипника.

На рисунку 2 позначення характеризують наступне: x, y — декартові системи координат; u_0 — лінійна швидкість переміщення гладкої поверхні; ℓ — довжина конфузорного каналу; h_0, h_1 — мінімальне і максимальне значення зазору в кільцевому каналі; h — поточне значення зазору по координаті x ; P_0 — тиск на вході і виході конфузорного каналу.

Закономірність розподілу тиску для конфузорного каналу [5] представлено залежністю

$$P_x = P_0 + \frac{6\mu u_0 \ell}{k h_0^2} \left(\frac{\ell}{\ell + kx} - \frac{1}{2+k} - \frac{1+k}{2+k} \frac{\ell^2}{(\ell + kx)^2} \right), \quad (1)$$

де μ — динамічна в'язкість матеріалу; k — параметр форми виконання (клиноподібність) конфузорного каналу. Графічне рішення (1) у безрозмірному вигляді

$$P(x) = \frac{P_k - P_0}{6\mu u_0 \ell / (k h_0^2)} = f\left(\frac{x}{\ell}, k\right) \text{ представлено на рисунку 3.}$$

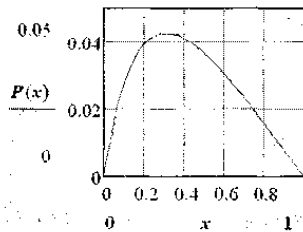


Рисунок 3 — Розподіл тиску в безрозмірному значенні по довжині конфузорного каналу.

Для визначення динамічної в'язкості матеріалів зроблено спеціальний прилад [7]. Конструкцію прилада складають циліндричні осесиметрично розташовані поверхні, розрахункову схему яких показано на рисунку 4.

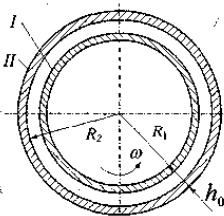


Рисунок 4 — Розрахункова схема прилада.

Процес визначення в'язкості матеріалу забезпечується, коли, наприклад, кільце II з радіусом R_2 є нерухомим, а кільце I радіусом R_1 обертається з кутовою швидкістю ω . При цьому контролюється величина крутного моменту M_t , що виникає при взаємодії поверхонь тертя I і II через матеріал товщиною h_0 (довжину контакту поверхонь тертя I і II на рисунку 4 не показано). Для наведених умов [7] динамічна в'язкість матеріалу визначається за залежністю

$$\mu = \frac{M_t (R_2^2 - R_1^2)}{4\pi b_k \omega R_1^2 R_2^2}, \quad (2)$$

де b_k — висота, яка забезпечує взаємодію поверхонь I і II з матеріалом (на рисунку 4 не показано).

За результатами досліджень, процес гідродинамічного змачування підшипника можна замінити процесом подрібнення порошкоподібних матеріалів за рахунок створення конфузорно-дифузорних каналів і, базуючись на цьому, можна сформулювати мету роботи і для досягнення її необхідно визначити задачі досліджень.

Мета роботи і задачі досліджень

Метою роботи є встановлення закономірностей гідродинамічного подрібнення мінеральних порошків в конфузорно-дифузорних зазорах, створених між робочими поверхнями млина та обґрунтування їх раціональних параметрів для інтенсифікації процесу подрібнення матеріалів.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі: — визначити на основі теорії моделювання динамічну в'язкість матеріалу; — отримати залежності для визначення характеру розподілу тиску по довжині конфузорного і дифузорного каналів, сили тертя, крутного моменту і потужності, необхідних для забезпечення подрібнення матеріалу в даних каналах; обґрунтувати на підставі фізики гідромеханічного процесу подрібнення матеріалів питомий показник для визначення раціональних параметрів конфузорно-дифузорних каналів, створених по периметру взаємодії робочих поверхонь млина.

Рішення задач

На основі теорії моделювання [8] з урахуванням зв'язку між лінійною і кутовою швидкістю та співвідношення між геометричними параметрами можна записати

$$\frac{u_0 b_k \rho}{\mu} = \frac{\omega R_1 b_k \rho}{\mu} \approx \frac{b_k}{h_0}, \quad (3)$$

де ρ — густина (питома маса) матеріалу.

Для погодження правої і лівої складових рівняння (3) введемо коефіцієнт у вигляді функції $k_m(h_0, k, \rho \dots)$, який зменшить розбіжність між ними. Проведення досліджень на основі планування експериментів дозволить встановити вплив на величину коефіцієнта k_m найбільш суттєвих факторів, зокрема h_0, k, ρ , вологості матеріалу та інших.

Отже залежність (3) матиме вигляд

$$\frac{\omega R_1 b_k \rho}{\mu} k_m(h_0, k, \rho \dots) = \frac{b_k}{h_0}. \quad (4)$$

Рішенням рівняння (4) є

$$\mu = \omega R_1 h_0 \rho k_m(h_0, k, \rho \dots). \quad (5)$$

Сумісне рішення рівнянь (2) і (5) дозволить отримати залежність для визначення величини крутного моменту між осесиметричними циліндричними поверхнями при наявності в їх зазорі матеріалу, яка матиме вигляд

$$M_t = \frac{4\pi \omega^2 b_k R_1^3 R_2^2 \rho k_m(h_0, k, \rho \dots)}{R_2 + R_1}. \quad (6)$$

Співставлення величини крутних моментів, один з яких встановлюється експериментально $M_{\text{експ}}$, а інший по залежності (6) дасть можливість виявити мінімальну розбіжність між ними.

Згідно розрахункової схеми прилада (рисунку 4) розглянемо рух матеріалу в кільцевому каналі, створеному

між робочими поверхнями I і II у вигляді конфузорно-дифузorzних каналів, розрахункову схему яких представлено у вигляді розгортки на рисунку 5.

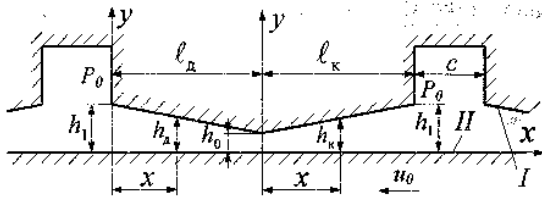


Рисунок 5. Розрахункова схема розгортки конфузорно-дифузorzного кільцевого каналу.

Для виявлення особливостей роботи (у порівнянні з розрахунковою схемою, яку показано на рисунку 2) і розбіжностей в отриманих результатах процес руху матеріалу в конфузорно-дифузorzних каналах будемо розглядати теж у декартовій системі координат x і y , направлених у позитивному напрямку і, як припущення, рух матеріалу приймемо у вигляді плоскопаралельного, коли поверхня I є нерухомою, а поверхня II переміщується (обертається).

Згідно схеми (рисунку 5) на поверхні I кількість клиноподібних поверхонь довжиною ℓ_k і ℓ_d залежить від довжини власного периметру і кількості проточок довжиною s , що розділяє клиноподібні поверхні.

Розглянемо рішення задачі по забезпеченню подрібнення матеріалу в конфузорному каналі як першу частину цієї задачі.

Система рівнянь Нав'є-Стокса [5] при нехтуванні складовими малого впливу спрощується до вигляду

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}, \quad (7)$$

де p — тиск; u_x — лінійна швидкість руху.

Швидкість руху матеріалу згідно [5] при обертанні поверхні II на підставі рішення (7) визначатиметься залежністю

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1 y + C_2, \quad (8)$$

де C_1 , C_2 — константи рівняння.

Для знаходження змінної величини каналу між кільцями для конфузорного і дифузorzного кільцевих каналів скористаємось залежностями

$$h_k = h_0 + \frac{h_1 - h_0}{\ell_k} x = h_0 \left(1 + k \frac{x}{\ell_k} \right), \quad (9)$$

$$h_d = h_0 + \frac{h_1 - h_0}{\ell_d} (\ell_d - x) = h_0 \left(1 + k \frac{\ell_d - x}{\ell_d} \right), \quad (10)$$

де h_k , h_d — поточне значення зазору в кільцевому конфузорному і дифузorzному каналах; h_0 — мінімальне значення зазору в кільцевому каналі; h_1 — значення зазору

на вході у кільцевий конфузорний і дифузorzний канали; ℓ_k , ℓ_d — довжина конфузорного і дифузorzного кільцевих каналів; k — параметр клиноподібності форми виконання конфузорного і дифузorzного каналів.

Параметр клиноподібності для конфузорного і дифузorzного кільцевого каналу визначається за формулою

$$k = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \quad (11)$$

При створенні млина приймемо умову, завдяки якій $\ell_k = \ell_d = \ell$, а також, що $h_k = h_d = h$.

Скористаємось граничними умовами для розрахункової схеми (рисунку 5):

— конфузорний канал

$$u_x = -u_0 \text{ коли } y = 0,$$

$$u_x = 0 \text{ коли } y = h.$$

— дифузorzний канал

$$u_x = -u_0 \text{ коли } y = 0,$$

$$u_x = 0 \text{ коли } y = h.$$

На підставі наведених граничних умов визначимо C_1 і C_2 та отримаємо закон розподілу поздовжньої швидкості за формулою, яка, зокрема, співпадає з [5]

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) - u_0 \left(1 - \frac{y}{h} \right). \quad (12)$$

Використовуючи формулу (12), знайдемо величину питомих витрат матеріалу

$$q = - \int_0^h u_x dy. \quad (13)$$

Рішенням (13) буде

$$\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{u_0 h}{2}. \quad (14)$$

Рівняння (14) представимо у вигляді

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6\mu u_0 \frac{1}{h^2}. \quad (15)$$

Скориставшись відомим прийомом [5] $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial x}$ і виконавши диференціювання з врахуванням (9), отримаємо

$$\frac{\partial p}{\partial x} = k \frac{h_0}{\ell} \frac{\partial p}{\partial h}.$$

Замість (15) запишемо

$$\frac{\partial p}{\partial h} = \frac{6\mu u_0 \ell}{k h_0} \frac{1}{h^2}. \quad (16)$$

Інтегруючи отримане рівняння і позначивши тиск у конфузорному кільцевому каналі як $p = p_k$, визначимо характер розподілу тиску в цьому каналі

$$p_k = \frac{6 \mu u_0 \ell}{k h_0} \frac{1}{h} + C_0. \quad (17)$$

Для встановлення характеру розподілу тиску по довжині конфузрного кільцевого каналу необхідно скористатись граничними умовами, зокрема:

коли $x = \ell_k$, а $h = h_1$, то $p = p_0$,

коли $x = 0$, а $h = h_0$, то $p = p_m$.

Із граничних умов витікає ще одна невідома величина $p = p_m$, яка визначає тиск у зоні переходу від конфузрного до дифузрного кільцевого каналу.

У результаті рішення (17) з урахуванням граничних умов отримаємо закон розподілу тиску по довжині конфузрного кільцевого каналу

$$p_k = p_0 + \frac{6 \mu u_0 \ell}{k h_0^2} \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{h_1} \right). \quad (18)$$

Замінивши h і h_1 на їх залежності отримаємо

$$p_k = p_0 + \frac{6 \mu u_0}{k h_0} \left[\frac{\ell}{\ell + k x} - \frac{1}{1 + k} \right]. \quad (19)$$

Закономірність розподілу тиску (19) по довжині каналу в безрозмірних координатах у вигляді функції

$$P_k(x) = \frac{p_k - p_0}{\frac{6 \mu u_0 \ell}{k h_0^2}} = f\left(\frac{x}{\ell}, k\right),$$

графічно представлено на рисунку 6.

Як видно з рисунку 6, тиск у зоні мінімального зазору для конфузрного каналу досягає максимального значення, тобто $p = p_m$.

Отримані дані співпадають з результатами відомих досліджень [9].

Для визначення сили тертя, скористаємось визначенням згідно [5] дотичного напруження Φ_0 за формулою

$$\Phi_0 = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (20)$$

У відповідності до [5], на підставі закону розподілу швидкості (12), отримаємо залежність для визначення дотичного напруження, яка матиме вигляд

$$\Phi_0 = \mu \frac{u_0}{h} - \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (21)$$

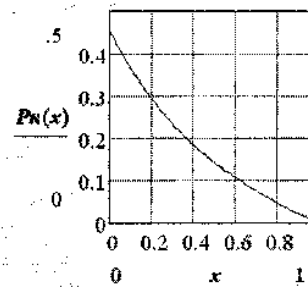


Рисунок 6. Розподіл тиску по довжині конфузрного кільцевого каналу.

При заміні в отриманому рівнянні h і p на підставі рівнянь (9) і (19) після спрощення отримаємо

$$\Phi_0 = \mu \frac{u_0}{h_0} \left(\frac{\ell}{\ell + k x} + \frac{6 \ell}{\ell + k x} \right). \quad (22)$$

Сила тертя F_k , яка виникає при подрібненні матеріалу, складає величину

$$F_k = b_k \int_0^{\ell_k} \Phi_0 dx. \quad (23)$$

Рішенням цього інтегралу є залежність

$$F_k = \mu b_k \frac{u_0 \ell}{h_0} \left[\frac{7}{k} \ln(1 + k) \right]. \quad (24)$$

При умові, що $k=1,2$, розрахункова сила тертя F_{kp} складатиме величину

$$F_{kp} \approx 4,596 \mu b_k \frac{u_0 \ell}{h_0}. \quad (25)$$

Продовженням рішення другої задачі є розгляд дифузрного каналу, в якому завершується процес подальшого подрібнення матеріалу. Граничними умовами для дифузрного каналу є:

коли $x = 0$, а $h = h_1$ то $p = p_0$,

коли $x = \ell_d$, а $h = h_0$ то $p = p_m$.

Опускаючи проміжні викладки, отримаємо залежність для визначення характеру розподілу тиску по довжині дифузрного каналу, яка матиме вигляд

$$p_d = p_0 + \frac{6 \mu u_0}{k h_0} \left[\frac{\ell}{\ell + k(1-x)} - \frac{1}{1+k} \right]. \quad (26)$$

Графік розподілу тиску в дифузрному каналі представляє собою дзеркальне відображення розподілу тиску, встановленого для конфузрного каналу (рисунк 6).

Сила тертя F_d в дифузрному каналі при подрібненні матеріалу співпадає з F_k , тобто

$$F_d = F_k. \quad (27)$$

Загальна сила тертя $F_{\text{кл}}$, що виникає в конфузотно-дифузотному каналах при подрібненні матеріалу визначається за формулою

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{к}} + F_{\text{д}}. \quad (28)$$

Крутний момент, який виникає при подрібненні матеріалу, визначатиметься за формулою

$$M = 0,5 F_{\text{кл}} n_{\text{кл}} \ell_{\text{кл}} (R_1 + R_2), \quad (29)$$

де $n_{\text{кл}}$, $\ell_{\text{кл}}$ — кількість і загальна довжина клиноподібних (конфузотно-дифузотних) поверхонь, виконаних на робочій поверхні I .

Визначення моменту M , на підставі вищевказаної формули та моменту за результатами експериментальних досліджень, дозволяють встановити ступінь розбіжності між ними. Витрати енергії на подрібнення матеріалу для заданої кутової швидкості руху однієї із поверхонь складають величину

$$N_{\text{кл}} = M \omega. \quad (30)$$

Визначення потужності первинного двигуна з урахуванням величини його коефіцієнта корисної дії дозволить також встановити розбіжність між отриманими результатами.

Запропонований питоми показник $t_{\text{м}}$, що представляє собою відношення діаметра робочої поверхні, на якій виконані клиноподібні поверхні з заданою їх кількістю і довжиною, до величини енергії, що витрачається на процес подрібнення матеріалу і визначається як

$$t_{\text{м}} = D_1 / N_{\text{кл}}, \quad (31)$$

де D_1 — діаметр робочої поверхні, на якій виконані різної за кількістю $n_{\text{кл}}$ і довжиною $\ell_{\text{кл}}$ клиноподібні поверхні та точки довжиною s , складає (рисунк 4) величину $2 R_1$.

Для конструкції, в якій по периметру робочої поверхні виконано деяку кількість $n_{\text{кл}}$ і довжина клиноподібних поверхонь $\ell_{\text{кл}}$ з урахуванням проточок довжиною s і величина цього питомого показника $t_{\text{м}}$ складає мінімальне значення, то така конструкція робочих поверхонь є раціональною, що забезпечує найбільш ефективно гідродинамічне подрібнення матеріалів.

Висновки

1. На підставі даних досліджень запропоновано по периметру зовнішньої робочої поверхні I виконувати клиноподібні поверхні, які сумісно із внутрішньою робочою поверхнею II створюють конфузотно-дифузотні канали, що забезпечують умови для подрібнення матеріалів і отримання порошків на основі застосування теорії гідродинаміки.

2. Базуючись на теорії гідромеханіки, отримано залежності для визначення закономірностей розподілу тиску по довжині конфузотного і дифузотного каналів, сили тертя, крутотного моменту і потужності для забезпечення процесу подрібнення порошкоподібних матеріалів.

3. Для визначення раціональних конструктивних параметрів робочих поверхонь млина запропоновано питоми показник, який визначається через співвідношення між діаметром робочої поверхні, по периметру якого виконано клиноподібні поверхні, до величини потужності, що витрачається на процес подрібнення матеріалу у вигляді порошків.

Література

1. Долгунин, В.Н., Боршев, В.Я. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 112 с.
2. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1983. — Т. 1. — 528 с.
3. Ходаков, Г.С. Физика измельчения. — М.: Наука, 1978. — 307 с.
4. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Аликина. — М.: Машиностроение, 1979. — 358 с.
5. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1987. — 440 с.
6. Ремарчук, Н.П., Ковальова, Я.А. Измельчение в конфузотно-дифузотном зазоре материалов, применяемых в дорожном строительстве / 36. наук. пр. Галузеве машинобудування, будівництво, Вип. 23., том 2. — Полтава: ПолтНТУ. — 2009. — С. 109—112.
7. Белкин, И.М., Виноградов, Г.В., Леонов, А.И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. — М.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
8. Алабужев, П.М., Геронимус, В.Б., Минкевич, Л.М., Шеховцов, Б.А. Теория подобия и размерностей. Моделирование. — М.: Высшая школа, 1968. — 208 с.
9. Исаченков, Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. — М.: Машиностроение, 1978. — 208 с.

Надійшла 20.05.2011 р.