

Засельський В.Й., Пополов Д.В.

Дослідження умов стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти при вібраційно-ударній її обробці

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 визначенні умов стабілізації гранулометричного складу агломерату фракцією 5...40 мм шляхом вібраційно-ударної обробки на вільно укладеній сіячій поверхні вібраційного грохота. У роботі застосовано аналітичний підхід та чисельне моделювання, які враховують кінематику руху частинок на сіячій поверхні. Процес розглядався у два етапи: спільний рух із сіячкою поверхнею та вільний рух під дією сили тяжіння. Для аналізу використовували математичні моделі, що дозволили визначити кінематичні характеристики руху частинок, зокрема швидкість, висоту підкидання та тривалість їх вільного руху. Результати дослідження показали, що стабілізація гранулометричного складу агломерату здійснюється шляхом руйнування частинок по концентраторах напружень, сформованих у слабких зонах, зокрема у шлакових зв'язках чи зонах засклення. Для ефективного перебігу цього процесу необхідно забезпечити динамічні параметри вібраційного грохота, зокрема прискорення коливань у діапазоні 32,9...47,3 м/с² при постійній амплітуді 0,003 м. Вперше детально описано кінематику руху частинок агломерату на вільно укладеній сіячій поверхні під дією динамічних навантажень, а також встановлено критичні параметри, необхідні для стабілізації гранулометричного складу. Результати дослідження мають практичну значущість, оскільки дозволяють вдосконалити технології механічної обробки агломерату, зокрема шляхом зниження енергетичних витрат на підготовку шихти до доменної плавки та підвищення ефективності металургійного виробництва. Використання отриманих результатів дозволяє оптимізувати роботу агломераційних фабрик, забезпечуючи високу якість підготовки шихтових матеріалів.

Ключові слова: стабілізація, гранулометричний склад, агломерат, вібраційний грохот, динамічні навантаження.

The purpose of the study was to determine the conditions for stabilizing the granulometric composition of agglomerate fractions of 5...40 mm through vibratory impact processing on a freely laid sieving surface of a vibrating screen. The research employed an analytical approach and numerical modeling, considering the kinematics of particle movement on the sieving surface. The process was divided into two stages: joint movement with the sieving surface and free motion under gravity. Mathematical models were used to analyze the motion characteristics of particles, including speed, lift height, and duration of free movement. The study results demonstrated that stabilizing the granulometric composition of the agglomerate is achieved by breaking particles along stress concentrators formed in weak zones, such as slag bonds or vitrification areas. For effective stabilization, it is necessary to ensure the dynamic parameters of the vibrating screen, specifically vibration accelerations in the range of 32.9...47.3 m/s² at a constant amplitude of 0.003 m. For the first time, the kinematics of agglomerate particle motion on a freely laid sieving surface under dynamic loads were described in detail, and critical parameters necessary for granulometric composition stabilization were established. The study's findings are practically significant as they improve the mechanical processing technologies of agglomerates, specifically by reducing energy consumption in preparing burden materials for blast furnaces and enhancing the efficiency of metallurgical production. The use of the results allows optimization of sintering plant operations, ensuring high-quality preparation of burden materials.

Keywords: stabilization, granulometric composition, agglomerate, vibrating screen, dynamic loads.

Вступ

Якість підготовки шихтових матеріалів до переплаву є ключовим чинником, що забезпечує інтенсифікацію доменного процесу та підвищення ефективності металургійного виробництва в цілому. Одним із перспективних методів покращення властивостей шихтових матеріалів перед плавкою є стабілізація їхнього гранулометричного складу та підвищення механічної міцності. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на вдосконалення процесів стабілізації гранулометричного складу металургійної шихти, мають важливе значення та високу актуальність. У статті представлено результати дослідження стабілізації гранулометричного складу агломерату, здійсненої шляхом вібраційно-ударної

обробки на вільно укладеній сіячій поверхні грохота.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Стабілізація гранулометричного складу та механічної міцності агломерату здійснюється за рахунок часткового його руйнування під впливом механічних навантажень, що виникають при обробці спеченого шару шихти [1]. Проведені дослідження механізму руйнування [2-7] дозволили встановити, що для стабілізації шару агломерату без часткового руйнування найбільш міцних фракцій необхідно забезпечити механічну обробку з енергією навантаження на агломерат в 45...50 Дж/кг на протяжці 2...3 хвилин з подальшим зниженням цієї величини



по ходу механічної обробки. Механічна обробка з такою енергетикою в першу чергу спрямована на руйнування в шарі агломерату фракції +40 мм. Проведений гранулометричний аналіз агломерату показав, що для технологічних ліній агломераційних фабрик, в яких передбачено подрібнення пилога агломерату в щоківих або роторних дробарках клас +40 мм в готовому агломераті відсутній, на відміну від інших технологічних ліній де даний клас присутній у кількості 13...22 % [5].

Для досягнення вище зазначеного діапазону енергії навантаження на шар агломерату при продуктивності шихтових грохотів від 120 до 600 т/год необхідно забезпечити режим роботи вібраційної машини, при котрому прискорення коливань становитиме 1784 м/с^2 , а амплітуда коливань 293 мм, що практично реалізувати не можливо. Тому, при використанні агломерату, який включає фракцію +40 мм доцільно застосування багатоситного грохоту з метою виділення цієї фракції на одній з дек для подальшого дроблення.

Як показує аналіз формування гранулометричного складу шихтового матеріалу на тракті його подачі в доменну піч [8], стабілізація агломерату в першу чергу повинна полягати в його руйнуванні по чисельним тріщинкам, утворених в шлакових зв'язках або зонах засклення, які є наслідком порушення режиму охолодження, при зусиллі навантаження в $0,1 \dots 1 \text{ Н}$ [7] на сіячій поверхні грохоту. Дані зусилля досягаються за рахунок впливу динамічних навантажень на шар агломерату, що відповідає

вібраційному прискоренню $60,8 \text{ м/с}^2$, враховуючи продуктивність грохотів та гранулометричний складу шихти. При таких прискореннях з аналізу залежності, яка наведена на (рис. 1 Рисунок 1), видно, що в межах від 54 до 61 м/с^2 , при доставці дрібних фракцій на контакт з сіячою поверхнею визначальним є процес дифузії, інтенсивність котрого залежить від вертикальної складової коливань, внаслідок чого може забезпечуватись руйнування по тріщинках шматків металургійної сировини та стабілізувати її гранулометричний склад перед подаванням в доменну піч.

Мета і завдання досліджень

Метою дослідження було встановлення можливостей стабілізації гранулометричного складу агломерату фракції 5...40 мм, шляхом його обробки на вільно укладеній сіячій поверхні, розташованій в просторі підситника віброуючого коробу грохоту, та необхідних динамічних параметрів для ефективного перебігу цього процесу.

Матеріали та методи досліджень

Дослідження виконувались аналітичним шляхом, де частинка матеріалу, що розсівається та переміщується по похилій сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника віброуючого коробу, розглядалась у два етапи:

перший етап — спільний рух з сіячою поверхнею;

другий етап — звільнення від одностороннього зв'язку з сіячою поверхнею та вільний рух під дією сили гравітації до зіткнення з нею.

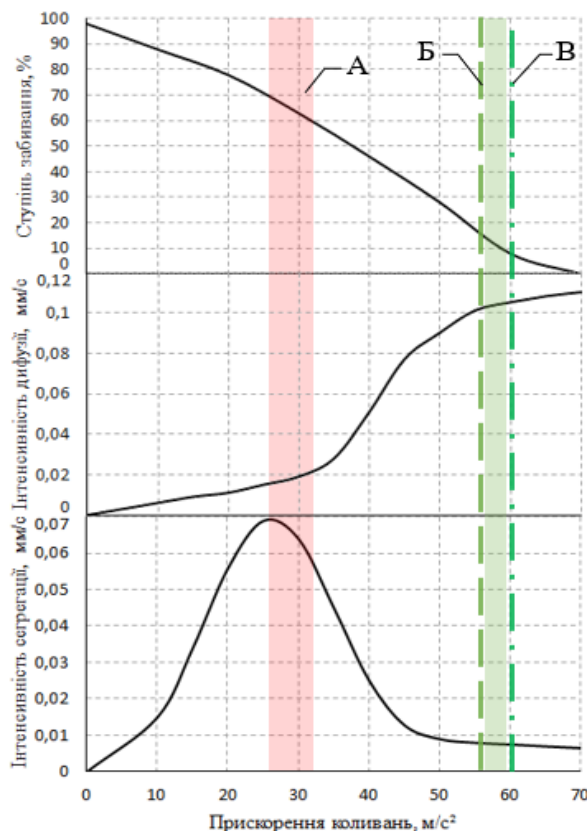


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності внутрішньозарових процесів та ступеня забивання від прискорення коливань:

А - діапазон прискорень коливань використовуваних грохотів;

Б - прискорення коливань грохоту, що забезпечує не забивання отворів сіячої;

поверхні при межному класі розсіву 5 мм;

В - прискорення коливань грохоту, що забезпечує стабілізацію шару агломерату.

Також при дослідженні були прийняті наступні допущення:

підчас потрапляння частинки матеріалу в деякий момент часу на сіячу поверхню її рух підкоряється закону поступального руху сіячої поверхні;

внаслідок відносно малої швидкості руху частинки та короткочасності другого етапу, аеродинамічні сили не враховуються.

Закон переміщення частинки матеріалу на першому етапі визначається як

$$\begin{cases} x_{1ч}(t) = 0 \\ y_{1ч}(t) = y(t) \end{cases} \quad (1)$$

де $y(t)$ – закон коливального руху сіячої поверхні у нормальному до неї напрямку.

Послідовно продиференціювавши вираз (1) за часом були отримані проєкції абсолютної швидкості $\vec{V}_{1ч}(V_{1чx}, V_{1чy})$

$$\begin{cases} V_{1чx}(t) = 0 \\ V_{1чy}(t) = \frac{dy_{1ч}(t)}{dt} = \frac{dy(t)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

та прискорення $\vec{a}_{1ч}(a_{1чx}, a_{1чy})$ частинки матеріалу на першому етапі

$$\begin{cases} a_{1чx}(t) = 0 \\ a_{1чy}(t) = \frac{dV_{1чy}(t)}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

Кінець першого етапу визначається моментом розриву одностороннього зв'язку між сіячою поверхнею та частинкою матеріалу. Це відбувається коли відносна рівновага між частинкою матеріалу та сіячою поверхнею досягає межного стану (див. рис. 2), а саме коли нормальна реактивна сила R_A , прикладена до частинки матеріалу А зі сторони прискореної сіячої поверхні, досягає нульового значення.

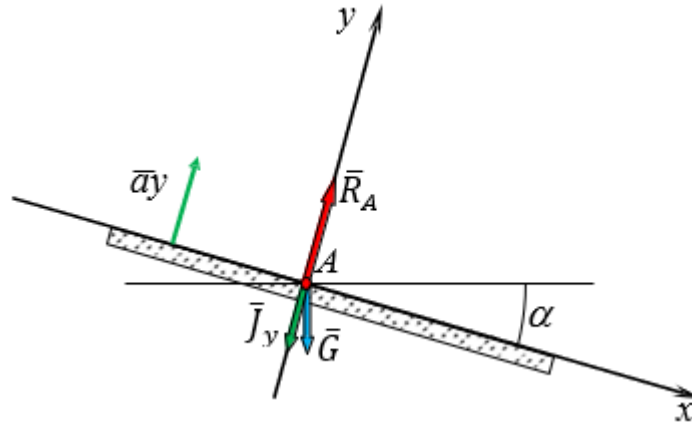


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення моменту відриву частинки матеріалу від сіячої поверхні

Тоді, умова розриву одностороннього зв'язку має наступний вид

$$-J_y - G \cdot \cos \alpha = 0, \quad (4)$$

де J_y – сила інерції, прикладена зі сторони частинки матеріалу на прискорену сіячу поверхню, Н; α – кут нахилу сіячої поверхні до горизонту, град.

З умови (4) та враховуючи, що момент інерції частинки в вертикальній площині J_y і сила її тяжіння G_y будуть дорівнювати

$$J_y = m_{ч} \cdot a \cdot \sin \psi; \quad (5)$$

$$G_y = m_{ч} \cdot g \cos \alpha, \quad (6)$$

отримаємо величину та напрям критичного прискорення сіячої поверхні, при досягненні котрого відбувається відрив частинки матеріалу

$$a_y = -g \cdot \cos \alpha. \quad (7)$$

Момент розриву одностороннього зв'язку t_B визначається по закону зміни прискорення сіячої поверхні, перший відрив частинки матеріалу від неї відбувається вздовж нормалі до її поверхні при додатній швидкості та критичному прискоренні. Наступні відриви частинки матеріалу будуть мати набути за час вільного руху складову швидкості вздовж дотичної вісі.

Час вільного руху частинки матеріалу обмежується перетином її траєкторії руху з траєкторією сіячої поверхні.

До початкових кінематичних параметрів другого етапу відносяться:

– початкова координата сіячої поверхні вздовж нормалі y , а також нормальна $y_{1ч}(t_B)$ та дотична $x_{1ч}(t_B)$ координата положення частинки матеріалу;

– проєкції початкової швидкості частинки матеріалу $V_{1чy}(t_B)$, $V_{1чx}(t_B)$ в момент відповідного відриву;

– початкове нормальне прискорення частинки матеріалу $a_{1чy}(t_B)$ в момент відповідного відриву.

Розрахункова схема сил, що діють на частинку матеріалу А підчас її вільного руху в системі

координат, вісі котрої пов'язані з нормаллю та дотичною до сіячої поверхні, наведена на рис. 3.

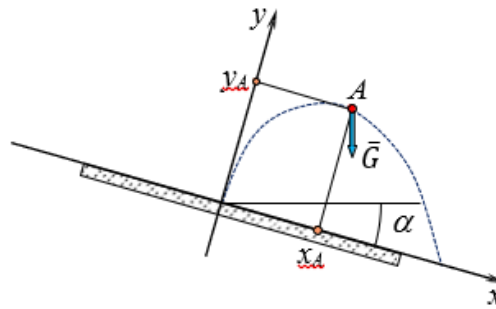


Рисунок 3 – Розрахункова схема вільного руху частинки матеріалу під дією сили гравітації

У відповідності до основного закону механіки точки [9] прискорення частинки матеріалу на другому етапі складає

$$\begin{cases} a_{2чх} = g \cdot \sin \alpha \\ a_{2чы} = -g \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (8)$$

Для визначення швидкості переміщення частинки матеріалу представимо відповідні прискорення системи (8) в диференційній формі та виконавши перше інтегрування з визначенням та підстановкою початкових умов руху на другому етапі

$$\begin{cases} V_{2чх}(t) = g \cdot \sin \alpha \cdot t + V_{1чх}(t_B) \\ V_{2чы}(t) = -g \cdot \cos \alpha \cdot t + V_{1чы}(t_B) \end{cases} \quad (9)$$

Для визначення закону переміщення частинки матеріалу на другому етапі виконувалось друге інтегрування системи (8) з урахуванням початкових умов

$$\begin{cases} x_{2ч}(t) = 0,5 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot t^2 + V_{1чх}(t_B) \cdot t + x_{1ч}(t_B) \\ y_{2ч}(t) = -0,5 \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot t^2 + V_{1чы}(t_B) \cdot t + y_{1ч}(t_B) \end{cases} \quad (10)$$

Час закінчення другого етапу $t_{з\text{ит}}$ визначається з системи рівнянь, які відображають рух сіячої поверхні $y(t)$ та частинки матеріалу (10) при умові, що відповідні координати місця зустрічі збігаються за своїм значенням.

Для дослідження процесу переміщення частинки матеріалу, що розсівається, по сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, використовуючи чисельні методи, був створений програмний продукт, який базувався на отриманих раніше математичних моделях.

Дослідження проводились для чотирьох варіантів початкових даних, які відрізнялись кінематичними параметрами коробу, а саме, прискореннями коливальних в діапазоні від 18 до 47 м/с² при постійній амплітуді $A = 0,003$ м та змінних кругових частотах $\omega = 79; 94; 105; 126$ с⁻¹.

Результати дослідження

За результатами були отримані кінематичні характеристики першого етапу руху частинки матеріалу, що розсівається (рис. 4), та її траєкторію руху на другому етапі (рис. 5).

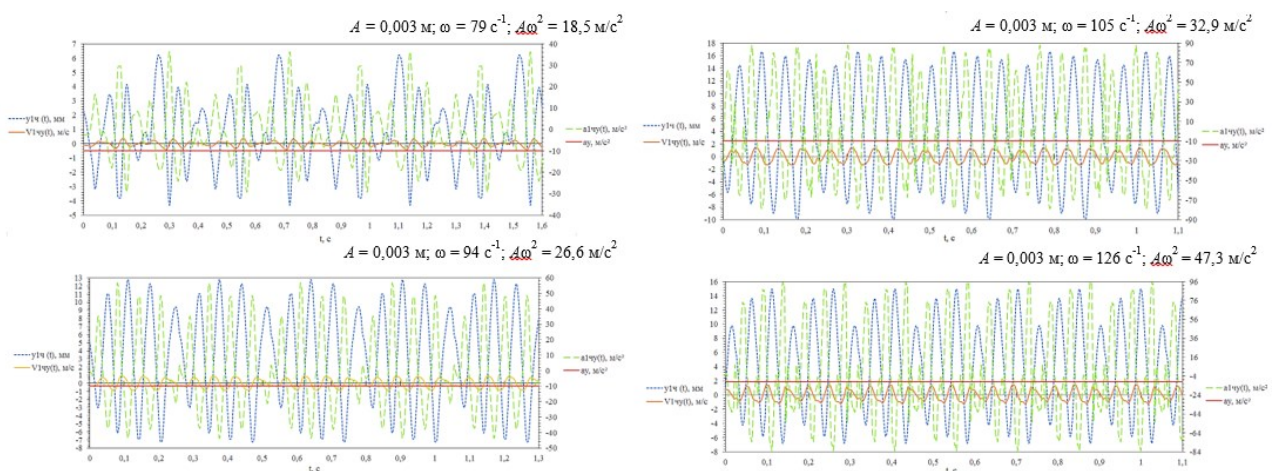


Рисунок 4 – Кінематична характеристика першого етапу руху частинки матеріалу, що розсівається

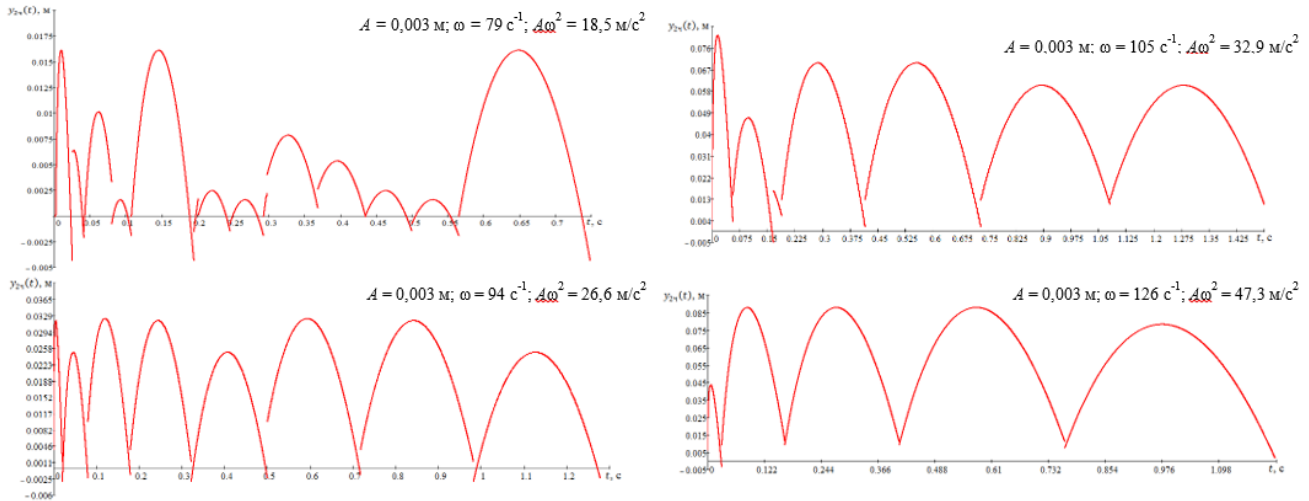


Рисунок 5 – Траекторія руху частинки матеріалу, що розсівається, на другому етапі

Аналіз отриманих даних показує, що зі збільшенням прискорення коливань коробу грохоту середня швидкість руху та прискорення частинки матеріалу, що розсівається, на першому етапі, середня висота підкидання частинки та період її вільного руху на другому етапі збільшуються, з достатнім ступенем точності вказані залежності у визначеному діапазоні прискорень описуються поліномом другого ступеня рис. 6.

Стале зростання зазначених параметрів (див. рис. 6) відбувається в діапазоні прискорень коробу від 18,5 до 32,9 м/с², після подолання котрого з'являється уповільнення зміни досліджуваних параметрів з подальшим виполажуванням кривої

залежності, тобто набрання ними значення наближеного до константного.

При вібраційному діянні на шар шихти, що розсівається на сіячій поверхні, вільно укладений в просторі підситника вібруючого коробу, спостерігається ударна взаємодія шматків матеріалу з нею, це може розглядатись як елемент стабілізації гранулометричного складу та механічної міцності частинок, з котрих складається шар, за рахунок часткового руйнування по чисельних тріщинках, утворених в шлакових зв'язках або зонах застосування, які є наслідком порушення режиму охолодження, під впливом динамічних навантажень.

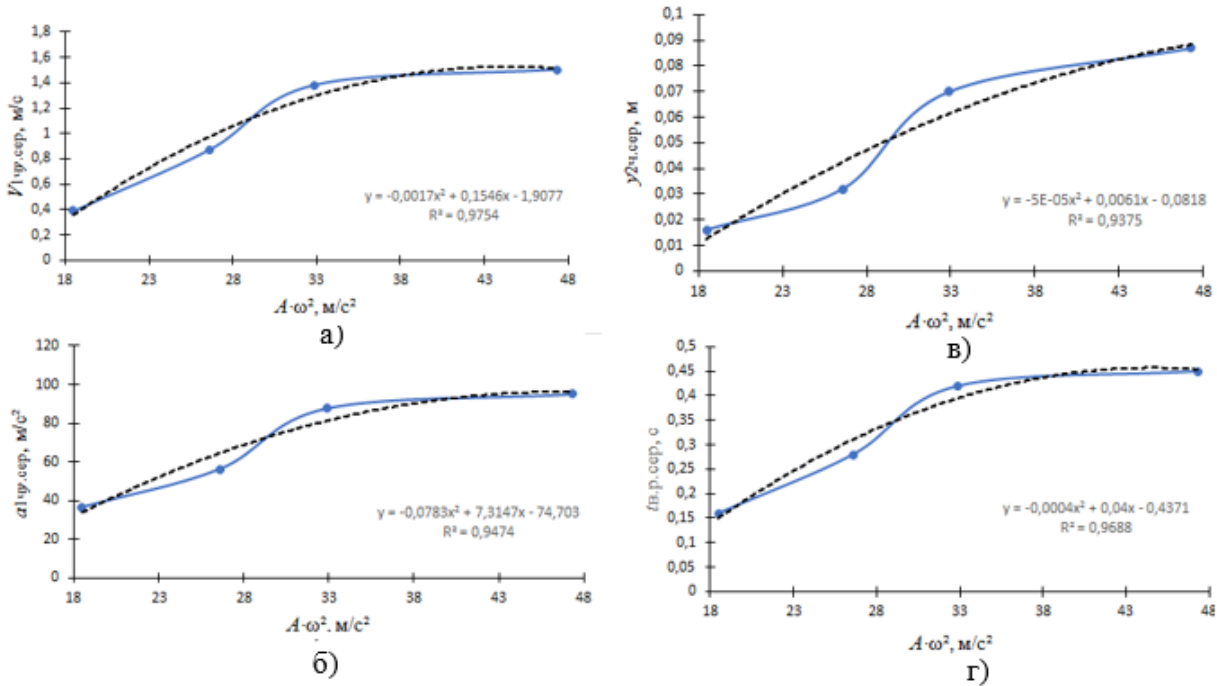


Рисунок 6 – Залежність середньої швидкості (а), середнього прискорення (б) частинки матеріалу на першому етапі; середня висота підкидання (в), середній період вільного руху (г) частинки матеріалу на другому етапі

Під час аналізу цього процесу спиратимемось на припущення, що ґрунтовно обґрунтовані в роботах [2-8, 10]:

- дроблення шматків матеріалу відбувається в момент їх зіткнення з сіячою поверхнею за умови досягнення значення критичної енергії удару на матеріал, що розсівається;

- під час зіткнення шматка матеріалу з сіячою поверхнею він взаємодіє з нею як непружне тверде тіло;

- в проміжках між зіткненнями частинка рухається відповідно до закону (1) та (10), а сіяча поверхня за законом поступального руху;

- під час розрахунку враховуємо лише нормальну складову швидкості, оскільки ударні взаємодії пов'язані лише з вертикальними коливаннями.

Відповідно до прийнятих допущень, енергія, яка спрямовується на руйнацію частинки, визначається за формулою

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \mu_p \cdot V^2 \text{ Дж}, \quad (11)$$

де μ_p – приведена маса частинки матеріалу та сіячої поверхні;

$$\mu_p = \frac{m \cdot m_{\text{ч}}}{m + m_{\text{ч}}} \text{ кг}; \quad (12)$$

V – відносна швидкість руху частинки матеріалу та сіячої поверхні;

$$V = V_y(t_{\text{зіт}}) - V_{2\text{чы}}(t_{\text{зіт}}) \text{ м/с}, \quad (13)$$

$V_y(t_{\text{зіт}})$ – швидкість сіячої поверхні в момент зіткнення з частинкою матеріалу, м/с; $V_{2\text{чы}}(t_{\text{зіт}})$ – швидкість частинки матеріалу в момент зіткнення з сіячою поверхнею, м/с.

Використовуючи чисельні методи були проведені дослідження впливу на енергію, яка утворюється під час зіткнення частинки матеріалу з сіячою поверхнею та спрямовується на її руйнацію E_p при різних її динамічних параметрах. Так енергія необхідна для руйнування та стабілізації надрешітного матеріалу, для агломерату класу 5...40 мм повинна становити 0,111 та 5,55 Дж відповідно.

Результати проведених досліджень наведені на рис. 7. З отриманих залежностей видно, що енергія, яка утворюється під час зіткнення частинки матеріалу з сіячою поверхнею, яка вільно укладена, є достатньою для стабілізації гранулометричного складу розглянутого матеріалу та його механічної міцності (досягає значення $E_p \geq 50$ Дж/кг). Стабілізація гранулометричного складу агломерату здійснюється шляхом руйнування частин матеріалу по концентраторах напруження для всього діапазону фракцій надрешітного продукту (5...40 мм) за умови забезпечення її прискорення в межах від 32,9 до 47,3 м/с².

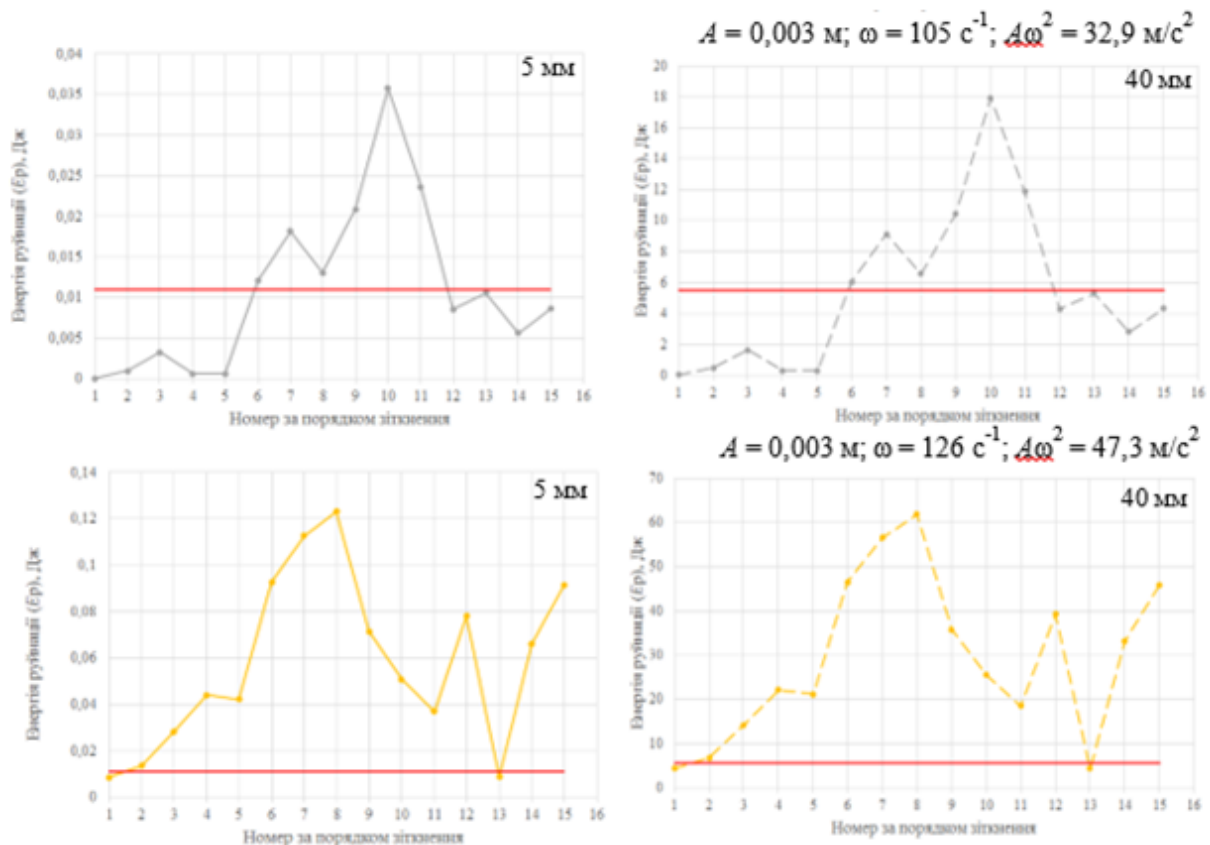


Рисунок 7 – Енергія, яка утворюється під час зіткнення частинки з сіячою поверхнею

Висновки

Дослідженнями встановлено, що стабілізація гранулометричного складу агломерату та механічної міцності частинок надRESHITного продукту фракцією 5...40 мм шляхом їх руйнування по

концентраторах напруження на сіячій поверхні, вільно укладеній в просторі підситника вібруючого коробу, відбувається за умови забезпечення прискорення його коливань в межах від 32,9 до 47,3 м/с² при постійній амплітуді $A=0,003$ м.

Перелік посилань

1. Русских В. П., Тарасов В. П., Криенко О. В. Исследование и совершенствование технологии производства агломерата. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2000. № 10. С. 21–25.
2. Бочка В. В., Сова А. В., Двоглазова А. В. Исследование особенностей процесса разрушения агломерата в устройстве барабанного типа. Металл и литье Украины. 2018. № 11-12. С. 3–9.
3. Особенности формирования напряженного состояния и разрушения агломерата / В. В. Бочка та ін. Металл и литье Украины. 2017. № 6-7. С. 3–6.
4. Поведінка агломерату при механічних навантаженнях / В. В. Бочка та ін. Актуальні проблеми розвитку металургійної освіти і науки: матеріали Всеукр. науково-техніч. конф., м. Дніпро, 4 квіт. 2017 р. Дніпро, 2017. С. 233–237.
5. Рациональная схема подготовки агломерата к доменной плавке / В. В. Бочка та ін. Вісник Криворізького національного університету. 2014. № 36. С. 234–237.
6. Сова А. В. Удосконалення технології виробництва агломерату шляхом формування раціональної блокової структури на основі роздільної підготовки шихти та механічної обробки спеченця: дис. канд. техн. наук: 05.16.02. Дніпро, 2020. 119 с.
7. Хопунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии): ООО «УИПЦ», 2013. 429 с.
8. Учитель А. Д., Засельский В. Й., Пополов Д. В. Анализ формирования гранулометрического состава шихтового материала на тракте его подачи в доменную печь // XIII Международная конференция "Стратегия качества в промышленности и образовании". Варна, 2017. Т. 2. С. 173-176.
9. Бондаренко А. А., Дубінін О. О., Переяславцев О. М. Теоретична механіка. Київ: Знання, 2004. Т. 2: Динаміка. 590 с.
10. Учитель А. Д. Создание высокоэффективных вибрационных машин для подготовки металлургических шихт: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Днепропетровск, 1992. 511 с.

References

1. Russkykh, V. P., Tarasov, V. P., & Kryenko, O. V. (2000). Yssledovanye y sovershen-stvovanye tekhnolohyy proyzvodstva ahlomerata. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, (10), 21–25
2. Bochka, V. V., Sova, A. V., & Dvoeglazova, A. V. (2018). Issledovanie osobennostey protsesssa razrusheniya aglomerata v ustroystve barabannogo tipa. *Metall i lite Ukrainy*, (11-12), 3–9
3. Bochka, V. V. et al. (2017). Osobennosti formirovaniya napryazhennogo sostoyaniya i razrusheniya aglomerata. *Metall i lite Ukrainy*, (6-7), 3–6
4. Bochka, V. V. et al. (2017). Povedinka ahlomeratu pry mekhanichnykh navantazhenniakh. In *Aktualni problemy rozvytku metalurhiinoi osvity i nauky*. Materialy Vseukr. naukovo-tekhnich. konf., Dnipro, 4.04.2017, 233–237
5. Bochka, V. V. et al. (2014). Ratsionalnaia skhema podgotovki aglomerata k domЕННОI pлавке. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, (36), 234–237
6. Sova, A. V. (2020). *Udoskonalennia tekhnolohii vyrobnytstva ahlomeratu shliakhom formuvannia ratsionalnoi blokovoї struktury na osnovi rozdilnoi pidhotovky shykhty ta mekhanichnoi obrobky spechentsia*. [Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.16.02, Dnipro]
7. Khopunov, E. A. (2013). *Selektivnoe razrushenie mineralnogo i tekhnogennogo syria (v obogashchenii i metallurgii)*. ООО "UIPTS"
8. Uchitel, A. D., Zaselskiy, V. Y., & Popolov, D. V. (2017). Analiz formirovaniia granulometricheskogo sostava shikhtovogo materiala na trakte ego podachi v domennuiu pech. In *XIII Mezhdunarodnaya konferentsiya "Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii"*, Varna. Volume 2, 173-176
9. Bondarenko, A. A., Dubinin, O. O., & Pereiaslavtsev, O. M. (2004). *Teoretychna mekhanika*. (Volum 2. *Dynamika*). Znannia
10. Uchitel, A. D. (1992). *Sozдание vysokoeffektivnykh vibratsionnykh mashin dlya podgotovki metallurgicheskikh shikht*. [Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Dnipropetrovsk]

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 02.09.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.11.2024