

Засельський В.Й., Пополов Д.В.

## Дослідження заклинювання частинок матеріалу у отворах вільно укладеної сіячої поверхні вібраційного грохота

Zaselskyi V.Y., Popolov D.V.

### Research on particle jamming in the openings of a freely laid sieving surface of a vibrating screen

*Мета дослідження полягала у вивченні явища заклинювання частинок матеріалу в отворах сіячої поверхні, яка вільно укладена в коробі вібраційного грохоту, і розробці аналітичної залежності для визначення сили заклинювання. Методика базується на аналітичному підході з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалів і кінематичних характеристик системи. Розглядалося заклинювання частинки за рахунок сил сухого тертя та пружної деформації, викликані ударними навантаженнями. Дослідження передбачало теоретичний аналіз і використання чисельного моделювання, які дозволили визначити критичні параметри системи. Результати показали, що заклинювання частинок відбувається при дотриманні певних співвідношень між силою інерції, геометричними параметрами частинок і отворах сіячої поверхні. Встановлено аналітичну залежність, яка дозволяє прогнозувати силу заклинювання з урахуванням густини матеріалу, параметрів деформації та кінематичних характеристик вібраційного грохота. Наукова новизна дослідження полягає у розробці моделі заклинювання частинок з урахуванням їх пружної деформації та утвореної сили тертя, а також в ідентифікації критичних параметрів, що впливають на цей процес. Практична значущість полягає у можливості вдосконалення конструкцій вібраційних грохотів та оптимізації їх робочих параметрів для зниження забивання отворів і підвищення ефективності грохочення металургійної сировини. Отримані результати можуть бути використані для розробки більш ефективних сіячих поверхонь і зменшення енергетичних витрат у металургійному виробництві.*

**Ключові слова:** заклинювання частинок, вібраційний грохот, сіяча поверхня, металургійна шихта, сила тертя, деформація, кінематичні параметри.

*The research aimed to study the phenomenon of particle jamming in the openings of a sieving surface freely mounted in the box of a vibrating screen and to develop an analytical dependence for determining the jamming force. The methodology was based on an analytical approach considering the physico-mechanical properties of materials and the kinematic characteristics of the system. Particle jamming was analyzed as a result of dry friction forces and elastic deformation caused by impact loads. The study included theoretical analysis and numerical modeling, which allowed identifying critical system parameters. The results revealed that particle jamming occurs under specific relationships between inertial force, geometric parameters of particles, and sieving surface openings. An analytical dependence was established to predict the jamming force, accounting for material density, deformation parameters, and the kinematic characteristics of the vibrating screen. The scientific novelty lies in developing a jamming model that considers particle elastic deformation and frictional forces, as well as identifying critical parameters affecting this process. The practical significance lies in the potential improvement of vibrating screen designs and optimization of their operating parameters to reduce opening blockages and enhance the efficiency of metallurgical material sieving. The findings can be applied to the development of more efficient sieving surfaces and the reduction of energy costs in metallurgical production.*

**Key words:** particle jamming, vibrating screen, sieving surface, metallurgical charge, friction force, deformation, kinematic parameters.

#### Вступ

На сьогоднішній день у металургійній промисловості в якості сіячих поверхонь для калібрування металургійної шихти перед плавкою переважно використовуються сталеві листові або колосникові сіячі поверхні, які здатні витримувати високі питомі як силові, так і температурні навантаження. Однак ефективність таких сіячих поверхонь є досить низькою через їхнє забивання важкопрохідними частинками матеріалу.

Останніми роками було запропоновано багато різноманітних схем грохотів для інтенсифікації процесу калібрування металургійної сировини, що дозволило покращити самі процеси грохочення. Проте дослідження, присвячені сіячим поверхням, зокрема тим, що вільно укладаються на короб грохота, залишаються мало вивченими.

У статті наведено результати досліджень

процесу заклинювання частинок матеріалу в отворах вільно укладеної сіячої поверхні на коробі вібраційного грохота. Також окреслено подальші кроки, необхідні для зменшення забивання отворів і підвищення ефективності калібрування металургійної сировини.

#### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сіяча поверхня є основним елементом робочого органу вібраційного грохоту від котрої залежить якість калібрування металургійних шихтових матеріалів. Тривалий час в металургійній галузі використовуються збірні комплекти сит і плоских металевих листів з квадратними, круглими або щілоподібними сіячими отворами [1] і гумових карт, які мають перфоровану робочу поверхню [2, 3]. Але такий різновид використовуваних сіячих поверхонь не забезпечують необхідну ефективність



грохочення металургійної сировини безпосередньо перед її подачею в плавильні агрегати [4]. Головним недоліком таких сіячих поверхонь є велика товщина отворів в яких частинка матеріалу заклинюється та не має змоги повернутись до надрешітного або підрешітного продуктів тим саме захаращують живий перетин сіячої поверхні, знижуючи ефективність грохочення металургійної шихти.

Проблемі забивання та очищення сіячих поверхонь, що застосовуються в гірничо-металургійній галузі, присвячено чимало досліджень [5-7]. Однак більшість із них стосується жорстко закріплених сіячих поверхонь, тоді як питання, пов'язані з вільно укладеними поверхнями, вивчені недостатньо. Наявні роботи лише частково відповідають на сучасні запити щодо їх можливостей та ефективного використання. У монографії [8] розглянуто конструкцію грохота, в якій на сито та матеріал діють імпульсно-ударні навантаження. У роботі визначено оптимальні співвідношення маси сита до маси коробу грохота під час сортування коксу. Зокрема, було встановлено, що в діапазоні значень  $0,5 \dots 1,75$  спостерігається суттєве зменшення забивання коксу фракцією  $0 \dots 3$  мм. Також показано, що використання вільно укладеної сіячої поверхні сприяє підвищенню ефективності грохочення завдяки збільшенню поглинальної здатності сита та інтенсифікації внутрішньошарових процесів. Водночас інші аспекти, пов'язані з використанням вільно укладених сіячих поверхонь, залишаються або зовсім невивченими, або досліджені недостатньо.

#### Мета і завдання досліджень

Метою дослідження був теоретичний аналіз явища заклинювання частинок матеріалу в отворах сіячої поверхні, яка вільно закріплена в коробі грохота, а також розробка аналітичної залежності для

визначення сили заклинювання, яка враховує фізичні властивості матеріалів контактуючих тіл, їхні геометричні параметри, а також кінематичні та динамічні характеристики системи.

#### Матеріали та методи досліджень

Дослідження проводилося аналітичним методом із урахуванням наступних припущень:

- заклинювання частинки в отворі сіячої поверхні відбувається за рахунок сил сухого тертя, які діють в точках контакту поверхні частинки з крайком отвору сіячої поверхні через дію контактного тиску, котрий виникає в наслідок пружної деформації частинки, яка викликана її заглибленням в отвір, під дією сили інерції від руху сіячої поверхні та удару по частинці, що заклинюється, шару матеріалу, який підкидається;
- кінетична енергія шару матеріалу, що падає, повністю переходить в потенціальну енергію деформації частинки [9];
- закон розподілення напружень та деформацій за об'ємом частинки залишається таким же, як при статичній дії сили [9];
- деформація виникає миттєво у всіх перетинах частинки [10];
- у момент зіткнення шару матеріалу з сіячою поверхнею шар взаємодіє з нею як непружне тверде тіло [11];
- матеріал частинки та сіячої поверхні підкоряється закону Гука, а деформації малі [11];
- процес заклинювання приймаємо адитивним, а дію від сил інерції та удару матеріалу визначаємо використовуючи метод суперпозиції.

#### Результати дослідження

Розглянемо процес заклинювання частинки під дією власної сили тяжіння та сили інерції  $J$  від переміщення сіячої поверхні, розрахункова схема котрого наведена на рис. 1.

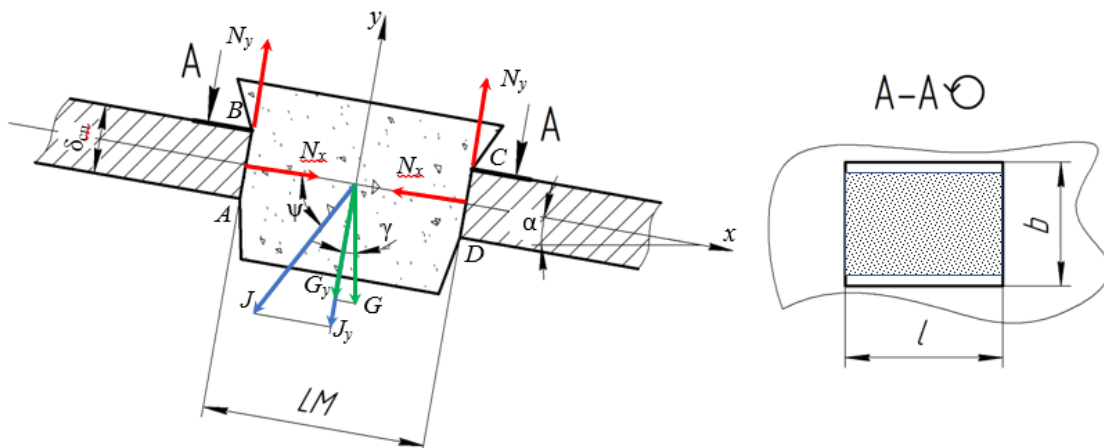


Рисунок 1. Схема сил, що діють на частинку, яка заклинюється

Виділимо об'ємний елемент частинки, що заклинюється, у вигляді прямокутного паралелепіпеда  $ABCD A'B'C'D'$  (див. рис. 2) на ділянці контакту з позвешною отвору сита. На горизонтальній грані

виділеного об'єму діють проекції сил інерції  $J_y$ , сили тяжіння  $G_y$  ( $BB'CC'$ ), а також реакції опори  $N_{1y}$  та  $N_{2y}$  ( $AA'DD'$ ) на вісь  $y$ .

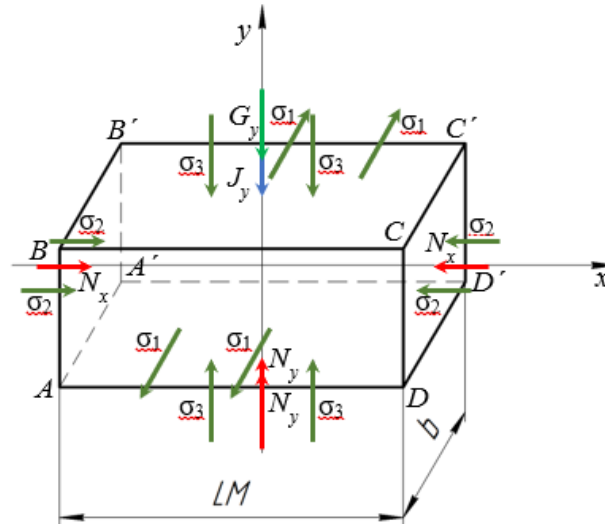


Рисунок 2 – Виділений об'ємний елемент частинки

Проекція реакції опори на вісь  $x$  ( $N_{x1}$ ), виникає в поперечному напрямку ( $ABB'A'$  та  $CC'D'D$ ), є наслідком ефекту Пуассона та утрудненості деформації, тобто, представляє собою вторинний ефект (тиск стінок на частинку), викликаний дією напружень у вертикальному напрямку  $\sigma_3$ . Враховуючи, що виділений елемент знаходиться в об'ємному напруженому стані ведемо для головних напрямків позначення, вказані на рис. 2.

Тоді маємо:

$$\sigma_1 = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_2 = -\frac{N_{x1}}{b \cdot \delta_{сп}}, \quad (2)$$

$$\sigma_3 = -\frac{J_y + G_y}{LM \cdot b}, \quad (3)$$

де  $\delta_{сп}$  – товщина сіячої поверхні;  $LM$  та  $b$  розмір отвору сіячої поверхні.

На підставі узагальненого закону Гука для об'ємного деформованого стану тіла [12] запишемо вираз головного подовження вздовж вісі  $x$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_2 - \mu_n \cdot (\sigma_3 + \sigma_1)], \quad (4)$$

де  $E$  – модуль Юнга матеріалу частинки;  $\mu_n$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу частинки.

Вказані параметри можуть обиратись за [11], де модуль Юнга дорівнює  $0,35 \cdot 10^5$  МПа для коксу та  $0,3 \cdot 10^5$  МПа для агломерату, а коефіцієнт Пуассона 0,21 та 0,26 відповідно.

Оскільки деформація отвору сіячої поверхні зневажливо мала, приймаємо, що його геометричні розміри залишаються постійними:

$$LM = const;$$

$$b = const;$$

тоді

$$\varepsilon_2 = 0. \quad (5)$$

Перетворимо вираз (4) враховуючи (1-3) та (5)

$$\frac{1}{E} \cdot \left[ -\frac{N_{x1}}{b \cdot \delta_{сп}} - \mu_n \cdot \left( -\frac{J_y + G_y}{LM \cdot b} + 0 \right) \right] = 0,$$

$$-\frac{N_{x1}}{E \cdot b \cdot \delta_{сп}} + \frac{\mu_n \cdot (J_y + G_y)}{E \cdot LM \cdot b} = 0. \quad (6)$$

З виразу (6) визначимо значення реакції опори на вісь  $x$

$$N_{x1} = \frac{\mu_n \cdot (J_y + G_y) \cdot E \cdot b \cdot \delta_{сп}}{E \cdot LM \cdot b} =$$

$$= \frac{\mu_n \cdot (J_y + G_y) \cdot \delta_{сп}}{LM} \text{ Н.} \quad (7)$$

Перетворимо вираз

(7) розписав проекції сил та їх значення

$$J_y = m_q \cdot a \cdot \sin \psi; \quad (8)$$

$$G_y = m_q \cdot g \cos \alpha; \quad (9)$$

$$N_{x1} = \frac{\mu_n \cdot \delta_{сп} \cdot m_q \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{LM}, \quad (10)$$

де  $m_q$  – маса частинки;  $a$  – прискорення пересування частинки разом з сіячою поверхнею;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\psi$  – кут вібрації;  $\alpha$  – кут нахилу сіячої поверхні.

Виразимо масу частинки, що заклинює, враховуючи геометричний розмір отвору сіячої поверхні, умову заклинювання [13], коефіцієнт тертя матеріалу о сіячу поверхню.

$$m_q = V_{об.ч} \cdot \rho, \quad (11)$$

де  $V_{об.ч}$  – об'єм частинки,  $m^3$ ;  $\rho$  – щільність частинки  $kg/m^3$ .

Об'єм частинки визначаємо виходячи з розрахункової схеми, представленої в роботі [13]

$$V_{об.ч} = \frac{BC + AD}{2} \cdot PQ \cdot b. \quad (12)$$

Враховуючи аналітичні залежності [13] вираз (12) прийме вигляд

$$V_{об.ч} = \frac{\frac{LM \cdot (1 + \sin \alpha_{6c})}{\cos^2 \alpha_{6c}} + \frac{LM \cdot (1 - \sin \alpha_{6c})}{\cos^2 \alpha_{6c}}}{2} \times \\ \times \frac{LM}{\cos \alpha_{6c}} \cdot b = \frac{LM^2}{\cos^3 \alpha_{6c}} \cdot b. \quad (13)$$

Перетворюємо вираз (13) з урахуванням аналітичних залежностей [13]

$$V_{об.ч} = \frac{LM^2}{\cos^3(\arctg f)} \cdot b. \quad (14)$$

Вираз (11) з урахуванням (14) прийме вигляд

$$m_ч = \frac{LM^2}{\cos^3(\arctg f)} \cdot b \cdot \rho. \quad (15)$$

Підставимо (15) в (10)

$$N_{x1} = \frac{\mu_n \cdot \delta_{сн} \cdot \frac{LM^2}{\cos^3(\arctg f)} \cdot b \cdot \rho \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{LM} = \\ = \frac{\mu_n \cdot \delta_{сн} \cdot LM \cdot b \cdot \rho \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{\cos^3(\arctg f)} \text{ Н.} \quad (16)$$

Розглянемо процес заклинювання частинки під дією удару від падіння шару підкинутого матеріалу, розрахункова схема якого наведено на рис. 3.

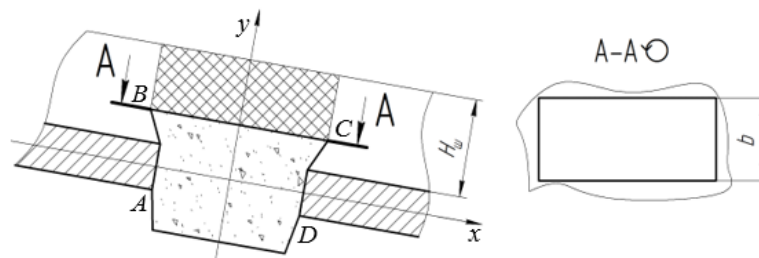


Рисунок 3. Розрахункова схема по визначенню маси шару, що вдаряє по частинці

Для визначення маси шару, що вдаряє по частинці, виділимо в ньому прямокутний паралелепіпед з основою, сторони котрої дорівнюють  $BC$  [13] та  $b$

(див. рис. 3), з висотою, що дорівнює висоті шару, який транспортується,  $H_{ш}$ .

Маса паралелепіпеду дорівнює

$$m_1 = BC \cdot b \cdot H_{ш} \cdot \rho = \frac{LM \cdot (1 + \sin \alpha_{6c})}{\cos^2 \alpha_{6c}} \cdot b \cdot H_{ш} \cdot \rho = \\ = \{ \alpha_{6c} = \arctg f \} = \\ = \frac{LM \cdot (1 + \sin(\arctg f))}{\cos^2(\arctg f)} \cdot b \cdot H_{ш} \cdot \rho \text{ кг.} \quad (17)$$

Швидкість паралелепіпеду в момент зіткнення з сієючою поверхнею

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \text{ м/с,} \quad (18)$$

де  $h$  – максимальна висота підкидання шару матеріалу, що транспортується, м.

Припустимо, що удар виділеного об'єму шару матеріалу, що транспортується, по частинці, що заклинилась, є центральним абсолютно непружним, тоді втрати кінетичної енергії [14]

$$\Delta E_k = \left( \frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2} \right) - \\ - \left( \frac{(m_1 + m_2) \cdot V^2}{2} \right) \text{ Дж,} \quad (19)$$

де  $m_2$  – маса сієючої поверхні, кг;  $V_2$  – швидкість сієючої поверхні в момент зіткнення, припустимо, що

швидкість має максимальне значення, яке визначається за кінематичною діаграмою руху системи «частинка-сито», м/с;  $V$  – швидкість сита та матеріалу після удару:

$$V = \frac{m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2} \text{ м/с.} \quad (20)$$

Перетворимо (19) з врахуванням (20)

$$\Delta E_k = \left( \frac{m_1 \cdot V_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot V_2^2}{2} \right) - \\ - \left( \frac{(m_1 + m_2) \cdot \left( \frac{m_1 \cdot V_1 + m_2 \cdot V_2}{m_1 + m_2} \right)^2}{2} \right) = \\ = \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot (V_1 - V_2)^2}{2 \cdot (m_1 + m_2)} \text{ Дж.} \quad (21)$$

Підставивши у (21) вирази (17) та (18)

$$\Delta E_k = \frac{\frac{LM \cdot (1 + \sin(\arctg f))}{\cos^2(\arctg f)} \cdot b \cdot H_{ш} \cdot \rho \cdot m_2 \cdot (\sqrt{2 \cdot g \cdot h} - V_2)^2}{2 \cdot \left( \frac{LM \cdot (1 + \sin(\arctg f))}{\cos^2(\arctg f)} \cdot b \cdot H_{ш} \cdot \rho + m_2 \right)} \text{ Дж.} \quad (22)$$

Припустимо, що втрата кінетичної енергії повністю переходить в потенційну енергію деформації

$$U = \Delta E_k = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \Delta l \text{ Дж,} \quad (23)$$

де  $P$  – зовнішня сила, що призводить до деформації частинки, що заклинюється, вздовж вісі  $y$ . Виразимо з формули (23) значення деформації

$$\Delta l = \frac{2 \cdot U}{P} \text{ м.} \quad (24)$$

Оскільки, перетин частинки вздовж вісі  $y$  змінюється, то загальна зміна її висоти вздовж вісі  $y$  складе [15]

$$\Delta l = \int_0^l \frac{P}{E \cdot F(y)} dy = \frac{P}{E} \int_0^l \frac{1}{F(y)} dy \text{ м,} \quad (25)$$

де  $F(y)$  – площа поперечного перетину частинки в площині перпендикулярній вісі  $y$ .

Виразимо зовнішню силу  $P$  з (25), враховуючи (24)

$$P = \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot E}{\int_0^l \frac{1}{F(y)} dy}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta E_k \cdot E}{\int_0^l \frac{1}{F(y)} dy}} \text{ Н.} \quad (26)$$

Розрахункова схема щодо визначення площі поперечного перетину частинки приведена на рис. 4.

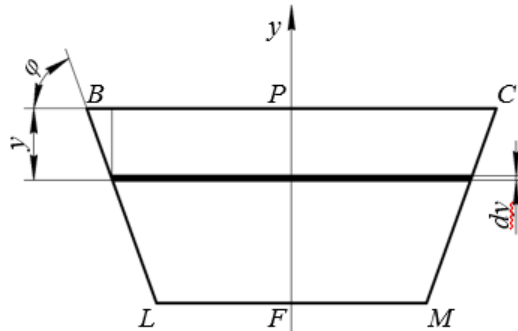


Рисунок 4. Розрахункова схема визначення площі поперечного перетину частинки

$$F(y) = \left( BC - \frac{2 \cdot y}{\tg \varphi} \right) \cdot b \text{ м}^2. \quad (27)$$

$$l = PF = PQ - FQ \text{ м} \quad (29)$$

Перетворимо (29) враховуючи [13]

Перетворимо вираз (27) з врахуванням [13]

$$F(y) = \left( \frac{LM \cdot (1 + \sin(\arctg f))}{\cos^2(\arctg f)} - \frac{2 \cdot y}{\ctg(\arctg f)} \right) \cdot b \text{ м}^2. \quad (28)$$

$$l = PF = \frac{LM}{\cos(\arctg f)} \times \left( 1 - \frac{1 - \sin(\arctg f)}{2} \right) \text{ м.} \quad (30)$$

Зважаючи на (28), (30) перетворимо (26)

Висота частинки відповідно схемам рис. 3 та 4

$$P = \left[ \frac{2 \cdot \Delta E_k \cdot E}{\int_0^l \frac{LM}{\cos(\arctg f)} \left( 1 - \frac{1 - \sin(\arctg f)}{2} \right) \frac{1}{\left( \frac{LM \cdot (1 + \sin(\arctg f))}{\cos^2(\arctg f)} - \frac{2 \cdot y}{\ctg(\arctg f)} \right) \cdot b} dy} \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot \Delta E_k \cdot E}{\ctg \alpha \cdot \left( \ln \left| \frac{LM}{1 - \sin \alpha} \right| - \ln |LM| \right)}} \text{ Н.} \quad (31)$$

Проекція реакції опори на вісь  $x$  враховуючи (31)

$$N_{x2} = \frac{\mu_n \cdot \delta_{сп}}{LM} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot \Delta E_k \cdot E}{\ctg \alpha_{6c} \cdot \left( \ln \left| \frac{LM}{1 - \sin \alpha} \right| - \ln |LM| \right)}} \text{ Н.}$$

(32)

Сила тертя складе

$$F_{тер} = (N_{x1} + N_{x2}) \cdot f \text{ Н.} \quad (33)$$

Перетворимо вираз, враховуючи (16) та (32)

$$F_{\text{теп}} = \mu_{\text{п}} \cdot \delta_{\text{сп}} \cdot f \cdot \left( \frac{LM \cdot b \cdot \rho \cdot (a \cdot \sin \psi + g \cos \alpha)}{\cos^3(\arctg f)} + \frac{1}{LM} \right) \times$$

$$\times \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot \Delta E_k \cdot E}{\text{ctg}(\arctg f) \cdot \left( \ln \left| \frac{LM}{1 - \sin(\arctg f)} \right| - \ln |LM| \right)}} \text{ Н.} \quad (34)$$

Отримана аналітична залежність (34) дозволяє визначити силу заклинювання частинки матеріалу, що розсвіається, розміром менше межного, в отворі сіячої поверхні, враховуючи фізичні властивості матеріалу та сіячої поверхні, її геометричні розміри, кінематичні та динамічні параметри.

#### Висновки

На основі проведеного теоретичного дослідження визначено механізм заклинювання частинок матеріалу в отворах сіячої поверхні, яка вільно

встановлена в коробі грохота. Отримано аналітичну залежність, що дозволяє визначати силу заклинювання частинок, враховуючи фізичні властивості контактуючих тіл, їхні геометричні параметри, а також кінематичні та динамічні характеристики системи. Зазначені результати можуть бути використані для оптимізації параметрів роботи грохотів та підвищення ефективності процесів грохочення.

#### Бібліографічний опис

1. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і коксортування металургійного виробництва: монографія / В. Й. Засельський, Д. В. Пополов та ін. Кривий Ріг: Літерія, 2019. 203 с.
2. Абрамов А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. москва: МГИИ, 2004. Т. 1: Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. 470 с.
3. Рудьки В. И., Зингермана Ю. Е. Справочник коксохимика: Справочник. Харків: Издательс. Дом «ИНЖЭК», 2009. Т. 2: Производство кокса. 288 с.
4. Складоновский Е. Н., Баланов В. Г., Нехаев Г. Е. Коксовый грохот с резиновыми ситами. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1990. № 4. С. 68–69.
5. Зелов Е. А. Разработка и внедрение высокопроизводительных шихтовых грохотов с неоднородным полем траекторий: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кривой Рог, 1986. 208 с.
6. Заика П. М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин.: Машиностроение, 1977. 278 с.
7. Бегагоен И. А., Учитель А. Д., Зелов Е. А. О засорении рабочей поверхности грохотов при рассеве агломерационных концентратов. Обогащение полезных ископаемых. 31-й вип. Киев, 1982. С. 80–83.
8. Сортировка минерального сырья и шихты: монографія / А. Д. Учитель та ін. Днепропетровск: Пороги, 1998. 194 с.
9. Беляев Н. М. Сопротивление материалов. москва: Наука, 1976. 608 с.
10. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов. москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. 456 с.
11. Учитель А. Д. Создание высокоэффективных вибрационных машин для подготовки металлургических шихт: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск, 1992. 511 с.
12. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко та ін. 5-те вид. Киев: Вища шк., 1986. 775 с.
13. Засельський В. Й., Пополов Д. В. Теоретичні дослідження процесу забивання сіячої поверхні вібраційних грохотів. *Стратегія якості в промисловості і освіті*: XVIII Міжнар. конф., м. Варна, 3–6 черв. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 39-43.
14. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А. М. Курс фізики модульно-рейтингова система навчання: підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
15. Корнілов О. А. Опір матеріалів: підручник. Київ: ЛОГОС, 2000. 551 с.

#### References

1. Zaslenskyi, V. Y., Popolov, D. V. et al. (2019). *Udoskonalennia obladdannia ta protsesiv vuhlepidohtovky i kokosortuvannia metalurhiinoho vyrobnyctva*. Literiia
2. Abramov, A. A. (2004). *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispolzovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh*. Т. 1. Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispolzovanie tverdykh poleznykh iskopaemykh. MGII
3. Rudyk, V. I., & Zingerman, Iu. E. (2009). *Spravochnik koksokhimika*. Т. 2: Proizvodstvo koksa. Izdatels. Dom "INZHEK"
4. Skladonovskii, E. N., Balanov, V. G., & Nekhaev, G. E. (1990). Koksovyi grokhot s rezinovyimi sitami. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (4), 68–69
5. Zelov, E. A. (1986). *Razrabotka i vnedrenie vysokoproizvoditelnykh shikhtovykh grokhotov s neodnorodnym polem traektorii*. (Dissertation of candidate of technical sciences, Krivoi Rog)
6. Zaika, P. M. (1977). *Dinamika vibratsionnykh zernoochistitelnykh mashin*. Mashinostroenie

7. Begagoen, I. A., Uchitel, A. D., & Zelov, E. A. (1982). O zasorennii rabochei poverkhnosti grokhotov pri rasseve aglomeratsionnykh kontsentratorov. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh*, 31, 80–83
8. Uchitel, A. D. et al. (1998). *Sortirovka mineralnogo siria i shikhty*. Porogi
9. Beliaev, N. M. (1976). *Soprotivlenie materialov*. Nauka
10. Rabotnov, Iu. N. (1962). *Soprotivlenie materialov*. Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoi literatury
11. Uchitel, A. D. (1992). *Sozdanie vysokoeffektivnykh vibratsionnykh mashin dlia podgotovki metallurgicheskikh shikht*. (Dissertation of doctor of technical sciences, Dnepropetrovsk)
12. Pisarenko, G. S. et al. (1986). *Soprotivlenie materialov*. Vishcha shkola
13. Zaselskyi, V. Y., & Popolov, D. V. (2024). Teoretychni doslidzhennia protsesu zabyvannia siiachoi poverkhni vibratsiinykh hrokhotiv. In *Stratehiia yakosti v promyslovosti i osviti*. XVIII Mizhnar. konf., Varna, 3–6 June, 2024. pp. 39-43
14. Andriashyk, M. V., Verbytskyi, B. I., & Korol, A. M. (2008). *Kurs fizyky modulno-reitynhova systema navchannia*. Flamenko
15. Kornilov, O. A. (2000). *Opir materialiv: pidruchnyk*. LOHOS

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 28.05.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.08.2024