

Ремарчук М.П.,***Ковальова Я.А.****

*Українська державна академія

залізничного транспорту,

**Харківський національний

автомобільно - дорожній університет,

м. Харків, Україна

E-mail: remarchyk@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ТИСКУ МІЖ ДВОМА ПОВЕРХНЯМИ ПРИ ЗДРІБНЕННІ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В РЕЖИМІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТЕРТЯ

УДК 621.225:69.002.51

Розроблена конструкція млина з електричним приводом з забезпеченням обертового руху однієї з робочих поверхонь млина, а друга являється нерухомою робочою поверхнею зі складною формою виготовлення, які сумісно утворюють в з'єднанні по колу деяку кількість однотипних за виконанням у вигляді конфузорних або конфузорно-дифузорних кільцевих каналів. Встановлена теоретична залежність для визначення впливу фізико-механічних характеристик сипких матеріалів, конструктивних і кінематичних параметрів млина на величину дії тиску між двома поверхнями при їх здрібненні в режимі гідродинамічного тертя в з'єднанні двох поверхонь.

Ключові слова: сила тертя, гідродинамічне тертя, здрібнення, тиск матеріалу, конфузорний канал, конфузорно - дифузорний канал, крутний момент, потужність, коефіцієнт корисної дії.

Вступ

Під здрібненням сипких матеріалів (СМ) розуміють процес зменшення їх розмірів шляхом механічного (рідше - якого-небудь іншого) впливу на СМ [1]. Процеси здрібнення СМ умовно класифікують за розмірами зменшення від початкового до кінцевого значення. У млинах здрібнення СМ відбуваються одночасно за кількома способами.

Для оцінки витрат енергії при руйнуванні СМ використовують дві гіпотези. При здрібненні матеріалу способами роздавлювання, розколювання, удару витрати енергії Nk (Дж) на руйнування матеріалу від початкового значення d_n до кінцевого розміру d_k при ступеня здрібнення Z_n якісно відповідає гіпотезі Кірпічова [1]:

$$Nk = (\pi \cdot \sigma_p^2 \cdot d_k^3 \cdot (Z_n^3 - 1)) / (12 \cdot E), \quad (1)$$

де σ_p – міцність сипкого матеріалу;

E – модуль пружності матеріалу.

Згідно гіпотези Рітінгера при здрібненні матеріалу способом стирання (і деякими іншими) на руйнування від початкового розміру d_n до ступеня дрібнення Z_n витрати енергії Nr складають [1]:

$$Nr = K_p \cdot d_n^2 \cdot (Z_n - 1), \quad (2)$$

де K_p – емпіричний коефіцієнт з розмірністю Дж/м².

Для кожного СМ емпіричний коефіцієнт K_p потребує свого експериментального визначення.

Використання (1) і (2) можливе тільки для наближених розрахунків для визначення потужності процесу здрібнення СМ. Відома конструкція млин [2] названа клинова, оскільки за принципом здійснення процесу здрібнення вона подібна до дії клина. Згідно цього принципу між двома поверхнями, одна з яких є рухомою розміщують додатково шари, що забезпечують здрібнення СМ. Конструкція цього млина наведена на рис. 1. Для зменшення складових в конструкції млина додаткових елементів широко застосовують валкові млини з наріжним і внутрішнім здрібненням СМ.

Так, млин з внутрішнім здрібненням СМ представлено на рис. 2. В основу процесу здрібнення СМ для цього млина використаний принцип поведінки СМ як рідин [3], тобто, для здрібнення застосовується відомий принцип гідродинамічного ефекту.

Суттєвим недоліком такої конструкції є неефективне використання рухомої робочої поверхні млина. Для усунення цього недоліку рухомих робочих поверхонь млина виконують складної форми, як це показано на рис. 3. Така форма виконання робочої рухомої поверхні млина разом з нерухомою робочою поверхнею забезпечує створення по периметру їх обох конфузорно - дифузорні кільцеві канали, рис. 3, а або конфузорні кільцеві канали, див. рис. 3, б.

Оскільки СМ ведуть себе в вузьких каналах як рідини, згідно [3], то враховуючи наведене необхідно розглянути докладніше теоретичні здобутки в цьому напрямку. Зокрема, процес рідинного, гідродинамічного змащення для конфузорного каналу теоретично обґрунтовано в роботі «Тертя в машинах і вплив на нього змащення рідиною» ще в 1883 р. відомим вченим М.П. Петровим.



Рис. 1 – Схема здрібнення СМ за принципом роботи клина

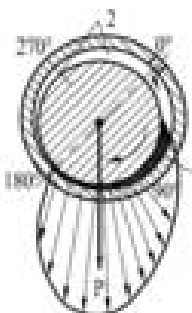


Рис. 2 – Схема роботи млина з внутрішнім здрібненням СМ

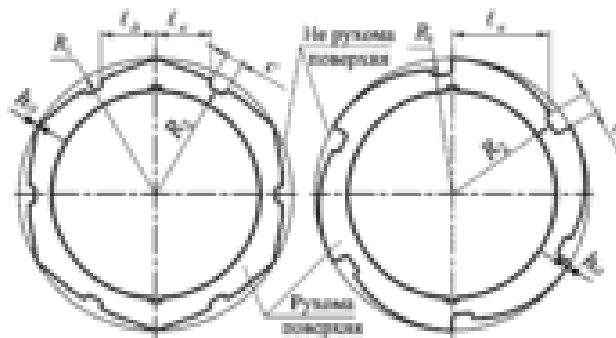


Рис. 3 – Схема роботи млина з внутрішнім багаторазовим здрібненням СМ

За результатами досліджень Петрова М.П. та з урахуванням, зокрема, досліджень [2] і [3] в даному напрямку, а також власного досвіду була створена конструкція млина [4], яку наведено на рис. 4. Теоретичні і експериментальні дослідження по здрібненню СМ в конфузурно-дифузурно-кільцевому каналах в режимі забезпечення гідродинамічного тертя наведено в наукових роботах [5] і [6].

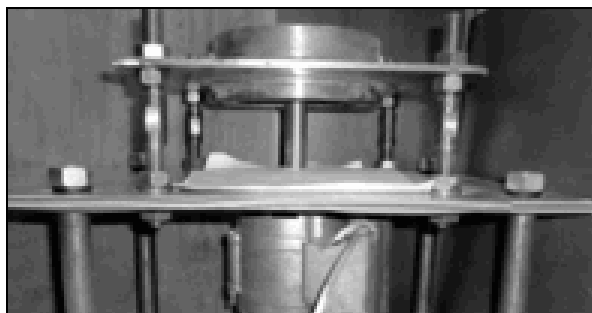


Рис. 4 – Вигляд млина з електроприводом призначеним для здрібнення СМ в режимі гідродинамічного тертя [4]

При зображенні колових розгортки обох поверхонь використано декартові координати для каналів конфузурно-дифузурної і конфузурної форми див. рис. 3, а, б, які представлено на рис. 5 і 6, відповідно.

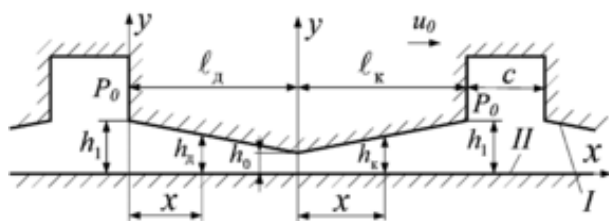


Рис. 5 – Схема розгортки двох поверхонь млина у вигляді конфузурно-дифузурного каналу

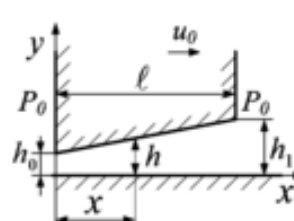


Рис. 6 – Схема розгортки двох поверхонь млина у вигляді конфузурного каналу

Позначення на рис. 5 і 6 характеризують наступне: x, y – декартові системи координат; u_0 – швидкість переміщення рухомої поверхні млина; ℓ – довжина клиноподібного; h_0, h_1 – мінімальне і максимальне значення каналу між двома робочими поверхнями млина; h – поточне значення відстані між двома робочими поверхнями млина по координаті x ; P_0 – тиск на вході і виході конфузорно-дифузорного і конфузорного каналів. Для схеми див. рис. 3, а кількість і довжина каналів ℓ_k і ℓ_δ на робочій поверхні I залежить від їх власної довжини і кількості проточок довжиною c , що можуть бути виготовленими по периметру кола з радіусом R_1 . Рівняння по визначенню кількості z каналів довжиною ℓ_k, ℓ_δ має вигляд:

$$(\ell_k + \ell_\delta + c) \cdot z = 2 \cdot \pi \cdot R_1 \quad (3)$$

Для схеми див. рис. 3, б рівняння для визначення кількості z довжини конфузорного ℓ_k каналу, коли має вигляд:

$$(\ell_k + c) \cdot z = 2 \cdot \pi \cdot R_1 \quad (4)$$

Згідно [5] і [6] розподіл тиску по довжині конфузорного p_k і дифузорного p_δ кільцевого каналу виражається залежностями у вигляді:

$$p_k = P_0 + (6 \cdot \mu \cdot u_0) / (k \cdot h_0) (\ell / (\ell + kx) - 1 / (1 + k)), \quad (5)$$

$$p_\delta = P_0 + (6 \cdot \mu \cdot u_0) / (k \cdot h_0) \cdot (\ell / (\ell + k(\ell - x)) - 1 / (1 + k)), \quad (6)$$

де μ – динамічна в'язкість матеріалу;

k – параметр клиновидної форми виконання конфузорного і дифузорного каналів.

Параметр клиновидної форми виконання для кільцевих каналів визначається за формулою:

$$k = (h_1 - h_0) / h_0. \quad (7)$$

Розподілу тиску по довжині тільки конфузорного каналу представлена відомою залежністю:

$$p_k = P_0 + (6 \cdot \mu \cdot u_0 \cdot \ell) / (k \cdot h_0^2) \cdot (\ell / (\ell + kx) - 1 / (2 + k) - (\ell^2 \cdot (1 + k)) / ((2 + k) \cdot (\ell + kx)^2)). \quad (8)$$

Аналіз залежностей (5), (6) і (8) з урахуванням фізики процесу здрібнення СМ на створеному млині, свідчить про подібність поведінки СМ і рідини в каналах з'єднання. Разом з тим, рідина в кільцевих каналах зменшує силу тертя, а СМ її збільшує. Таким чином можна зазначити, що за внутрішнім станом ці процеси суттєво відрізняються один від одного. Тому, для визначення тиску, що виникає між двома поверхнями при здрібненні СМ потребує проведення додаткового дослідження на підставі чого необхідно сформулювати мету і задачі дослідження.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є визначення величини тиску між двома поверхнями в кільцевих конфузорно-дифузорному та конфузорному каналах при здрібненні СМ в режимі гідродинамічного тертя.

Для досягнення поставленої мети слід скористатись системним підходом для визначення потужності і ККД, які характеризують процес здрібнення СМ між двома робочими поверхнями млина.

Виклад матеріалів досліджень

Робота сил тертя за один оберт вала млини, що витрачається на процес здрібненні СМ при обертанні по колу рухомої поверхні відносно нерухомої при умові створення між ними конфузорного або конфузорно-дифузорного кільцевого каналу, складає величину:

$$A_1 = T \cdot R_1 \cdot 2 \cdot \pi, \quad (9)$$

де T – сила тертя, що виникає при здрібненні СМ в рухомому з'єднанні конфузорного або конфузорно-дифузорного кільцевого каналу.

Слід зазначити, що добуток $T \cdot R_1$ представляє собою величину крутного моменту, тобто:

$$T \cdot R_1 = M. \quad (10)$$

Тоді рівняння (9) матиме вигляд:

$$A_1 = M \cdot 2 \cdot \pi. \quad (11)$$

При здрібненні СМ величина роботи сил тертя для створеного млина визначається залежністю:

$$A_2 = P_i \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z, \quad (12)$$

де ℓ_i – довжина конфузороного або конфузороно - диффузорного кільцевого каналу;

P_i – деяка величина тиску матеріалу, що діє між поверхнями млина в зоні конфузороного або конфузороно - диффузорного кільцевого каналу по їх довжині ℓ_i , припускаючи умовно, як відому величину;

b – ширина поверхні конфузороного або конфузороно - диффузорного кільцевого каналу, що забезпечує ефективний процес здрібнення СМ;

f – коефіцієнт тертя між двома робочими поверхнями млина, є довідковим параметром.

Фактичну величину параметра b на підставі виконаних досліджень необхідно приймати зменшеною на 20 ... 40 % від початкового значення із-за часткових втрат матеріалу, що не підпадає здрібненню.

Для конфузороно-диффузорного кільцевого каналу його довжина складає:

$$\ell_i = (\pi \cdot 2 \cdot R_1 - c \cdot z) / (2 \cdot z). \quad (13)$$

Для конфузороного кільцевого каналу його довжина складає:

$$\ell_i = (\pi \cdot 2 \cdot R_1 - c \cdot z) / z. \quad (14)$$

Для ідеального млина роботи сил тертя, що визначаються за (11) і (12) є однаковою, тобто:

$$A_1 = A_2. \quad (15)$$

Для реального млина при здрібненні СМ залежність (15) матиме інший вигляд, зокрема:

$$A_1 \cdot \eta_n = A_2, \quad (16)$$

де η_n – ККД процесу здрібнення СМ між двома робочими поверхнями в конфузороному або конфузороно - диффузорному кільцевому каналі млина.

При підставленні залежностей (11) і (12) в (16) отримаємо крутний момент на валу млина у вигляді:

$$M = (P_i \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z) / (2 \cdot \pi \cdot \eta_n). \quad (17)$$

Помножив праву і ліву частину рівняння (17) на кутову швидкість ω , і якщо в правій частині замінімо її на $\omega = (2 \cdot \pi \cdot n) / 60$, то в результаті отримаємо наступне рівняння:

$$N_n = (P_i \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z \cdot n) / (60 \cdot \eta_n), \quad (18)$$

де N_n – потужність, що витрачається на процес здрібнення СМ між двома робочими поверхнями в конфузороному або конфузороно-диффузорному кільцевому каналі млина;

n – частота обертів робочої рухомої поверхні млина, визначається за даними електродвигуна.

Отримане рівняння (18) дозволяє визначити величину ККД процесу здрібнення СМ при взаємодії тільки двох поверхонь в конфузороному або конфузороно-диффузорному кільцевому каналі млина:

$$\eta_n = (P_i \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z \cdot n) / (60 \cdot N_n). \quad (19)$$

Разом з тим ККД процесу здрібнення СМ згідно фізики процесу для двох поверхонь в конфузороному або конфузороно-диффузорному кільцевому каналі млина можна також визначити за формулою:

$$\eta_n = N_n / (N_e - N_{xx}), \quad (20)$$

де N_e – потужність електродвигуна, що витрачається на здрібнення СМ, визначається приладом;

де N_{xx} – потужність електродвигуна в холостому режимі, визначається приладом.

Оскільки величина ККД, що визначається за формулами (19) і (20) є однаковою, то прирівнюючи їх отримаємо величину потужності, що витрачається на процес здрібнення СМ:

$$N_n = \sqrt{(P_i \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z \cdot n \cdot (N_e - N_{xx}))} / 60. \quad (21)$$

Загальний ККД млина визначається за залежністю у вигляді:

$$\eta_c = (P \cdot \sigma_m) / N_e, \quad (22)$$

де P – продуктивність млина, яка в процесі здрібнення СМ спеціально вимірюється;

σ – міцність матеріалу при здрібненні приймається за довідковими даними.

Разом з тим, загальний ККД млина визначається за наступною формулою

$$\eta_c = \eta_m \cdot \eta_n, \quad (23)$$

де η_m – загальний ККД електродвигуна і підшипникового вузла млина.

Для підвищення ефективності роботи підшипникового вузла млина, який є найбільш навантаженим, використані рекомендації, щодо застосування рідких мастильних матеріалів із присадками різних станів, наведених в наукових роботах [7] і [8]. Завдяки їм забезпечується підвищення ККД підшипникового вузла млина на 25...40 % відносно традиційного значення.

Підставляючи формули (20) і (22) в (23) остання залежність отримає наступний вигляд:

$$(P \cdot \sigma_m) / N_e = (\eta_m \cdot N_n) / (N_e - N_{xx}). \quad (24)$$

З отриманої залежності (24) можна визначити величину потужності, що витрачається млином на процес здрібнення СМ:

$$N_n = (P \cdot \sigma_m \cdot (N_e - N_{xx})) / (\eta_m \cdot N_e). \quad (25)$$

За законами фізики процесу здрібнення СМ величина потужності, що визначається за формулами (21) і (25) є однаковою, то вирішуючи їх сумісно отримаємо залежність для встановлення величини дії тиску матеріалу в зоні його здрібнення між двома поверхнями млина у вигляді:

$$P_i = (60 \cdot P^2 \cdot \sigma_m^2 \cdot (N_e - N_{xx})) / (\eta_m^2 \cdot N_e^2 \cdot \ell_i \cdot b \cdot f \cdot R_1 \cdot z \cdot n). \quad (26)$$

Конструкція млина, у якого по периметру рухомої робочої поверхні виконана деяка кількість z клиноподібних поверхонь довжиною ℓ_i з урахуванням проточок довжиною c , то процес здрібнення СМ таким млином можна характеризувати питомим показником, що визначається за формулою:

$$t_m = (2 \cdot \pi \cdot R_1) / N_n \rightarrow \min. \quad (27)$$

Якщо ця умова виконується, то рухома робоча поверхня млина являється раціональною.

Висновки

На основі системного підходу отримана залежність для визначення величини тиску між двома поверхнями млина при здрібненні СМ в режимі гідродинамічного тертя. Для підтвердження результатів отриманих теоретичним методом необхідно виконати експериментальні дослідження і провести їх аналіз.

Література

1. О процессе измельчения твёрдых тел [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ttizm.narod.ru/meln/izos.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 15.10.2015).
2. Мельницы КМ: клиновые мельницы нового поколения [Электронный ресурс] – Режим доступа: v-mill.ru. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 10.11.2015).
3. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука. – 1983. – Т. 1. – 528 с.
4. Пат. 84348 UA, МПК В02С 21/00. Млин / Ремарчук М.П., Ковальова Я.А.; власник Харк. нац. автомобільно-дор. ун. № а 201112201; заяв. 18.10.2011; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.
5. Ремарчук М.П. Гідродинамічне подрібнення матеріалів в кільцевих конфузотно-дифузотних зазорах / М.П. Ремарчук, Я.А. Ковальова //Промислова гідраліка і пневматика. – 2011. – № 4(34). – С. 15–19.
6. Ремарчук Н.П. Методика експериментальних досліджень процесу измельчения материалов в мельнице с конфузотными и конфузотно-дифузотными кольцевыми каналами / Н.П. Ремарчук, Я.А. Ковалева // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2012. – Вип. 123. – С. 188–195.
7. Лисіков Є.М. Нанотехнології на залізничному транспорті: навч. посібник / Є.М. Лисіков, С.В. Воронін, О.О. Скорик, Д.В. Онопрейчук. – Харків: ДІСА ПЛЮС. – 2013. – 212 с.
8. Воронін С.В. Дослідження трибологічних характеристик смектичного шару граничної плівки / С.В. Воронін, В.О. Стефанов // Проблеми трибології. – 2014. – № 2(72). – С. 58-64.

Поступила в редакцію 02.12.2015

Remarchuk M. P., Kovalova Y. A. **Determination of the pressure between the two surfaces during the grinding of the granular material in the mode of hydrodynamic friction.**

The developed design of the mill with the electric drive providing the rotational motion of one of the working surfaces of the mill, and the second is a fixed work surface with a complex form of manufacturing, which together form a circle connection on a certain amount of the same type on the performance in the form of a converging or converging-annular diffuser channels. Set theoretical dependence to determine the effect of physical-mechanical properties of bulk materials, the constructive and kinematic parameters of the mill to the pressure between two surfaces when they are in grinding mode of hydrodynamic friction in the connection of two surfaces.

Keywords: friction, hydrodynamic friction, the grinding pressure of the material, confusing channel, confuser-diffuser channel, torque, power, efficiency.

References

1. O processe izmel'chenija tvjordyh tel [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://tizm.narod.rumelnizos.htm>. Zagl. s jekrana. (Data obrashhenija: 15.10.2015).
2. Mel'nicy KM: klinovye mel'nicy novogo pokolenija [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: v-mill.ru. Zagl. s jekrana. (Data obrashhenija: 10.11.2015).
3. Sedov L.I. *Mehanika sploshnoj sredy*. M.: Nauka. 1983. T. 1. 528 s.
4. Pat. 84348 UA, MPK V02S 2100. Mlin Remarchuk M.P., Koval'ova Ja.A.; vlasnik Hark. nac. avtomobil'no-dor. un. № a 201112201; zajav. 18.10.2011; opubl. 25.10.2013, Bjul. № 20.
5. Remarchuk M.P., Koval'ova Ya.A. Hidrodinamichne podribnennya materialiv v kil'tsevykh konfuzorno-dyfuzornykh zazorakh. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*. 2011. № 4(34). S. 15–19.
6. Remarchuk N.P., Kovaleva Ja.A. Metodika jeksperimental'nyh issledovanij processa izmel'chenija materialov v mel'nice s konfuzornymi i konfuzorno-dyfuzornymi kol'cevymi kanalami. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka*. Kharkiv: KhNTUS·H im. P. Vasylenka. 2012. Vyp. 123. S. 188-195.
7. Lysikov Ye.M., Voronin S.V., Skoryk O.O., Onoprechuk D.V. Nanotekhnolohiyi na zaliznychnomu transporti: navch. posibnyk. Kharkiv: DISA PLYuS. 2013. 212 s.
8. Voronin S.V., Stefanov V.O. Doslidzhennya trybolohichnykh kharakterystyk smektychnoho sharu hranychnoyi plivky. *Problemy trybolohiyi*. 2014. # 2(72). S. 58–64.