

Селегей А.М., Селегей С.М.

Дослідження руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику безконусного завантажувального пристрою доменної печі

Selegej A., Selegej S.

Investigation of the movement of charge materials in the tray-distributor of the cone-free loading device of the blast furnace

Мета. Визначити аналітичну залежність профілю гранульованих матеріалів, що рухаються по лотку-розподільнику безконусного завантажувального пристрою від координати довжини.

Методика. Розглянуто кінематичні та геометричні закономірності руху шихтових матеріалів по розподільчому органу безконусного завантажувального пристрою лоткового типу. Показано, що на динаміку руху потоку шихтових матеріалів в значній мірі впливають такі чинники як величина середнього діаметру частинок матеріалу, що завантажуються, фізико-механічні характеристики шихти, її витрата, кут швидкості обертання лотка-розподільника та кут його нахилу.

Результати. Аналіз отриманих результатів дає можливість з достатньою точністю розраховувати швидкість сходу шихти з лотка-розподільника в колошниковий простір доменної печі. Це дає змогу розрахувати траєкторію потоку шихти в колошниковому просторі та отримати координату перетину траєкторії з поверхню засипу шихти на колошнику доменної печі. Отримане рівняння профілю руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику дає змогу рекомендувати положення лотка при завантаженні доменної печі, що унеможливають пересипання шихти через край лотка.

Наукова новизна. Запропоновано новий спосіб розв'язку задачі Коші для диференційного рівняння, що описує потік шихти по лотку-розподільнику. Встановлено, що зміна витрати шихтових матеріалів, що проходять через лоток-розподільник значною мірою впливає на конфігурацію поверхні шихти на лотку, а це, в свою чергу, викликає зміну швидкості сходу потоку в колошниковий простір. Як показали дослідження на параметри руху значною мірою впливає початкова висота завантаження шихтових матеріалів на лотку.

Практична значимість. Отримані результати дають змогу аналітичного розрахунку зміни динаміки руху шихти за умови сталого кута нахилу лотка завантажувального пристрою доменної печі. Це дає змогу розширити можливості автоматичної корекції газодинаміки колошникової зони доменної печі в конкретних шихтових умовах.

Ключові слова: доменна піч, завантажувальний пристрій, динаміка руху, шихта

Objective. Determine the analytical dependence of the profile of granular materials moving on the tray-distributor of the cone-free loading device on the length coordinate.

Method. Kinematic and geometrical regularities of movement of charge materials on the distributive body of the cone-free loading device of tray type are considered. It is shown that the dynamics of the flow of charge materials is significantly influenced by such factors as the value of the average particle diameter of the loaded material, physical and mechanical characteristics of the charge, its flow rate, angular velocity of the distributor tray and its angle.

Results. The analysis of the obtained results makes it possible to calculate with sufficient accuracy the rate of charge rise from the tray-distributor in the furnace space of the blast furnace. This makes it possible to calculate the trajectory of the charge flow in the furnace space and to obtain the coordinate of the intersection of the trajectory with the surface of the charge backfill on the blast furnace grate. The obtained equation of the profile of the movement of charge materials on the tray-distributor makes it possible to recommend the position of the tray when loading the blast furnace, which prevents the transfer of the charge through the edge of the tray.

Scientific novelty. A new method for solving the Cauchy problem for a differential equation describing the flow of a charge through a distributor tray is proposed. It is established that the change in the flow rate of charge materials passing through the tray-distributor significantly affects the configuration of the surface of the charge on the tray, and this, in turn, causes a change in the rate of flow into the furnace space. Studies have shown that the motion parameters are significantly affected by the initial height of the charge materials on the tray.

Practical significance. The obtained results allow analytical calculation of the change in the dynamics of the charge movement under the condition of a constant angle of inclination of the tray of the loading device of the blast furnace. This makes it possible to expand the possibilities of automatic correction of the gas dynamics of the blast furnace zone in specific charge conditions.

Key words: blast furnace, loading device, dynamics of movement, charge

В сучасних умовах доменний процес залишається основним способом отримання чавуну для виробництва сталі. Важливим чинником, що впливає на якість перебігу доменної плавки є завантаження печі шихтовими матеріалами. Сьогодні достатньо велика кількість доменних печей обладнана безконусними завантажувальними пристроями. Для успішного їх використання необхідна наявність математичної моделі, що описує динаміку потоку шихти по тракам завантажувального пристрою.

Одним з основних елементів безконусного завантажувального пристрою є лоток-розподільник, що безпосередньо направляє потік шихтових матеріалів на поверхню засипу колошника доменної печі. Технологам доменної плавки необхідно постійно утримувати нормальний хід доменної печі. На це безпосередньо впливає програма завантаження печі, яка повинна забезпечити стабільність показників роботи. Якщо при роботі печі виникають відхилен-

ня технологічних показників на це слід реагувати в першу чергу корегуванням завантаження шихтових матеріалів. Для розробки програм завантаження та своєчасного корегування умов завантаження необхідно мати чітке уявлення процесів, що проходять в трактах завантажувального пристрою. У зв'язку з цим задача визначення геометричних та кінематичних показників потоку шихти по елементам завантажувального пристрою доменної печі є актуальною в науковому та науково-практичному плані.

Огляд наявної наукової інформації.

Для ефективного аналітичного дослідження руху шихти в колошниковому просторі необхідно повністю задати вектор швидкості сходу шихти з лотка. З цією метою аналізують рух шихти по лотку-розподільнику. Багато дослідників отримують

кінематичні характеристики руху шихти по лотку за допомогою розв'язання задачі Коші для диференціальних рівнянь руху матеріальної точки. [1]

У дослідженні зроблено спробу комплексного розрахунку кінематичних параметрів руху шихтових матеріалів по лотку-розподільнику завантажувального пристрою із застосуванням циліндричних координат, а також з аналітичним визначенням початкових умов руху частинки шихтових матеріалів по лотку-розподільнику. Отримано рівняння для визначення швидкості сходу частки шихти з лотка з урахуванням складного руху точки по циліндричній поверхні лотка. Диференціальне рівняння руху частинки вздовж лотка-розподільника отримано у вигляді:

$$z = g \cos \alpha + 2R\omega \sin \alpha \cos \theta + \omega^2 \sin \alpha (z \sin \alpha - R \cos \alpha \cos \theta) - \mu |n| \frac{z}{|V|}, \quad (1)$$

де z - координата частинки уздовж лотка;
 α - кут нахилу розподільного лотка до осі печі;
 R - радіус перерізу лотка;
 ω - кутова швидкість обертання розподільника;
 θ - кут підйому частки на стінку лотка;

μ - коефіцієнт тертя ковзання матеріалу шихти по поверхні лотка-розподільника;

n - нормальна реакція поверхні лотка на частку шихтових матеріалів одиничної маси;

V - швидкість руху частинки по лотку
 Швидкість визначається наступним виразом:

$$V = \sqrt{R\theta^2 + z^2} \quad (2)$$

Нормальну реакцію запропоновано визначати наступним чином:

$$|n| = g \sin \alpha \cos \theta - 2\omega(z \sin \alpha \sin \theta + R\theta \cos \alpha) + R\omega^2 - \omega^2 \sin \alpha \cos \theta (z \cos \alpha + R \sin \alpha \cos \theta) + R\theta^2 \quad (3)$$

Представлена методика була великим кроком вперед в разі визначення кінематики шихтових матеріалів по ділянці від випускного отвору накопичувального бункера завантажувального пристрою до поверхні засипу шихти на колошником доменної печі. Вперше була проведена спроба комплексного аналітичного дослідження поведінки шихти в трактах завантажувального пристрою. Основним недоліком методу є те, що при дослідженні математична модель ґрунтується для якоїсь середньої точки перетину з яких-небудь критеріями вибирається за основу. Параметри ж потоку матеріалів визначалися на основі відступу траєкторій від основної, які збігаються при накладанні. На жаль, в цьому випадку врахувати такий важливий параметр як крупність матеріалу при аналітичному дослідженні досить важко.

В [2] Рух розглядається для точки, що є центром мас поперечного перерізу потоку шихтових матеріалів на лотку. До цієї точки прикладають всі сили і визначають її кінематичні характеристики і траєкторію. Розрахункові дані узагальнюються на все точки поперечного перерізу потоку. Таким чином, приймається, що характеристики потоку

розраховані. Для обліку виду матеріалу змінюють коефіцієнт тертя матеріалу шихти об поверхню лотка-розподільника або ж вводять узагальнене значення загального коефіцієнта опору руху шихти по лотку. Швидкість сходу частинок шихтових матеріалів з лотка розподільника пропонується визначати наступним чином:

$$V_{\Sigma} = V_k + V_z = V_{kx} + V_{ky} + V_z; \quad (4)$$

$$V_z = nR_{ep}; R_{ep} = L \sin \alpha - (B - h) \cos \alpha, \quad (5)$$

де горизонтальна і вертикальна складова швидкості сходу частинок з лотка;

V_{kx}, V_{ky} - тангенціальна складова сумарної швидкості сходу;

α - кут нахилу лотка до осі печі;

R_{ep} - радіус обертання точки сходу частинок;

n - частота обертання лотка;

L - довжина робочої частини лотка;

B - відстань від осі нахилу лотка до нижньої твірної його робочої поверхні;

h - відстань між центром перетину потоку і нижньої твірної поверхні лотка, визначає розташування точки сходу частинок щодо зазначеної утворюючої.

У дослідженні також визначено, що при інженерних розрахунках коефіцієнт еквівалентного опору руху частинок по лотку слід приймати рівним 0,8, причому для будь-якого виду рухомого шихтового матеріалу.

Початкові умови руху по лотку також визначаються з попереднього ділянки руху шихти. Знову ж для характерних точок визначають кінематичні характеристики і узагальнюють їх на весь потік.

Коефіцієнт тертя, еквівалентного опору визначаються на основі промислових експериментів проведених в своїй більшості при передпусковий завантаженні доменних печей.

Таким чином, на сьогоднішній день програми завантаження шихти в доменну піч базуються на методиках, заснованих на емпірико-практичних розрахунках з великою кількістю коефіцієнтів, одержуваних досвідченим шляхом. В існуючих методиках розрахунку кінематичних параметрів руху шихти по трактах завантажувальних пристроїв доменних печей не враховується весь комплекс факторів, які безпосередньо впливають на формування поверхні засипу на колошнику доменної печі. Серед вищевказаних чинників слід зазначити фракційний склад шихти, її гранулометрію, фізико-механічні характеристики. В першу чергу це кое-

фіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя матеріалу при взаємодії з елементами систем завантаження доменних печей.

В дослідженні [3] отримано рівняння Бернуллі для руху шихтових матеріалів по лотку безконусного завантажувального пристрою доменної печі у вигляді

$$-\frac{\omega^2 \cdot x^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{U^2}{2g} = const \quad (6)$$

Вільно-дисперсний стан руху вантажу по лотку виникає при кутах нахилу більше 40 градусів по відношенню до горизонту [4-5]. Лоток безконусного завантажувального пристрою при експлуатації може нахилитися під кутом в межах 17-53 градуси по відношенню до вертикалі. З огляду на інерційну складову прискорення в переносному русі шихти можна з упевненістю стверджувати, що шихтові матеріали рухаються по лотку завантажувального пристрою в вільно-дисперсному стані. Вільно-дисперсний стан шихти при його русі по обертається лотку описується рівняннями Нав'є-Стокса. У зв'язку з цим для двох нормальних перетинів 1-1 і 2-2, розташованих на малій відстані по потоку (див. Рис. 1) є можливість застосувати рівняння Бернуллі для плавно змінюваного потоку.

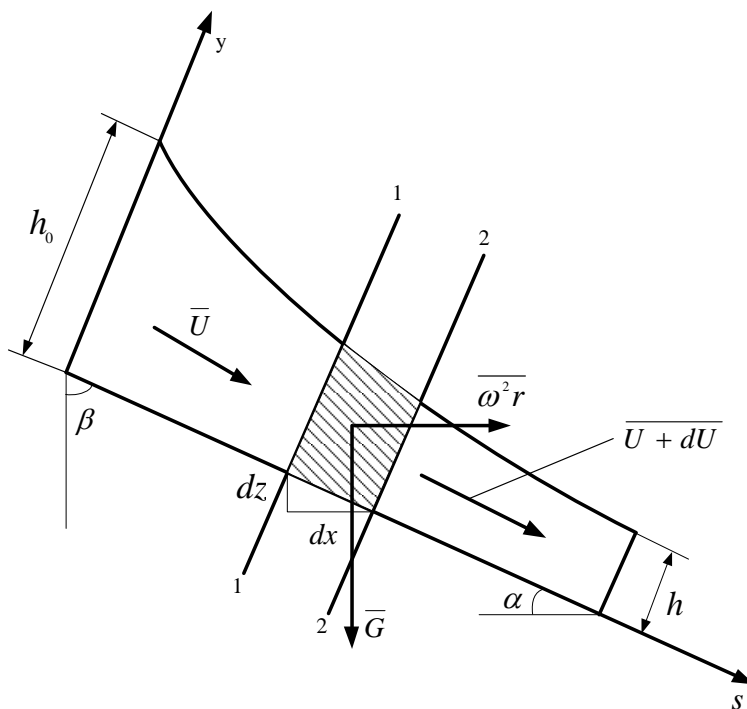


Рисунок. 1. Схема для визначення складових рівняння Бернуллі (7)

$$h' - \frac{\omega^2 \cdot dx^2}{2g} + dz + \frac{U^2}{2g} = h' + dh' - \frac{\omega^2 (x + dx)^2}{2g} + dh_{mp} + \frac{(U + dU)^2}{2g}, \quad (7)$$

Де h' - глибина потоку шихти в перерізі 1-1, спроектована на вертикальну вісь Z , м;

$$\begin{aligned}
 &-\frac{\omega^2 s^2 \cos^2 \alpha}{2g} + ds \cdot \sin \alpha = dh \cdot \cos \alpha - \frac{\omega^2 s^2 \cos^2 \alpha}{2g} - \\
 &-\frac{2\omega^2 s \cdot \cos^2 \alpha \cdot ds}{2g} + \frac{Q^2 ds}{\bar{C}^2 R_c h^2 \cdot b^2} - \frac{Q^2 dh}{h^3 b^2 g}
 \end{aligned} \tag{13}$$

розділимо змінні

$$dh \cdot \cos \alpha - \frac{Q^2 dh}{h^3 b^2 g} = ds \cdot \sin \alpha + \frac{\omega^2 s \cdot \cos^2 \alpha \cdot ds}{g} - \frac{Q^2 ds}{\bar{C}^2 R_c h^2 \cdot b^2} \tag{14}$$

Винесемо загальні параметри за дужки:

$$dh \left(\cos \alpha - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right) = ds \left(\sin \alpha + \frac{\omega^2 s \cdot \cos^2 \alpha}{g} - \frac{Q^2}{\bar{C}^2 R_c h^2 \cdot b^2} \right) \tag{15}$$

остаточно отримуємо:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\sin \alpha + \frac{\omega^2 s \cdot \cos^2 \alpha}{g} - \frac{Q^2}{\bar{C}^2 \cdot b^2 h^2 R_c}}{\cos \alpha - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g}} \tag{16}$$

Рівняння (16) є диференціальним рівнянням, що характеризує зміну товщини шару шихтових матеріалів по довжині лотка БЗП. Рішення задачі Коші для цього рівняння дасть криву поверхні шару шихти на лотку завантажувального пристрою. Знаючи товщину шару при сходженні шихти з вільного кінця лотка і геометрію лотка можна отримати значення швидкості потоку шихтових матеріалів, яка в комплексі з кутом нахилу лотка дає можливість точного розрахунку параметрів засипу поверхні шихти в просторі доменної печі.

Вирішимо задачу Коші для диференціального рівняння (16).

Вирішимо задачу Коші для диференціального рівняння (16).

$$h \rightarrow 0; h = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + \dots \tag{17}$$

$$a_0 = h_0; a_1 = \left. \frac{dh}{du} \right|_{u=0}; a_2 = \left. \frac{d^2 h}{du^2} \right|_{u=0}; a_3 = \left. \frac{d^3 h}{du^3} \right|_{u=0} \quad u = s - s_0 \tag{18}$$

$$h = (A_0 + A_1 u + A_2 u^2) \cdot \frac{1}{1 + B \cdot u} \tag{19}$$

Відомо розкладання в ряд:

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots \tag{20}$$

$$\text{Якщо } x = Bu, \text{ тогдa } \frac{1}{1+Bu} = 1 - Bu + B^2 u^2 - B^3 u^3 + \dots \tag{21}$$

Подібне розкладання для вираження (19) призведе до наступного:

$$h = (A_0 + A_1 u + A_2 u^2) \cdot (1 - Bu + B^2 u^2 - B^3 u^3 + \dots) \tag{22}$$

розкриємо дужки

$$h = A_0 + A_1u + A_2u - A_0Bu - A_1Bu^2 - A_2Bu^3 + A_0B^2u^2 + A_1B^2u^3 + A_2B^2u^4 - A_0B^3u^3 - A_1B^3u^4 - A_2B^3u^5 = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + \dots \quad (23)$$

Знайдемо коефіцієнти відповідних ступенів

$$\begin{cases} A_0 = a_0 & (24) \\ A_1 - A_0B = a_1 & (25) \\ A_2 - A_1B + A_0B^2 = a_2 & (26) \\ -A_2B + A_1B^2 - A_0B^3 = a_3 & (27) \end{cases}$$

З врахуванням того, що $\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta$ (рис. 1), а також $R_z = h$, рівняння (16) приймає вигляд:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\cos\beta + \frac{\omega^2 s \cdot \sin^2 \beta}{g} - \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3}}{\sin\beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g}} \quad (28)$$

Беручи до уваги факт зсипання матеріалу з тічки бункера завантажувального пристрою на лоток з деяким віддаленням від осі обертання і (18) маємо

$$u = s - s_0, \Rightarrow s = u + s_0 \quad (29)$$

де s_0 - зміщення центру зсипання матеріалу на лоток, м;
 s - координата шихтових матеріалів уздовж лотка, м.

Таким чином (28) набуває вигляду

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\cos\beta + \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g}(u + s_0) - \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3}}{\sin\beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g}} \quad (30)$$

Вираз (30) дорівнює коефіцієнту a_1 (17), (18). Для визначення коефіцієнта a_2 необхідно визначити другу похідну $\frac{d^2h}{du^2}$. З метою полегшення знаходження зазначеної похідною позначимо окремо чисельник U та знаменник W виразу (30):

$$U = \cos\beta + \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g}(u + s_0) - \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3} \quad (31)$$

$$W = \sin\beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \quad (32)$$

Таким чином

$$\frac{d^2h}{du^2} = \left(\frac{U}{W} \right)' = \frac{U'W - UW'}{W^2}. \quad (33)$$

Візьмемо похідні виразів (31) и (32)

$$U' = \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g} + \frac{3Q^2}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) \quad (34)$$

$$W' = \frac{3Q^2}{h^4 b^2 g} \left(\frac{dh}{du} \right) \quad (35)$$

Згідно (33)

$$\frac{d^2h}{du^2} = \frac{\left(\frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g} + \frac{3Q^2}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) \right) \cdot \left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right) - \frac{3Q^2}{h^4 b^2 g} \left(\frac{dh}{du} \right) \cdot \left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right)^2}{\left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right)^2} - \quad (36)$$

$$- \frac{\frac{3Q^2}{h^4 b^2 g} \left(\frac{dh}{du} \right) \cdot \left(\cos \beta + \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g} (u + s_0) - \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3} \right)}{\left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right)^2}$$

Аналогічно (33) введемо позначення

$$\frac{d^3h}{du^3} = \left(\frac{U_2}{W_2} \right)' = \frac{U_2'W_2 - U_2W_2'}{W_2^2} \quad (37)$$

Тоді

$$U_2 = \left(\frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g} + \frac{3Q^2}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) \right) \cdot \left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right) - \frac{3Q^2}{h^4 b^2 g} \left(\frac{dh}{du} \right) \cdot \left(\cos \beta + \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta}{g} (u + s_0) - \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3} \right); \quad (38)$$

$$W_2 = \left(\sin \beta - \frac{Q^2}{h^3 b^2 g} \right)^2. \quad (39)$$

Перетворимо U_2 :

$$U_2 = \frac{\omega^2 \cdot \sin^3 \beta}{g} - \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot Q^2}{g^2 b^2 h^3} + \frac{3Q^2 \sin \beta}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^4}{g \cdot C^2 b^4 h^7} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \cos \beta}{g b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \omega^2 \sin^2 \beta (u + s_0)}{g^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) + \frac{3Q^4}{g \cdot C^2 b^4 h^7} \left(\frac{dh}{du} \right) \quad (40)$$

Наведемо подібні:

$$U_2 = \frac{\omega^2 \cdot \sin^3 \beta}{g} - \frac{\omega^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot Q^2}{g^2 b^2 h^3} + \frac{3Q^2 \sin \beta}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \cos \beta}{g b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \omega^2 \sin^2 \beta (u + s_0)}{g^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) \quad (41)$$

Розкриємо квадрат вирази (39):

$$W_2 = \sin^2 \beta - \frac{2 \cdot \sin^2 Q^2}{h^3 b^2 g} + \frac{Q^4}{g^2 b^4 h^6} \quad (42)$$

Знайдемо похідну виразу (41)

$$U_2' = \frac{3Q^2 \omega^2 \sin^2 \beta}{g^2 b^2 h^4} - \frac{12Q^2 \sin \beta}{C^2 b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) + \frac{12Q^2 \cos \beta}{g^2 b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) + \frac{12Q^2 \omega^2 \sin \beta}{g^2 b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) \quad (43)$$

Аналогічно поступимо з (42)

$$W_2' = \frac{6 \cdot \sin \beta \cdot Q^2}{h^4 b^2 g} + \frac{6Q^4}{g^2 b^4 h^7} \quad (44)$$

$$\frac{d^3 h}{du^3} = \frac{U_2' W_2 - U_2 W_2'}{W_2^2} = \frac{\left(\frac{3\omega^2 \cdot \sin^2 \beta \cdot Q^2}{g^2 b^2 h^4} - \frac{12Q^2 \sin \beta}{C^2 b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) + \frac{12Q^2 \cos \beta}{g b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) + \frac{12Q^2 \omega^2 \sin \beta}{g^2 b^2 h^5} \left(\frac{d^2 h}{du^2} \right) \right)}{\left(\sin^2 \beta - \frac{2Q^2 \sin \beta}{g b^2 h^3} + \frac{Q^4}{g^2 b^4 h^6} \right)^2} \times$$

$$\times \left(\sin^2 \beta - \frac{2Q^2 \sin \beta}{g b^2 h^3} + \frac{Q^4}{g^2 b^4 h^6} \right) -$$

$$\frac{\left(\frac{\omega^2 \sin^3 \beta}{g} - \frac{\omega^2 \sin^2 \beta \cdot Q^2}{g^2 b^2 h^3} + \frac{3Q^2 \sin \beta}{C^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \cos \beta}{g b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) - \frac{3Q^2 \cdot \omega^2 \sin \beta (u + s_0)}{g^2 b^2 h^4} \left(\frac{dh}{du} \right) \right)}{\left(\sin^2 \beta - \frac{2Q^2 \sin \beta}{g b^2 h^3} + \frac{Q^4}{g^2 b^4 h^6} \right)^2} \times$$

$$\times \left(\frac{6Q^2 \sin \beta}{g b^2 h^4} - \frac{6Q^4}{g^2 b^4 h^7} \right) \quad (45)$$

Згідно (19) з урахуванням (24), (25), (26), (27) можна отримати:

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{a_2 a_0 + (a_1 a_2 - a_0 a_3)u + (a_2^2 - a_1 a_3)u^2}{a_2 - a_3 u} = \\
 &= \frac{a_2 a_0 + (a_1 a_2 - a_0 a_3)(s - s_0) + (a_2^2 - a_1 a_3)(s - s_0)^2}{a_2 - a_3(s - s_0)} = \\
 &= \frac{a_2 a_0 + a_1 a_2 s - a_1 a_2 s_0 - a_0 a_3 s + a_0 a_3 s_0 + (a_2^2 - a_1 a_3)(s^2 - 2s s_0 + s_0^2)}{a_2 - a_3 s + a_3 s_0}
 \end{aligned} \tag{46}$$

Таким чином, для h отримаємо:

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{a_2 a_0 + a_1 a_2 s - a_1 a_2 s_0 - a_0 a_3 s + a_0 a_3 s_0 + a_2^2 s^2}{a_2 - a_3 s + a_3 s_0} - \\
 &- \frac{2a_2^2 s s_0 + a_2^2 s_0^2 - a_1 a_3 s^2 + 2a_1 a_3 s s_0 - a_1 a_3 s_0^2}{a_2 - a_3 s + a_3 s_0}
 \end{aligned} \tag{47}$$

Спростимо рівняння для більш зручного використання при побудові графіків рівня засипу шихти на лотку представивши (47) у вигляді:

$$h(s) = \frac{\xi \cdot s^2 + \psi \cdot s + \delta}{\chi \cdot s + \varepsilon}, \tag{48}$$

де

$$\xi = a_2 a_0 - a_1 a_2 s_0 + a_0 a_3 s_0 + a_2^2 s_0^2 - a_1 a_3 s_0^2, \tag{49}$$

$$\psi = a_1 a_2 - a_0 a_3 - 2a_2^2 s_0 + 2a_1 a_3 s_0, \tag{50}$$

$$\delta = a - a_1 a_3, \tag{51}$$

$$\chi = -a_3, \tag{52}$$

$$\varepsilon = a_2 + a_3 s_0 \tag{53}$$

Висновки.

Отримано рівняння, що дозволяє розраховувати висоту засипу шихтових матеріалів на лотку завантажувального пристрою доменної печі в будь-якому його перерізі. Це дає змогу розраховувати ряд важливих величин. По-перше це центр мас осевого перетину потоку шихти. Координата центра мас визначає статичні та динамічні навантаження для підвісу лотка та силові фактори, що

виникають у елементах приводів обертання та підйому лотка-розподільника. По-друге, важливою характеристикою є висота засипу шихти на лотку на кінцевому його поперечному перерізі. Знаючи геометричні параметри кінця лотка, миттєву витрату сипких шихтових матеріалів з'являється можливість точного аналітичного розрахунку швидкості сходу шихтових матеріалів з лотка в колошниковий простір доменної печі. Це, в свою чергу, визначає траєкторії руху матеріалу в колошниковому просторі та координату падіння потоку шихти на поверхню засипу.

Отримані дані та залежності дають змогу більш ефективно складати програми завантаження доменної печі та ефективно корегувати її хід враховуючи гранулометрію та фізико-механічні властивості матеріалу, що завантажуються в піч. Крім того, з'являються підвалини для корегування управляючих чинників (кута нахилу лотка-розподільника, величина відкриття шихтового затвору бункерів) в процесі завантаження порції шихти з врахуванням зміни крупності матеріалу. Це забезпечує більшу рівномірність укладки одного виду матеріалу на інший.

Усі перераховані вище чинники дають змогу оперативного корегування параметрами завантаження доменної печі в процесі плавки та гарантованого дотримання проектного рудного навантаження.

Бібліографічний опис.

1. В.И. Большаков, И.Е. Варивода, Н.А. Рослик Ф.М. Шутылев. Влияние движения шихты по трактам загрузочного устройства на окружное распределение в доменной печи. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научных трудов Киев. «Наукова думка» 1995. С. 57 - 68.
2. В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, А.С. Сало. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. Сборник научных трудов Вопросы производства чугуна в доменных печах МЧМ СССР (ИЧМ) М. Металлургия, 1984г.
3. А.Н. Селегей, В.И. Головки, М.А. Рыбальченко, И.Г. Тригуб, И.А. Маначин. К вопросу создания информационной модели загрузки шихты в доменную печь. Збірник наукових праць національного гірничого університету № 52. Стр. 272-278. ISSN 2071-1859.

4. Кирия Р.В. Математические модели движения сыпучей среды по элементам перегрузочных узлов ленточного конвейера // Системные технологии. Математические проблемы технической механики. Сб. науч. трудов. - Днепропетровск. - Вып. 2(19). - 2002. - С. 29-42.
5. Кирия Р.В., Богданов В.М. О движении сыпучей среды по наклонному лотку // Науковий вісник НГУ України. - Днепропетровск. - 2001. - Вып. № 3. - С. 47-51.
6. Константинов Ю.М. Гидравлика. - Киев: Вища школа, 1981. - 360 с.
7. Штернлихт Д.В. Гидравлика. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 639 с.

Reference

1. V.I. Bolshakov, I.E. Varivoda, N.A. Roslik F.M. Shutylev. Vliyanie dvizheniya shihty po trak-tam zagruzochnogo ustrojstva na okruzhnoe raspredelenie v domennoj pechi. Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. Sb. nauchnyh trudov Kiev. «Naukova dumka» 1995. S. 57 - 68.
2. V.I. Bolshakov, A.Yu. Zarembo, A.S. Salo. Metodika rascheta parametrov shoda shihty s rasp-redelitel'nogo lotka. Sbornik nauchnyh trudov Voprosy proizvodstva chuguna v domennyh pe-chah MChM SSSR (IChM) M. Metallurgiya, 1984g.
3. A.N. Selegej, V.I. Golovko, M.A. Rybalchenko, I.G. Trigub, I.A. Manachin. K voprosu sozdaniya informacionnoj modeli zagruzki shihty v domennuyu pech. Zbirnik naukovih prac nacional-nogo gornichogo universitetu № 52. Str. 272-278. ISSN 2071-1859.
4. Kiriya R.V. Matematicheskie modeli dvizheniya sypuchej sredy po elementam peregruzochnyh uz-lov lentochn - go konvejera // Sistemnye tehnologii. Matematicheskie problemy tehnicheckoj mehaniki. Sb. nauch. trudov. - Dnepropetrovsk. - Vyp. 2(19). - 2002. - S. 29-42.
5. Kiriya R.V., Bogdanov V.M. O dvizhenii sypuchej sredy po naklonnomu lotku // Naukovij visnik NGU Ukrayini. - Dnepropetrovsk. - 2001. - Vyp. № 3. - С. 47-51.
6. Konstantinov Yu.M. Gidravlika. - Kiev: Visha shkola, 1981. - 360 s.
7. Shternliht D.V. Gidravlika. - M.: Energoatomizdat, 1984. - 639 s.

Стаття поступила: 17.12.2019