

УДК 621.926.5

Іванов А.М., Чудний О.Ю.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПНЕВМОПОДАЧІ КРУПКИ ПІСЛЯ СЕПАРАТОРУ У ТРУБНІ МЛИНИ

Відомо, що завдяки ряду переваг замкнутий цикл роботи трубних млинів у всіх країнах знаходить все більше розповсюдження ніж відкритий цикл [1,2]. У роботах [3,4] показана доцільність подачі крупки після сепаратора в кульову камеру на те місце, де відповідно до діаграми помелу перебуває максимальна кількість часток матеріалу такого ж середнього розміру, як і крупка із сепаратора.

Простіше всього це зробити за допомогою пневмоподачі крупки, а не за рахунок подачі її через вікна в корпусі й складну систему ущільнень у місці подачі крупки, як це робили раніше в сепараторних млинах старих конструкцій [5].

Однак реалізація цього способу представляє певні труднощі. Проблема в тому, що подача крупки на задані ділянки кульової камери реально можлива тільки через вільний простір S , обмежений між параболою AM траєкторії руху завантаження у водоспадному режимі й корпусом млина (рисунок 1), причому точка відриву A (початок параболи) залежить від кута відриву α . Але при існуючих кутах відриву α на початку барабана млина контур завантаження, обмежений параболою AM , перекриває повністю або частково поперечний переріз транспортуючого матеріал трубошнека радіусом r , що робить іноді неможливою подачу крупки при горизонтальному й паралельному осі труби пневмотранспорту, крім як відповідних вигинів труби, що не раціонально, оскільки різко збільшує гідравлічний опір i , відповідно, енергоємність пневмотранспортування крупки.

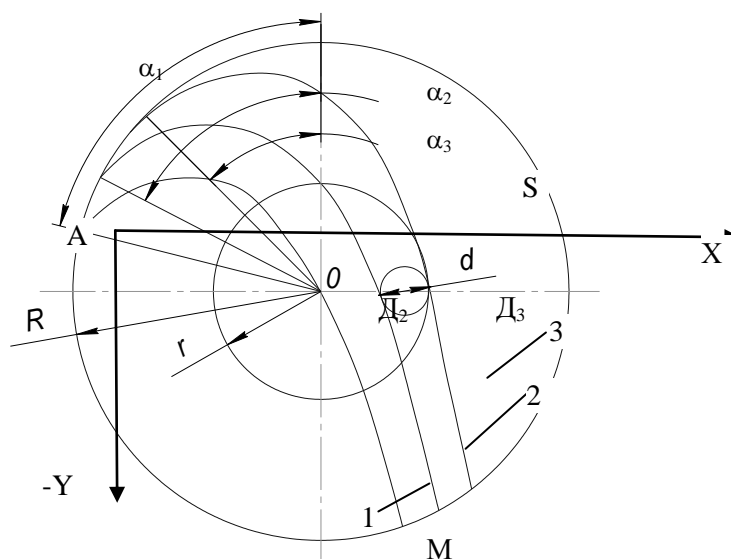


Рисунок 1 – Схема роботи куль у водоспадному режимі

Метою даної роботи є розробка способу подачі крупки на задані ділянки кульової камери з мінімальними втратами енергії на пневмоподачу крупки.

Ця мета досягається шляхом призначення раціональних параметрів і режимів роботи завантаження й пневмофорсунки, а також за рахунок конструктивних особливостей завантажувальної частини млина.

Завдання полягає в:

1. Визначенні максимального значення кута відриву, при якому можливо горизонтальне ексцентричне розміщення труби пневмоподачі крупки для подачі її на задану відстань у кульовій камері;

2. Визначенні максимального кута відриву, при якому ще можлива пневмоподача за рахунок зміни кута нахилу струменя вильоту крупки із сопла пневмофорсунки відповідно до законів балістики.

Тому що завантаження падає в поперечному перерізі млина по параболі, а крупка летить у поздовжньому перетині на задану відстань також по параболі, то для реалізації польоту крупки у вільному від завантаження просторі необхідно, щоб траєкторія руху крупки проходила над траєкторією падіння завантаження, тобто парабола крупки обгинула параболу завантаження. Для реалізації цієї умови виконаємо наступні розрахунки для парабол падіння завантаження (обумовлених кутом його відриву) при різних режимах його роботи (також обумовлених кутом відриву). Побудуємо параболи падіння завантаження для різних типорозмірів млинів різного радіуса R при фактичних кутах їхнього відриву α , для чого використаємо паспортні значення частоти обертання n . Як відомо

$$\cos \alpha = \frac{\omega^2 R}{g} = \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{R}{g}, \text{ звідки } \alpha = \arccos \cdot R \cdot 10^{-3} \cdot n^2. \quad (1)$$

Підставляючи фактичні паспортні значення n для млинів різних R знаходимо теоретичні значення кута відриву α і зносимо їх у таблицю 1.

Таблиця 1 – Координати характерних точок параболи

$R, \text{ м}$	$n, \text{ об/хв}$	α°	X_d	r	X_{dz}
0.5	32	59	0.4	0.13	0.53
1	21	63	0.8	0.25	1.05
1.5	18.5	59	1.2	0.35	1.55
2	16.1	59	1.68	0.5	2.1

По наведеним у таблиці 1 значенням α можна побудувати параболу. Якщо початок координат сполучити із точкою відриву A , то рівняння параболи запишеться так:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{x^2}{2R \cos^2 \alpha}. \quad (2)$$

Як видно з таблиці 1 для 3-х типорозмірів млина кут відриву α однаковий. Теоретично цей кут повинний бути однаковий для будь-яких типорозмірів млинів, тому що значення $\cos \alpha$ представляє критерій Фруда – критерій подоби режиму роботи завантаження з (1). Тому що формула (1) не враховує коефіцієнт зчеплення з футерівкою, а на практиці в початку млина ставлять футерівку з високим коефіцієнтом зчеплення, то фактичний кут відриву може досягати 35–40°, тоді як теоретичний оптимальний кут відриву без врахування коефіцієнта зчеплення дорівнює 54°40'.

Тепер розглянемо взаємозв'язок траєкторії падіння завантаження й окружності трубошнека, у якому повинний бути розташований пневмопровід транспортування крупки. Для цього розглянемо положення абсциси контрольної точки X_D , рівної [6]:

$$X_D = R \cos^2 \alpha \left(\sin \alpha + \sqrt{3 - \cos \alpha} \right). \quad (3)$$

Обчислимо значення X_D для млинів різних типорозмірів при $\alpha = 54^\circ$ і результати занесемо в таблицю 1. Горизонтальна ексцентрична установка труби пневмоподачі крупки можлива якщо $X_{D3} - X_{D2} = d$, де X_{D3} абсциса точки перетинання окружності шнека в „світу” і d діаметр труби пневмоподачі.

Для аналізу можливості пневмоподачі крупки на задані ділянки кульової камери за допомогою горизонтальної, ексцентрично розташованої труби, знайдемо кути відриву для координат наступних характерних точок X_D .

1. Парабола проходить через центральну вісь трубошнека й млина, тобто

$$X_D = R \sin \alpha, \quad (4)$$

або після підстановки X_D із (3) маємо:

$$\cos^2 \alpha \left(\sin \alpha + \sqrt{3 - \cos \alpha} \right) = \sin \alpha. \quad (5)$$

Вирішуючи це рівняння чисельним методом знаходимо $\alpha = 54^\circ$, тобто при теоретичному розрахунковому куті відриву, при якому кулі забезпечується в точці падіння її M найбільша енергія, парабола 1 проходить через центр окружності шнека й млинів будь-якого радіуса. У такому випадку, як видно з рисунку 1, у трубошнеку досить місця для розміщення горизонтального пневмопровода крупки.

2. Парабола 2 проходить через точку перетинання окружності трубошнека з віссю x , тобто в крапці D_3 (рисунк.1), коли контур падаючого завантаження повністю перекриває перетин трубошнека й розміщення горизонтально та ексцентрично труби неможливо.

З рисунку 1 видно, що ця умова виконується при

$$X_{D3} = R \sin \alpha_3 + r; \quad (6)$$

після підстановки X_D і спрощень маємо

$$\cos^2 \alpha_3 \left(\sin \alpha_3 + \sqrt{3 - \cos \alpha_3} \right) = \sin \alpha_3 + \frac{r}{R}. \quad (7)$$

Вирішуючи це рівняння чисельним методом, визначаємо α_3 для різних типорозмірів млинів і результати заносимо в таблицю 2.

З таблиці 2 видно, що середнє значення кута α_3 становить $48,6^\circ$. Всі кути, які рівні або менше цього значення, будуть повністю перекривати поперечний переріз трубошнека. Однак варто мати на увазі, що ці дані отримані для радіуса барабана R і що до барабана примикає конічна завантажувальна кришка, завдяки чому радіус зменшується до радіуса шнека r . У зв'язку із цим при постійній кутувій швидкості кут відриву заван-

таження буде збільшуватися, що буде збільшувати й вільний простір млина. Докладніше цей взаємозв'язок розглянутий далі.

Таблиця 2 – Значення кутів відриву α_3 для млинів різних типорозмірів

R, м	2	1.5	1	0.5
r, м	0.5	0.35	0.25	0.13
r/R	0.25	0.23	0.25	0.26
α_3	48.5	49	48.5	48.3

3. Визначимо кут відриву α_2 , при якому в поперечному перерізі трубошнека можна ексцентрично розмістити горизонтальну трубу пневмоподачі крупки в кульовий млин.

З рисунку 1 видно, що

$$X_{D2} = R \sin \alpha_2 + r - d \quad (8)$$

Підставляючи значення X_D із (3) одержуємо:

$$\cos^2 \alpha_2 \left(\sin \alpha_2 + \sqrt{3 - \cos \alpha_2} \right) - \sin \alpha_2 = \frac{r - d}{R} \quad (9)$$

Вирішуючи це рівняння чисельним методом, знаходимо значення α_2 для млинів різних типорозмірів при відповідних значеннях d , величину якого можна визначити по відомих методиках [5,7,8]. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення кутів відриву α_2 для млинів різних типорозмірів

R, м	2	1.5	1	0.5
r, м	0.5	0.35	0.25	0.13
d, м	0,13	0,09	0,06	0,03
(r-d)/R	0.185	0.17	0.19	0.2
α_2	50	50,4	49,9	49,7

З таблиці 3 видно, що середнє значення кута відриву завантаження, при якому можна розмістити в трубошнеку трубу пневмоподачі крупки, становить 50° .

Порівнюючи значення α_2 та α_3 бачимо, що збільшення кута відриву на $1,4^\circ$ дає можливість установити в трубошнеку трубу пневмоподачі крупки. З огляду на вищеотримане значення $\alpha = 54^\circ$ установлюємо, що для ексцентричного горизонтального розміщення труби із крупкою кут відриву повинен лежати в діапазоні $50-54^\circ$.

Тому що завдяки застосуванню футерівки корпуса млина з високим коефіцієнтом зчеплення й збільшенню ступеня заповнення, кут відриву в промислових млинах може досягати $35-40^\circ$, при якому „живий” перетин трубошнека явно із запасом перекривається контуром падаючого по параболі завантаження з тіл, що мелють, і матеріалу, що подрібнюється, то потрібно визначити максимальне граничне значення кута відриву, при якому ще можна реалізувати пневмоподачу крупки за рахунок зміни кута нахилу струменя вильоту крупки із сопла пневмофорсунки з урахуванням геометричних па-

раметрів кульової камери. Для цього спочатку треба визначити залежність кута відриву від кута конуса завантажувальної кришки, а потім визначити поздовжній кут нахилу сопла, з якого парабола польоту крупки в поздовжньому перетині млина пройде вище параболи падіння завантаження.

У такій послідовності й розглянемо ці питання.

З рисунку 2 видно, що кут конуса завантажувальної кришки β_k дорівнює

$$\beta_k = \arctg \frac{R - r}{L_\epsilon}, \quad (10)$$

де L_ϵ – довжина завантажувальної кришки.

Відповідно, кут нахилу труби пневмоподачі крупки β_c (він же є й кутом вильоту крупки із сопла), зневажаючи різницею розмірів в еліпсі зрізу сопла й діаметра d дорівнює:

$$\beta_c = \arctg \frac{r - d}{L_\phi}, \quad (11)$$

де L_ϕ – довжина трубошнека; d – діаметр труби пневмоподачі крупки.

Величину β_k можна знайти й безпосередньо з робочих креслень кришок для млинів різних типорозмірів. Розрахунки й безпосередні виміри на кресленнях дають середнє значення $\beta_k \approx 73^\circ$.

Величину β_c також можна безпосередньо знайти з робочих креслень або по (11). Для млинів з радіусом барабана від 0 до 2 м значення $\beta_c = 25 \div 29^\circ$.

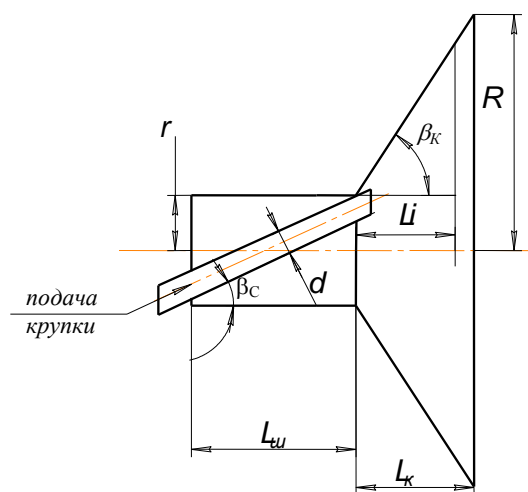


Рисунок 2 – Завантажувальна кришка із пневмотрубопроводом

З метою підвищення гарантії влучення крупки у вільний простір кульової камери й досягнення заданої ділянки на відстані L від зрізу сопла (обумовлений з діаграми помелу згідно з нашою методикою [3,4]) трубу пневмотранспорту крупки розвертаємо ще й у горизонтальній площині убік параболи на кут β_r від осі обертання млина. Трасекторію польоту крупки, що представляє собою параболу, можна описати існуючими в балістиці залежностями [9]. З метою спрощення опором повітря (як і у випадку параболи падіння завантаження в поперечному перерізі) зневажаємо, що не відіб'ється на взаємному розташуванні розглянутих парабол.

Завантажувальна кришка уздовж осі млина має поточний радіус, що змінюється від r (радіуса трубошнека в „світу”) до радіуса барабана млина R (рисунок 2). Тому що кутова частота обертання трубошнека й барабана млина однакова, то кут відриву завантаження (тобто й парабола падіння їх по довжині завантажувальної кришки) буде різним і рівним:

$$\text{для трубошнека: } \alpha_{\phi} = \arccos \frac{\omega^2 r}{g}; \text{ для барабана: } \alpha_A = \arccos \frac{\omega^2 R}{g}.$$

Тоді кут α_i відриву завантаження для будь-якого потокового радіуса R_i конуса завантажувальної кришки дорівнює:

$$\alpha_i = \arccos \frac{\omega^2 R_i}{g}. \tag{12}$$

Тому що кутова швидкість будь-якої точки по довжині конуса кришки однакова, то по рівнянню (12) бачимо, що значення $\cos \alpha_i$ пропорційно зміні радіуса R_i (від радіуса корпусу млина R до радіуса шнека r): зменшення R_i збільшує кут відриву α_i , що зміщує параболу падіння завантаження до центра окружності барабана млина, збільшуючи тим самим вільний простір для польоту крупки.

На рисунку 3 представлено залежність кута відриву α_i від зміни потокового радіуса R_i уздовж конічної завантажувальної кришки при постійній кутовій швидкості ω (побудована по рівнянню $\cos \alpha = \frac{\omega^2 R}{g}$ для млинів різних типорозмірів).

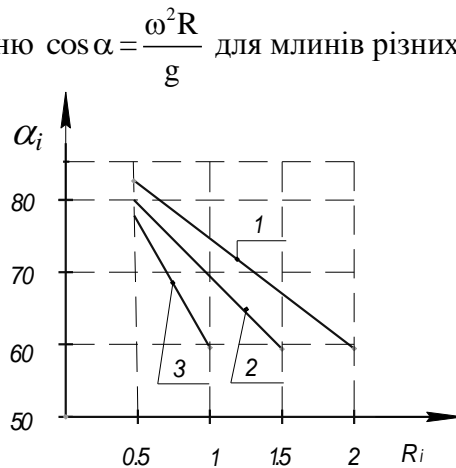


Рисунок 3 – Залежність кута відриву від радіуса при $\omega = \text{const}$ для млинів:
1 – 4x13,5 м; 2 – 3,2x15 м; 3 – 2,2x10,5 м

З рисунку 2 видно, що $l_i = R_i \cdot \text{ctg} \beta_e$, звідки можна, використовуючи α_i з рисунку 3, знайти кут відриву для будь-якої ділянки по довжині L_e .

Залишилося розглянути 3-є завдання – умови огибання параболою польоту часток крупки параболи падіння завантаження.

Рівняння польоту крупки, що вилітає із сопла зі швидкістю V_0 під кутом β_c при початку координат у точці вильоту, має такий вид:

$$y = x \operatorname{tg} \beta_c - \frac{g x^2}{2 V_0^2 \cos^2 \beta_c}. \quad (13)$$

Треба визначити при якому значенні V_0 й куті β_c значення y не перевищить відстань від зрізу сопла до футеровки барабана млина при польоті крупки на задану відстань x , яку знаходимо по діаграмі помелу, де перебуває максимальна кількість подрібнюємого матеріалу такого ж розміру, що й подавана крупка.

Якщо прийняти в рівнянні (13), що найбільша висота польоту приходить на середину дальності польоту, то маємо:

$$H = \frac{V_0^2}{g} \sin^2 \alpha; \quad (14)$$

$$x = \frac{1}{2} X = \frac{V_0^2}{g} \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \quad (15)$$

де X – горизонтальна дальність польоту, обумовлена з (13) при $y = 0$.

Наприклад, приймаючи для млина $4 \times 13,5$ м величину $H = 1,4$ м, визначаємо значення V_0 при $\alpha = 25^\circ$, після підстановки знаходимо $V_0 = 8,8$ м/с.

Визначаємо дальність польоту крупки для цих умов: $X = \frac{V_0^2}{g} \sin 2\alpha = 5,9$ м.

Як бачимо, така швидкість і кут дають завищену дальність польоту, яка звичайно для млинів $4 \times 13,5$ м повинна лежати в діапазоні від 3 до 5 м. Допустимо з діаграми помелу $X = 4$ м, тоді змінюючи V_0 й α (окремо або одночасно) домагаємося заданих значень X і H . У нашій випадку можна прийняти $V_0 = 10$ м/с і $\alpha = 12^\circ$, або $V_0 = 8,8$ м/с і $\alpha = 16^\circ$.

Виходячи з менших витрат енергії на транспортування крупки до сопла, бажано призначати мінімальну швидкість суміші, але тоді збільшується діаметр трубопроводу. Збільшення дальності польоту при мінімальній швидкості вильоту можна регулювати за рахунок кута вильоту крупки від 0 до 30° .

Отже, задаючись необхідними H і X з (14) і (15) знаходимо оптимальне сполучення V_0 та β_c , причому V_0 легко змінювати за рахунок поперечного перерізу сопла.

Визначимо значення $y_{\bar{A}}$ по (16) коли X рівняється довжині конічної завантажувальної кришки L_k (рисунок 2), тобто до початкової площини параболи падіння завантаження.

$$y_{\bar{A}} = L_k \operatorname{tg} \beta_c - \frac{g L_k^2}{2 V_0^2 \cos^2 \beta_c}. \quad (16)$$

Приймаючи, наприклад, для млина $4 \times 13,5$ м, $L_k = 0,43$ м, $V_0 = 10$ м/с та $\beta_N = 12^\circ$ згідно (16) одержуємо $y_{\bar{A}} = 0,08$ м. От таке перевищення можна одержати над рівнем розташування сопла в поздовжньому перетині завантажувальної частини для зазначених початкових умов. Завдяки куту нахилу сопла під кутом β_N (який у даному випадку можна збільшити до 25°) одержуємо додаткову щілину між контуром завантаження млина та параболою подачі крупки.

Висновки

У результаті проведеного аналізу розглянуті кути відриву кульового завантаження, при яких парабола траєкторії падіння куль перетинає горизонтальний діаметр барабана млина в точках, що дозволяють розмістити в трубошнеку завантажувальної кришки трубу для пневмоподачі крупки після сепаратора з метою польоту крупки на задані ділянки кульової камери млина.

Показано, що завдяки конусності завантажувальної кришки й розміщенню труби пневмоподачі крупки під кутом у межах внутрішніх розмірів трубошнека, є можливість зменшення кута відриву куль, тобто використання чисто водоспадних режимів роботи кульового завантаження, які необхідні для її ефективної роботи на початку млина.

Література

1. Богданов В.С., Пироцкий В.З., Несмеянов Н.П. и др. Механическое оборудование предприятий промышленности стройматериалов. Оборудование для помола материалов.– Белгород.–1998.– 180 с.
2. Дуда В. Цемент. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Способ помола цемента. А.с.1079288 SU,B02C19/00. / А.А.Молодцов, В.А. Чурюмов, К.Ф. Матвиенко, А.Б. Бреслер, В.З. Пироцкий, А.Н. Иванов (СССР).– №3556489/29-33; Заявл. 22.02.83; Опубл.15.03.84, Бюл.№10.– 4 с.
4. Иванов А.Н., Чудный А.Ю. Интенсификация работы трубных мельниц замкнутого цикла. Вестник НТУ “ХПИ”, № 29,. Сб.научн. трудов. Тематический выпуск “Химия, химическая технология и экология” – Харьков 2004г. – С. 104–112.
5. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., Высшая школа.1971.– 282 с.
6. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых, – М: Недра, 1966. – 395 с.
7. Пневмотранспортные установки. Справочник под ред. Аннинского Б.А.-Л.: Машиностроение,1969.– 140 с.
8. Иванов А.Н. К расчету аэродинамики барабанных мельниц // Науковий Вісник, ХГТУСА. – 2002.– №19. С. 136–140.
9. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах // Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – М.: 1985.–559 с.

УДК 621.926.5

Иванов А.Н., Чудный А.Ю.

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПНЕВМОПОДАЧИ
КРУПКИ ПОСЛЕ СЕПАРАТОРА В ТРУБНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ**

Разработаны теоретические основы возможности пневматической подачи крупной фракции после сепаратора в шаровую камеру трубных мельниц и выполнены соответствующие расчёты для трубных мельниц основных типоразмеров.