

*О.Г. Приймаков, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,
Ю.О. Градиський, к.т.н., доцент, ХНТУСГ ім. П. Василенка*

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОКІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
КУЛЬКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ
ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ**
(представлено д-ром техн. наук Комяк В.М.)

В статті дається опис удосконаленої конструкції кульового млина, що включає в себе напрямну-знімальник куль. Для цієї конструкції визначено енергокінематичні параметри: кутова швидкість обертання кульки та її лінійна швидкість у верхній точці траєкторії при виготовленні дрібнодисперсних вогнегасних порошків.

Ключові слова: вогнегасний порошок, кульковий млин, критична кутова швидкість, дрібнодисперсність.

Постановка проблеми. Згідно Концепції та Програми науково-забезпечення діяльності Державної служби з надзвичайних ситуацій при МО України від 2012 року одним з основних напрямків та завдань наукового забезпечення діяльності служби є розроблення комплексу технологічних робіт, спрямованих на подальший розвиток технічних засобів у сфері пожежної безпеки.

ДСТУ 3105-95 “Порошки вогнегасні. Загальні технічні вимоги і методи випробувань” регламентує для пожежної безпеки використання широкого спектру вогнегасних порошків загального та спеціального призначення: АВС-50, П-2АПМ, “Фактор АВС-40”, ПВ-1С, “Векон-АВС”, та інші [1, 2]. Всі ці порошки сертифіковані в системі УкрСЕПРО, а основною вимогою цієї системи є забезпечення дрібно дисперсності в процесі виготовлення на кулькових чи трубних млинах. На сьогоднішній день немає обґрунтованої інженерної методики щодо режимів помелу вихідного подрібненого матеріалу (клінкеру), енергокінематичних параметрів помелу і т. ін.

Тим часом щорічно подрібненню клінкера для отримання вогнегасних порошків піддається сотні тон сировини, при цьому енергія, що витрачається безпосередньо на помел, становить не більше 1 % від тієї, що витрачається, а решта витрачається у вигляді тепла, звуку і т.д. Ось чому будь-який процес в цій ще дуже емпіричній області може бути джерелом значної економії [2, 4].

Автори статті розробили [3] удосконалену конструкцію кульового млина для отримання дрібнодисперсних вогнегасних порошків, що включає в себе напрямну-знімальник кульок, тому потреба в науково-практичному обґрунтуванні режиму і кінематики помелу стала ще більш нагальною, а значить, актуальною та практично доцільною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З аналізу літературних джерел [1-4] відомо наступне.

Класична теорія помелу матеріалу в кульових млинах визначає декілька режимів руху завантаження в барабані в процесі помелу [4-6]:

1) Водоспадний режим – частка підіймається на певну висоту і падає по параболі. Руйнівною, в даному випадку, є сила удару при падінні. Було підраховано, що частка буде мати найбільшу кінетичну енергію, якщо кут γ (відриву від поверхні барабана) буде дорівнювати 54° .

2) Каскадний (барботаажний) режим - частинки завантаження не підіймаються високо, а обертаються, перекочуючись. В даному випадку, руйнівною є сила тертя між частками, та $\gamma = 43^\circ$. На думку авторів, для надтонкого помелу найбільш раціонально використовувати інтенсивний барботаажний режим.

3) Перехідний (змішаний) режим - деяка частина завантаження рухається у водоспадному режимі, деяка - в каскадному.

Встановлено, що при помелі показник рівномірності зернового складу зростає, зі збільшенням числа ударів куль і зменшується зі збільшенням енергії одиничного удару [2, 4].

Також встановлено, що з 1 000 ударів, що здійснюються кулями тільки один приходить на помел, а інші – холості [5].

Основним параметром, що визначає режим роботи млина, і, тим самим, якість помелу матеріалу, є оптимальна кутова (робоча) швидкість (w) або частота (n) обертання барабана млина, яка залежить від критичної частоти обертання ($n_{\text{ОПТ}} \sim n_{\text{КР}}$) [5, 6].

Постановка завдання та його вирішення. Отже, метою даної роботи є визначення енергокінематичних параметрів помелу дрібно-дисперсних вогнегасних порошків в удосконалених конструкційно кулькових млинах (в каскадному режимі). Для досягнення мети роботи слід розв'язати наступні задачі:

- створити та описати фізичну модель кулькового млина з напрямною (знімальником куль);
- визначити кутову та лінійну швидкості обертання барабана та власне кульки в каскадному режимі;
- перевірити отримані залежності експериментально.

Теоретично відомо, що критична частота обертання досягається тоді, коли частка «налипає» на внутрішню поверхню барабана і обертається разом з ним [5]. Це трапляється, коли сила тяжіння G частки врівноважується відцентровою силою $F_{\text{ВІДЦ}}$ ($G \leq F_{\text{ВІДЦ}}$). З цього рівняння визначаємо теоретичну критичну частоту обертання

$$\begin{aligned} \frac{m v^2}{R} &\geq m g, \\ v &= 2 \pi R n, \\ \frac{4 m \pi^2 R^2 n^2}{R} &\geq m g, \\ n_{\text{КР.ТЕОР}} &= \frac{0,5}{\sqrt{R}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де m – маса частки, що обертається, кг; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; v – лінійна швидкість обертання барабана млина, m/c ; R – радіус внутрішньої поверхні барабана, m .

Але це рівняння не враховує силу тертя частки, що підіймається, об поверхню барабана, хоча ця сила є значною складовою в рівнянні руху частки. Як показують експерименти [5, 6], практична критична частота обертання значно перевищує теоретично розраховану (приблизно в 2 рази).

Робоча частота обертання визначається за умови отримання найбільшої енергії удару частки при падінні і складає близько 70% від критичної.

Розділимо умовно переріз кульового млина, в якому триває помел матеріалу на зони (рис. 1).

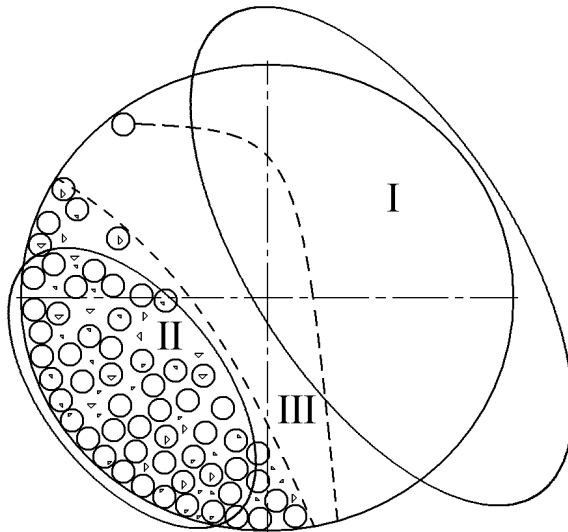


Рис. 1 – Зони простору помелу матеріалу в кульовому млині

Зона I - найбільша зона в барабані, не приймає участі в помелі матеріалу. Через неї пролягає параболічна траєкторія падіння кульки після відриву від поверхні барабана. Час проходження кульки цієї траєкторії приблизно дорівнює часу руху кульки по коловій траєкторії, під час якого триває процес помелу шляхом тертя.

Зона II - зона найбільшої концентрації завантаження в барабані в процесі помелу.

Зона III - зона падіння кульки, в якій триває процес подрібнення ударом. Але в цій зоні дуже мала концентрація матеріалу, що стає однією з причин неефективності помелу.

Така фізична модель кульового млина.

Логічно було би спрямувати удар кульки в зону II, де знаходиться більше всього матеріалу, і скоротити траєкторію падіння кульки для більш раціонального використання часу, протягом якого матеріал знаходиться в млині.

Пропонується застосування внутрішньомлинового пристрою, що

являє собою напрямну-знімальник куль, що спрямовує кулі в зону II і до того ж являє собою додаткову поверхню тертя, на якій процес помелу тертям більш інтенсивний за рахунок нерухомості поверхні (рис. 2).

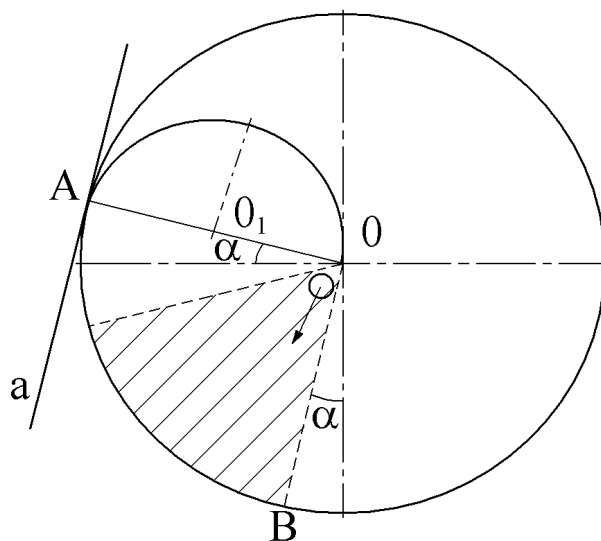


Рис. 2 – Геометрична схема розташування напрямної

Так як під час обертання барабану напрямна буде нерухомою, то її треба закріплювати на осі обертання барабану, тобто вона буде проходити через точку O . Щоб під час переходу кулі від поверхні барабану на траєкторію напрямної уникнути удару, який несе за собою втрату енергії та знос напрямної, треба забезпечити деякі умови. Приймемо, що в перетині напрямна має форму дуги кола. Тоді в точці переходу A коло внутрішньої поверхні барабану і поверхні напрямної повинні мати одну дотичну a . Звідси виходить, що центр кола напрямної O_1 лежить на радіусі кола внутрішньої поверхні барабану OA ($OA \perp a$). Також $O_1A = OA/2$, що забезпечує прохід дуги через точки A і O . Треба знайти положення точки A . Швидкість кульки в точці O спрямована по дотичній колу напрямної в цій точці. На рис. 2 заштриховано зону раціонального спрямування кульки. Тобто мінімальний кут нахилу вектора швидкості кульки від вертикалі відповідає напрямку радіус-вектора OB . Для забезпечення цих умов треба, щоб дотична a була паралельна OB ($OA \perp OB$). Кут α дорівнює $15-20^\circ$ [3].

Основним параметром, що визначає режим роботи млина є робоча частота обертання барабану (або кутова швидкість). Конструкція зі знімальником куль дозволяє працювати в закритичних режимах. Тобто стоїть задача визначити швидкість обертання барабану, при якій кулька, що злітає з напрямної, буде мати достатню швидкість, щоб розбити частинки клінкеру.

Розглянемо момент переходу кульки з внутрішньої поверхні барабану до напрямної в точці A .

$$v_A = \omega_0 R = \omega_A r, \quad (2)$$

де v_A - лінійна швидкість в точці А, м/с; ω_0 - кутова швидкість обертання барабана, рад/с; R - радіус внутрішньої поверхні барабана, м; ω_A - кутова швидкість кульки на траєкторії напрямної, рад/с; r - радіус дуги напрямної, м.

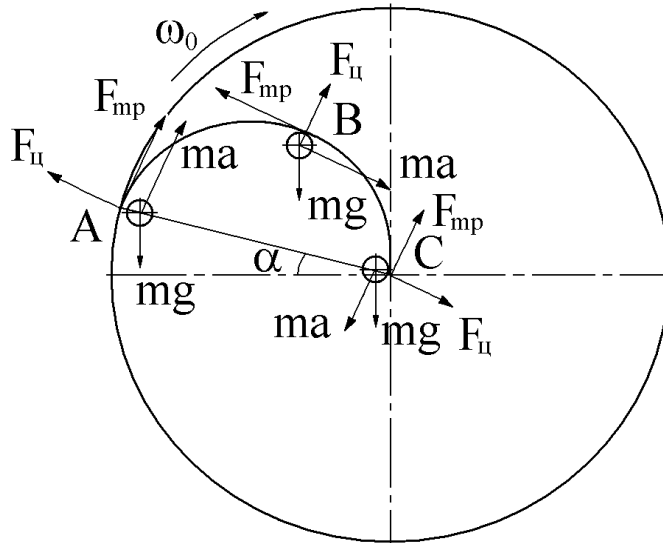


Рис. 3 – Розрахункова схема напрямної кулькового млина

З формули (2) знаходимо

$$\omega_A = \frac{\omega_0 R}{r} = 2 \omega_0. \quad (3)$$

Складаємо рівняння сил і знаходимо прискорення

$$ma - mg \cos \alpha + F_{мп} = 0, \quad (4)$$

$$F_{мп} = (F_{Ц} - mg \sin \alpha) f = (m \omega_A^2 r - mg \sin \alpha) f. \quad (5)$$

З (4) та (5) маємо

$$\begin{aligned} ma + f m \omega_A^2 r - f mg \sin \alpha - mg \cos \alpha &= 0; \\ a + f \omega_A^2 r - f g \sin \alpha - g \cos \alpha &= 0; \\ a &= g \cos \alpha + f g \sin \alpha - f \omega_A^2 r. \end{aligned} \quad (6)$$

З врахуванням (3) маємо

$$a = g \cos \alpha + f g \sin \alpha - 4 f \omega_0^2 r. \quad (7)$$

Розглянемо момент зльоту кульки з напрямної в точці С:

$$\begin{aligned}
ma + mg \cos \alpha - F_{\text{мп}} &= 0; \\
ma - f m \omega_C^2 r - f mg \sin \alpha + mg \cos \alpha &= 0; \\
a - f \omega_C^2 r - f g \sin \alpha + g \cos \alpha &= 0; \\
a = f \omega_C^2 r - g \cos \alpha + f g \sin \alpha.
\end{aligned} \tag{8}$$

Звідки маємо

$$a = \frac{f v_C^2}{r} + f g \sin \alpha - g \cos \alpha. \tag{9}$$

Щоб знайти ω_0 порівнюємо (7) і (9) за модулем, так як знак прискорення показує тільки напрямок дії сили

$$\begin{aligned}
\left| \frac{f v_C^2}{r} + f g \sin \alpha - g \cos \alpha \right| &= \left| g \cos \alpha + f g \sin \alpha - 4 f \omega_0^2 r \right|, \\
\left| 4 f \omega_0^2 r \right| &= \left| 2 g \cos \alpha - \frac{f v_C^2}{r} \right|, \\
\omega_0^2 &= \left| \frac{2 g \cos \alpha}{4 f r} - \frac{f v_C^2}{4 f r^2} \right|, \\
\omega_0 &= \sqrt{\left| \frac{g \cos \alpha}{f R} - \frac{v_C^2}{R^2} \right|},
\end{aligned} \tag{10}$$

де: f - приведений коефіцієнт тертя ковзання завантаження по внутрішній поверхні барабана, дорівнює близько 0,2; R - радіус внутрішньої поверхні барабана; v_C - необхідна лінійна швидкість кульки для подрібнення матеріалу, м/с.

Треба визначити, яка величина v_C буде достатньою для подрібнення. Щоб розбити частку ударом, необхідно, щоб енергія удару була більша за енергію, необхідну для руйнування частки. Тобто

$$A_{\text{удару}} \geq A_{\text{руйнування}}, \tag{11}$$

$$A_{\text{удару}} = \frac{m_K v_C^2}{2} (1 - \xi), \tag{12}$$

де: m_K - маса кульки, кг; ξ - коефіцієнт відновлення, $\xi = 0,5$.

$$A_{\text{руйнування}} = \frac{\sigma_B^2 V}{2 E}, \tag{13}$$

де σ_B - границя міцності частки, що підлягає помелу, Па; V - об'єм частки, що підлягає помелу, m^3 ; E - модуль Юнга для матеріалу, що підлягає помелу, Па.

З (11) маємо

$$\frac{m_k v_c^2}{2} (1 - \xi) \geq \frac{\sigma_B^2 V}{2E},$$

$$v_c \geq \sigma_B \sqrt{\frac{V}{E m_k (1 - \xi)}}, \quad (14)$$

$$m_k = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \rho = \frac{\pi \rho d_k^3}{6}, \quad (15)$$

де r_k - радіус кульки, м; d_k - діаметр кульки, м; ρ - густина матеріалу кульки, kg/m^3 ; $m_k = 4082 d_k^2$, кг (для металевих кульок).

$$V = \frac{4}{3} \pi r_c^3 = \frac{4}{3} \pi \frac{d_c^3}{8} \approx 0,5 d_c^3, \quad (16)$$

де d_c - діаметр частки матеріалу, що підлягає помелу, м.

З урахуванням (15) та (16) маємо

$$v_c \geq \frac{\sigma}{64} \sqrt{\frac{d_c^3}{E d_k^3}}. \quad (17)$$

Підставляємо (17) в (10) маємо формулу для визначення робочої кутової швидкості обертання барабану

$$\omega_0 = \sqrt{\left| \frac{g \cos \alpha}{f R} - \frac{\sigma^2 d_c^3}{4096 R^2 E d_k^3} \right|}. \quad (18)$$

Ця формула якісно відрізняється від прийнятих формул розрахунку режиму роботи кульового млина тим, що враховує не тільки геометрію барабану (R), а і характеристики завантаження: і мелючих тіл (розміри та матеріал), і матеріалу, що підлягає помелу (розмір максимальної фракції матеріалу, що завантажується в барабан, та його фізико-механічні властивості).

Для другої камери пропонуємо розрахувати критичну швидкість з урахуванням сили тертя.

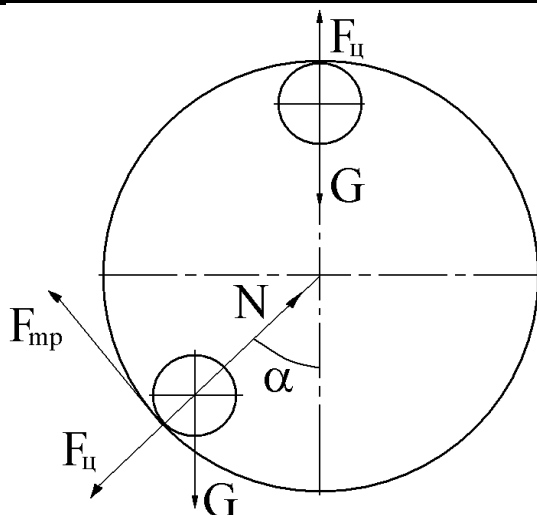


Рис. 4 – Розрахункова схема другої камери кульового млина

Спрямуємо вісь вздовж дії сили тертя

$$F_{мп} = m g \sin \alpha, \quad (19)$$

$$(F_{ц} + G \cos \alpha) f = m g \sin \alpha, \quad (20)$$

$$f F_{ц} + G f \cos \alpha = m g \sin \alpha, \quad (21)$$

$$F_{ц} = \left| \frac{m g \sin \alpha - G f \cos \alpha}{f} \right|. \quad (22)$$

Відцентрову силу беремо за модулем, так як її знак говорить нам лише про її напрямок, а для подальших розрахунків нам важливе її значення

$$m \omega^2 R = \left| \frac{m g \sin \alpha - m g f \cos \alpha}{f} \right|. \quad (23)$$

Звідки знаходимо

$$\omega = \sqrt{\left| \frac{g(\sin \alpha - f \cos \alpha)}{R f} \right|}. \quad (24)$$

Коли кулька знаходиться у верхній точці, $\alpha = \pi$, тоді $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$.

Функція $\omega = f(\alpha)$ досягає максимуму, коли вираз $(\sin \alpha - f \cos \alpha)$ має максимальне значення. Продиференціювавши цей вираз, знайдемо, що він має максимальне значення при $\alpha = \arctg\left(-\frac{1}{f}\right)$.

$$-\frac{1}{f} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}. \quad (25)$$

Звідси

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{1}{1+f^2}}. \quad (26)$$

Знайдемо перехідний коефіцієнт

$$k = \frac{\omega_{\max}}{\omega} = \sqrt{\frac{\sqrt{1+f^2}}{f}}. \quad (27)$$

Наприклад, при $f = 0,3$, $k = 1,84$.

Тобто максимальне значення критичної кутової швидкості – дорівнює:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{g\sqrt{1+f^2}}{Rf}}, \quad (28)$$

при значеннях $f = 0,3 \dots 0,4$ в $1,5 \dots 1,8$ рази перевищує значення кутової швидкості ω , необхідної для утримання кульки в верхній точці.

Отже, в модифікованій авторами конструкції кулькового млина раціональна кутова швидкість обертання барабана знаходиться в діапазоні від ω_0 (формула (18)) до ω_{\max} (формула (28)).

З метою експериментальної перевірки розрахункових залежностей (17), (18), (28) та апробації новоствореної конструкції кулькового млина для помелу вогнегасних порошоків з участю авторів на кафедрі механізації будівельних процесів ХНУБА (м. Харків) побудовано експериментальний кульовий двокамерний млин з прямою-знімачем куль. Експлуатація цього млина з використанням широкого спектру матеріалів клінкеру довела, що частота обертання барабана може бути збільшена в $1,5 \dots 1,8$ разів, при цьому забезпечується каскадний режим роботи млина, що підтверджено сповільненою кінозйомкою. В цілому, продуктивність нового млина виросла на $24 \dots 29$ % при тих же енергозатратах. Отримані формули (17), (18), (28) можна рекомендувати для інженерних розрахунків принаймні кульових двокамерних млинів з прямою-знімачем куль для виготовлення вогнегасних порошоків.

Висновки:

- створено і описано фізичну модель кулькового млина з прямою-знімачем куль;

- конструкція кульових двокамерних млинів з прямою-знімачем куль є раціональною, працездатною і дозволяє збільшити критичну кутову швидкість обертання барабана, підвищити продуктив-

вність помелу на 24...29 % при тих же енергозатратах, тим самим забезпечити дрібно дисперсність отриманих вогнегасних порошків:

- така конструкція забезпечує каскадний режим помелу, збільшення частоти обертання барабана в 1,5...1,8 рази, енергокінематичні параметри помелу можна знайти по залежностях (17), (18), (28).

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 3105-95 “Порошки вогнегасні. Загальні технічні вимоги і методи випробувань”. – К.: Вид. стандартів, 1995. – 37 с.

2. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. – М.: Стройиздат, 1982. – 72 с.

3. Ємельяненко М.Г., Приймаков О.Г., Кузнецова М.М. Млин для подрібнення клінкеру / Позитивне рішення № 17885/ЗА/11 від 13.07.2012 р. ДП “Український інститут промислової власності” за заявкою на винахід № 2011 02901.

4. Безбородько М.Д., Алексеев П.П., Иванов А.Ф. и др. Пожарно-техническое вооружение. – М.: Стройиздат, 1981. – 376 с.

5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Наука, 1989. – 931 с.

6. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Витривалість конструкційних матеріалів при абразивному зношуванні. - Харків: Оберіг, 2009. - 383 с.
nuczu.edu.ua

А.Г. Приймаков, Ю.А. Градыский

Определение энергокинематических параметров шариковых мельниц для изготовления огнетушащих порошков

В статье дано описание усовершенствованной конструкции шариковой мельницы, которая включает в себя направляющую-съёмник шариков. Для этой конструкции определено энергокинематические параметры: угловая скорость вращения шарика и его линейная скорость в верхней точке траектории при изготовлении мелкодисперсных огнетушащих порошков.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, шариковая мельница, критическая угловая скорость, мелкодисперсность.

A.G. Priymakov, Y.A. Gradysky

Defining parameters energokinematicheskogo ball mills for the manufacture of fire-extinguishing powder

The article describes the advanced design ball mill, which includes direct-puller balls. For this design energokinematicheskogo defined parameters: the angular velocity of the ball and the line speed at the top of the trajectory, extinguishing the manufacture of fine powders.

Keywords: dry chemical, ball mill, a critical angular velocity, fine.