

Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2019, vol. 38, pp. 23-30. doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181270.

14. Maslov V.A., Pustovalov Yu.P., Trofimova L.A., Dan L.A. Issledovanie processa okisleniya dispersnyh zhelezografitovyh othodov s cel'yu polucheniya soedinenij interkalirovaniya grafita [The study of oxidation process of dispersed Fe-C containing waste to obtain intercalation compounds of graphite]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences, 2016, vol. 32, pp. 48-53. (Rus.)*

Рецензент: В.Б. Семакова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.04.2021

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240575

© Чупринов Є.В.¹, Лялюк В.П.², Журавльов Ф.М.³,
Швед С.В.⁴, Василенко І.А.⁵

АЕРОДИНАМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПО КРУПНОСТІ

Розглянуто можливість організації повітряної класифікації обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції. Досліджено особливості вибору конструктивних умов аеродинамічного сортування окатишів, що забезпечують максимальні і достатні відстані між частинками різних розмірів на встановленому горизонті для сортування окатишів за їх розмірами. Теоретично показана можливість класифікації обпалених окатишів повітряним потоком з відділенням необхідних крупності і кількості фракцій при їх вивантаженні зі стрічкового конвеєра.

Ключові слова: окатиші, класифікація, повітряний потік, аеродинаміка, моделювання.

E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, F.M. Zhuravlev, S.V. Shved, I.A. Vasylenko. Aerodynamic separation of iron ore pellets by size. The studies on reheating of fired pellets of a suitable fraction used in the bottom and side beds have been analyzed. It has been shown that due to the loss of the crystallization of the glass iron silicate bond, the strength of the pellets decreases at their reduction and their destruction in the metallurgical unit increases, thus leading to a deterioration in its performance. It has been concluded that for the bed, it is necessary to purposefully separate the fraction of the pellets of the required size that does not fall into the finished product. The ways of organizing air classification of fired pellets in open warehouses of finished products have been studied and the possibility of its organization has been considered. The particle trajectories and the factors influencing this process have been analyzed. It has been shown that an important charac-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

⁵ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, innav@i.ua

teristic of the particles dispersion is the influence of the ratio of the coefficient of viscous resistance to the flight of a particle in the air to the mass of a particle, as a result of which an initially flat flow for the particles of different sizes will disintegrate into a fan. This fan of the particles scattering at a certain height can be used to sort them by size class. The conditions have been determined under which the dispersion of the fan of the particles in the horizontal plane will be maximum. Equations have been proposed to describe the law of motion of particles before hitting the jet and after having been blown off by the jet. Mechanisms have been developed for selecting design conditions under which the horizontal distances between the particles of different sizes (the difference of the corresponding coordinates) at the set horizon will be maximum and sufficient for sorting the particles by their size. The visualization of the process of the particle scattering in the MathCAD software environment has been performed, which makes it possible for the technologist to set the initial conditions he needs and to obtain clearly presented final results of the motion of a fan of the particles of different sizes that are clear to him.

Keywords: pellets, classification, air flow, aerodynamics, modelling.

Постановка проблеми. Після термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині, охолоджені обпалені окатиші поділяються на трьохпродуктовому вібраційному грохоті на три наступні фракції: 0-5 мм – дріб'язок, що не придатний для металургійного використання та є обпаленим зворотом, що направляється після подрібнення в шихту, 5-10 мм – проміжна фракція, яку направляють в готову продукцію, а також 10-16 мм, 10-18 мм, 10-20 мм або 10-25 мм – основна фракція для донної і бортової постілі і готової продукції [1].

Кожна з виділених фракцій використовується згідно вимог відпрацьованої технології термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині і вимог подальшого використання отриманих обпалених окатишів в різних металургійних агрегатах для їх відновлення в доменній і бездоменній металургії заліза. Крім того, як показали дослідження, повторний нагрів обпалених окатишів придатної фракції, що використовувались в донній і бортовій постілі, за рахунок розкристалізації скляної залізісилікатної зв'язки, знижує їх міцність при відновленні і збільшує їх руйнування в металургійному агрегаті, погіршуючи показники його роботи. Тому для постілі потрібно цілеспрямовано відокремлювати фракцію окатишів необхідної крупності, що не включається в готову продукцію [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Донна постіль використовується для запобігання забивання живого перетину колосникового поля обпалювального візка сирими окатишами, захисту колосників від перегріву в високотемпературних зонах горна, поліпшення якості готового продукту за рахунок створення раціональної мінімальної різниці температури на кордоні шар-постіль і верху шару, а також для підвищення ступеня термозміцнення сирих окатишів нижньої частини шару. Бортова постіль використовується для поліпшення якості обпалення сирих окатишів у бортів випалювальних візків, вирівнювання ступеня термозміцнення сирих окатишів по ширині машини і захисту бортів випалювальних візків від перегріву в високотемпературних зонах горна. Кількість донної і бортової постілі становить 30-35% від маси готової продукції [2].

Через низьку ефективність грохотів розділити обпалені окатиші на зазначені фракції якісно не представляється можливим. Свого часу авторами роботи [3] запропонований спосіб повітряної класифікації агломерату і обпалених окатишів, для чого була створена конструкція промислового повітряного класифікатора і встановлена можливість ефективної класифікації обпалених окатишів в повітряному середовищі перед відвантаженням готової продукції споживачам з відділенням некондиційної дрібної фракції (-5 мм).

Мета статті – розробка способу класифікації обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції.

Викладення основного матеріалу. При сьогоднішній продуктивності гірничозбагачувальних комбінатів з виробництва окатишів необхідно мати велику кількість повітряної класифікації обпалених окатишів, що не є раціональним. Найбільш просто організувати повітряну класифікацію обпалених окатишів на відкритих складах готової продукції.

Розглянемо можливість такої класифікації. Нехай плоский одношаровий потік сферичних

частинок однакової щільності, але різного розміру, викидається під деяким кутом до горизонту з деякою початковою швидкістю. Кожна частка потоку під дією аеродинамічного опору в нерухомому повітрі відхиляється вниз більш істотно, ніж при вільному польоті в умовах безповітряного середовища. Відомо, що на траєкторію польоту в повітрі, в кінцевому рахунку, впливає відношення коефіцієнта в'язкого опору польоту частки в повітрі до маси частки. Внаслідок відмінності зазначеного відношення для частинок різного розміру спочатку плоский потік розпадеться в віяло. Віяло розльоту частинок на деякій його висоті можна використовувати для їх сортування по класам крупності. Визначимо умови, при яких дисперсія віяла частинок в горизонтальній площині буде максимальною.

Закон руху, а, отже, і траєкторія руху кожної частинки в прямокутній системі координат (рис. 1) визначається з системи рівнянь:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{1}{m} F_x \\ \ddot{y} = -g - \frac{1}{m} F_y \end{cases}, \quad (1)$$

де \ddot{x} , \ddot{y} – прискорення частинок уздовж відповідних осей координат, м/с^2 ; F_x , F_y – сила аеродинамічного опору руху частки в проекціях на відповідні осі координат, Н; m і g – відповідно, маса частинки, кг і прискорення вільного падіння, м/с^2 .

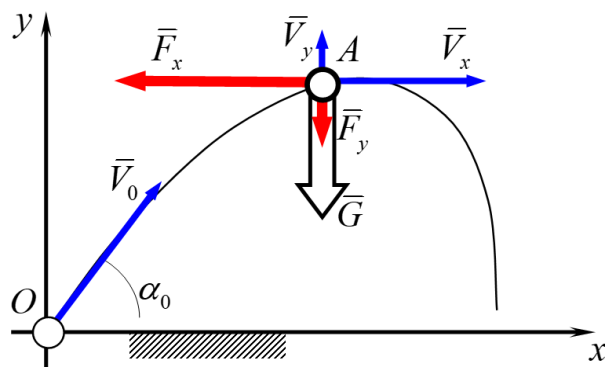


Рис. 1 – Розрахункова схема сил

Маса частинки може бути виражена через її характерний розмір d , мм і щільність її матеріалу ρ_0 , кг/м^3 :

$$m = \rho_0 \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} = \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3. \quad (2)$$

Проекції сили аеродинамічного опору пропорційні квадратам відповідних проекцій швидкості частинки v_x і v_y , м/с :

$$\begin{cases} F_x = c \cdot \frac{\rho \cdot v_x^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \\ F_y = c \cdot \frac{\rho \cdot v_y^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \end{cases}, \quad (3)$$

де c – безрозмірний коефіцієнт аеродинамічного опору кулі; ρ – масова густина повітря при нормальних умовах, кг/м^3 .

Підставимо (2) і (3) в (1) і в результаті отримаємо:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2 \\ \ddot{y} = -g - \frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2 \end{cases}. \quad (4)$$

Визначення диференціального рівняння $\ddot{x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2$ з (4) послідовно набуде вигляду:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_x^2 = 0,$$

$$\int \frac{1}{v_x^2} \cdot \partial v_x = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot \int \partial t,$$

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t + C.$$

При $t = 0$, $v_x = v_0 \cdot \cos \alpha_0$. Звідки $C = -\frac{1}{v_0 \cdot \cos \alpha_0}$.

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t - \frac{1}{v_0 \cdot \cos \alpha_0},$$

$$v_x = \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d}, \quad (5)$$

$$x = \int \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d} \partial t,$$

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0}{\rho_0 d} \cdot t + 1 \right) + C.$$

При $t = 0$, $x = 0$. Звідки $C = 0$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж горизонтальної осі координат набуде вигляду:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0}{\rho_0 d} \cdot t + 1 \right). \quad (6)$$

Рішення диференціального рівняння $\ddot{y} = -g - \frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2$ з (4) послідовно прийме наступний вигляд:

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot v_y^2 - g,$$

$$x = \int \frac{v_0 \cos \alpha_0 \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot t + \rho_0 d} \partial t,$$

$$\int \frac{\rho_0 d}{0,424 v_y^2 + g \rho_0 d} \partial v_y = -\int \partial t,$$

$$1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_y}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) = -t + C. \quad (7)$$

При $t = 0$, $v_y = v_0 \cdot \sin \alpha_0$. Звідки $C = 1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)$.

З (7) знаходимо:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left(\frac{C - t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right).$$

З урахуванням знайденого значення постійної інтегрування отримуємо

$$v_y = \frac{\sqrt{g\rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]. \quad (8)$$

Далі проводимо друге послідовне інтегрування.

$$y = \frac{\sqrt{g\rho_0 d}}{0,651} \cdot \int \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right] dt,$$

$$y = -1,18\rho_0 d \cdot \ln \left\{ 1 + \tan \left[\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right\} + C.$$

При $t = 0, y = 0$. Звідки $C = 1,18\rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right)^2 \right]$.

Таким чином, закон зміни вертикальної координати в часі набуде вигляду:

$$y = -1,18\rho_0 d \cdot \ln \left\{ 1 + \tan \left[\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right\} + 1,18\rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g\rho_0 d}} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Інтерпретація отриманих результатів показує, що в межах допустимих висот падіння частинок, віяло їх розльоту в горизонтальній площині занадто вузьке, щоб використовувати його для сортування по крупності (рис. 2).

Для збільшення ширини віяла розльоту частинок по крупності слід впливати на них додатковим вузьконаправленим потоком повітря. Проведемо вибір параметрів цього додаткового потоку, з метою розширення віяла їх розльоту. Визначимо параметри повітряного потоку з метою аеродинамічного поділу частинок за фракціями.

Для вирішення поставленої задачі в певній точці B траєкторії польоту частинок під кутом α_B до нього прикладається імпульсний вплив \bar{U} , м/с, плоским струменем стисненого повітря (рис. 3).

Розглянемо імпульс, отриманий частинкою від дії струменя, і подальшу траєкторію частинок. Рух від точки O (вильоту) до точки B (зустрічі зі струменем) є визначеним (рис. 3). Це означає, що в точці B (за траєкторією руху частинки) проекції швидкості частинки на вісі координат також відомі і визначаються закономірностями (5) і (8).

Нехай ширина струменя становить L , м, а швидкість струменя в зазначеному напрямку становить \bar{v}_u , м/с. Тоді з огляду на обмеженість товщини струменя можна визначити час t_u , с, протягом якого частка буде перебувати під дією аеродинамічних сил з боку струменя:

$$t_u = \frac{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}}{s}, \quad (10)$$

де s , мм – товщина струменя в напрямку результуючої швидкості частинки після досягнення нею точки B .

Далі визначимо величину аеродинамічної сили в проекціях на осі обраної системи координат відповідно до формули (3) і обраними позначеннями:

$$\begin{cases} F_{ux} = c \cdot \frac{\rho \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ F_{uy} = c \cdot \frac{\rho \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases} \quad (11)$$

Імпульс, отриманий частинкою за час дії струменя в проекціях на осі координат, складе величину:

$$\begin{cases} U_x = t_u F_{ux} = 0,071 \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ U_y = t_u F_{uy} = 0,071 \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases} \quad (12)$$

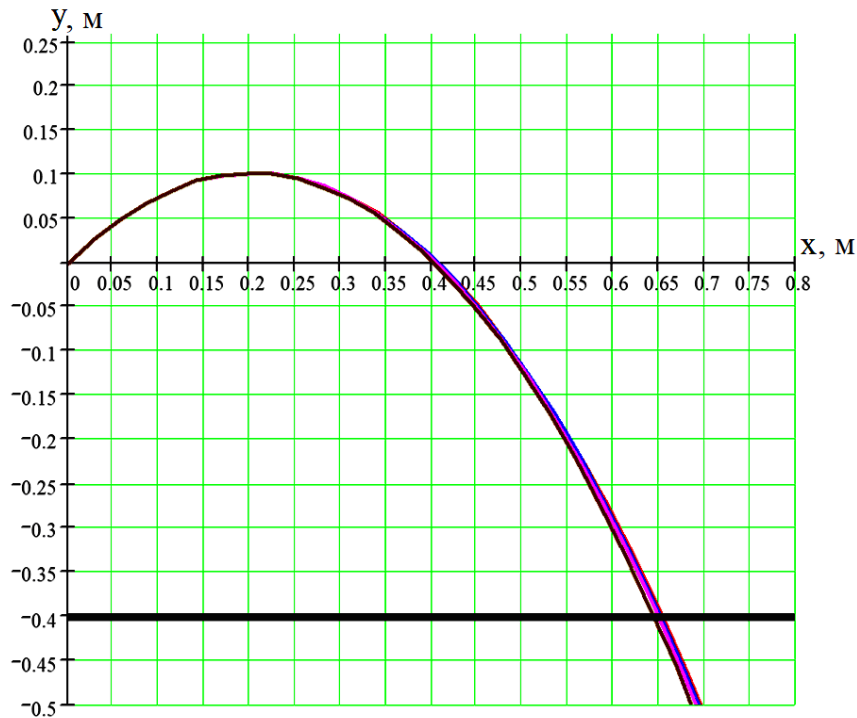


Рис. 2 – Траєкторії розльоту частинок в нерухомому повітрі «при нормальних умовах». Шкала розмірів в метрах, кут вильоту 45° (найбільше широкий розліт), початкова швидкість 2 м/с

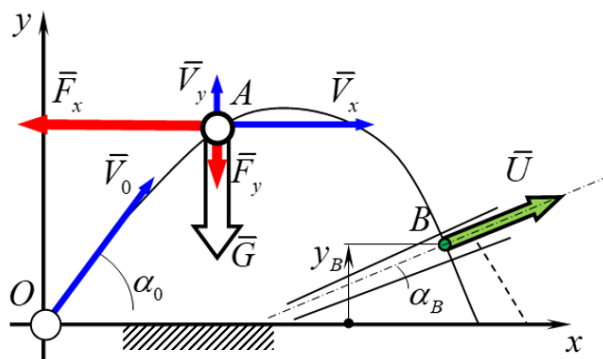


Рис. 3 – Розрахункова схема сил при імпульсному здуванні частинок

Швидкість струменя може бути обрана довільно. У зв'язку з цим вплив аеродинамічної сили з боку струменя на рух частинки може виявитися як завгодно істотним. Розраховане по (12) значення імпульсу передається від плоского струменя частинки і розганяє її у відповідному напрямку, спотворюючи траєкторію її падіння. В результаті з'являється можливість визначення швидкості, придбаной в результаті короткої дії струменя.

Вважаємо, що в процесі прикладення імпульсу з боку струменя, швидкість частинки у відповідних напрямках залишається в рамках закономірностей (5) і (8). Проекції швидкості точки після придбаного нею імпульсу позначимо v_{Bux} і v_{Buy} , м/с. Ці проекції відповідно визначимо з теореми про зміну кількості руху матеріальної точки (частки) в проекціях на осі координат:

$$\begin{cases} m(v_{Bux} - v_{Bx}) = U_x \\ m(v_{Buy} - v_{By}) = U_y \end{cases};$$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3 (v_{Bux} - v_{Bx}) = 0,071 \cdot v_u^2 (\cos \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} \\ \frac{\pi}{6} \rho_0 \cdot d^3 (v_{Buy} - v_{By}) = 0,071 \cdot v_u^2 (\sin \alpha_u)^2 \pi d^2 \frac{s}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} \end{cases};$$

$$\begin{cases} v_{Bux} = \frac{0,426 \cdot s}{\rho_0 \cdot d} \cdot \frac{v_u^2 (\cos \alpha_u)^2}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\cos \alpha_u}{|\cos \alpha_u|} + v_{Bx} \\ v_{Buy} = \frac{0,426 \cdot s}{\rho_0 \cdot d} \cdot \frac{v_u^2 (\sin \alpha_u)^2}{\sqrt{v_{Bx}^2 + v_{By}^2}} \cdot \frac{\sin \alpha_u}{|\sin \alpha_u|} + v_{By} \end{cases} \quad (13)$$

Отримані значення швидкостей приймаємо за проекції початкової швидкості частинки на новому етапі її руху, починаючи від точки B . Вертикальна координата положення точки B , як впливає з рис. 3, задається конструктивно. Тоді горизонтальна координата визначається з системи рівнянь на підставі закону руху (6) і (9):

$$\begin{cases} x_B = 2,358 \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_0 \cos \alpha_0 \cdot T_B + 1}{\rho_0 d} \right) \\ y_B = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left[\frac{0,651 v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot T_B}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]^2 \right] + 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 v_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (14)$$

Використовуючи рівняння вертикальної координати y_B (14) визначаємо момент часу T_B проходження точки B . Потім, підставляючи момент T_B проходження точки B у рівняння (14), розраховуємо горизонтальну координату x_B .

Отже, початкове положення частинки при її русі на цьому етапі знаходиться в точці B (x_B ; y_B), а початкові швидкості відповідають закономірності (13). У такому випадку для визначення закону руху частинок на цьому етапі скористаємося методикою, наведеною вище, – без впливу на частинки повітряного потоку. Відмінність полягатиме лише в тому, що постійні інтегрування будуть визначатися за швидкістю і положенням частинки після отримання імпульсу в точці B . Зробимо перерахунок відповідних постійних інтегрування і на цій основі скорегуємо кінцеві закономірності. Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування горизонтальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього такі:

$$-\frac{1}{v_x} = -\frac{0,424}{\rho_0 d} \cdot t + C.$$

При $t = 0$, $v_x = v_{Bux}$. Звідки $C = -\frac{1}{v_{Bux}}$.

$$v_x = \frac{v_{Bux} \cdot \rho_0 d}{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + \rho_0 d}. \quad (15)$$

Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування горизонтальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього приймуть вигляд:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + 1}{\rho_0 d} \right) + C.$$

При $t = 0$, $x = x_B$. Звідки $C = x_B$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж горизонтальної осі координат на другому етапі польоту після імпульсної дії струменя набуде вигляду:

$$x = 2,358 \cdot \rho_0 d \cdot \ln \left(\frac{0,424 \cdot v_{Bux} \cdot t + 1}{\rho_0 d} \right) + x_B. \quad (16)$$

Нижче представлено вихідне рівняння для розрахунку постійної інтегрування вертикальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього.

$$1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_y}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) = -t + C. \quad (17)$$

При $t = 0$, $v_y = v_{Buy}$. Звідки $C = 1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}} \cdot \arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)$.

З рівняння (17) знаходимо закон зміни швидкості на другому етапі польоту частинки:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left(\frac{C - t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right).$$

Після підстановки знайденого значення постійної інтегрування отримаємо:

$$v_y = \frac{\sqrt{g \rho_0 d}}{0,651} \cdot \tan \left[\arctan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right) - \frac{t}{1,536 \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right]. \quad (18)$$

Початкове рівняння для розрахунку постійної інтегрування вертикальної проекції швидкості частинки і граничні умови для нього матимуть вигляд:

$$y = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right)^2 \right] + C.$$

При $t = 0$, $y = y_B$. Звідки $C = 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] + y_B$.

Таким чином, закон руху частинки вздовж вертикальної осі координат на другому етапі польоту після імпульсної дії струменя набуде вигляду:

$$y = -1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} - \frac{0,651 \cdot t}{\sqrt{\frac{\rho_0 d}{g}}} \right)^2 \right] + 1,18 \rho_0 d \cdot \ln \left[1 + \tan \left(\frac{0,651 \cdot v_{Buy}}{\sqrt{g \rho_0 d}} \right)^2 \right] + y_B. \quad (19)$$

Законом руху частинки з урахуванням обох етапів руху (до потрапляння на струмінь і пі-

сля здуву струменем) є сукупність виразів (6), (9), (16) і (19). Перехід з одного етапу в інший відбувається в точці з координатами (14). Кінцеві параметри першого етапу є початковими для другого (13). Цільовою функцією дослідження є вибір таких конструктивних умов, при яких горизонтальні відстані між частинками різних розмірів (різниця відповідних координат) на встановленому горизонті будуть максимальними і достатніми для сортування частинок за їх розмірами. У зв'язку з різноманіттям технологічних можливостей конкретного виробництва, цільову функцію нескладно знаходити за допомогою візуалізації в програмному середовищі MathCAD. При цьому користувач програми задає потрібні йому початкові умови і в результаті отримує зрозумілі йому наочно представлені кінцеві результати руху віяла частинок різного розміру (попередньо задається користувачем програми).

Результат візуалізації одного з віртуальних експериментів з набором конструктивних параметрів показаний на рис. 4.

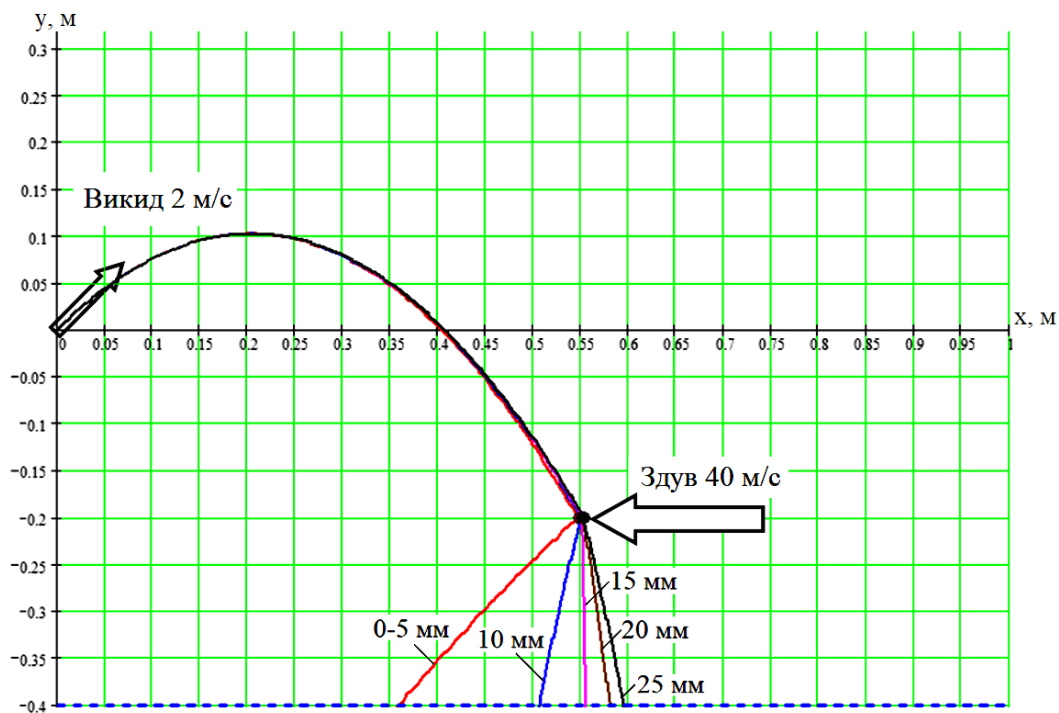


Рис. 4 – Траєкторії розльоту одношарового потоку окатишів різної крупності при їх здуві плоским струменем повітря (шкала розмірів в метрах). Швидкість струменя 40 м/с. Кут вильоту потоку окатишів до горизонту 45° , а його початкова швидкість 2 м/с

У віртуальному експерименті товщина повітряного потоку в зоні попадання на одношаровий потік обпалених окатишів різного діаметру прийнята 150 мм. Для розрахунку використана наступна градація діаметрів окатишів 0-5 мм; 10 мм; 15 мм; 20 мм і 25 мм.

Висновки

Проведені аналітичні дослідження показують реальну можливість класифікації обпалених окатишів повітряним потоком з відділенням необхідних крупності і кількості фракцій при їх вивантаженні зі стрічкового конвеєра під певним кутом і з певною швидкістю вильоту окатишів.

Перелік використаних джерел:

1. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей. Технология. Оборудование / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Марат. – 2004. – 280 с.
2. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной ме-

таллургии железа : учебник / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. – 663 с.

3. Дурнов В.К. Воздушная классификация агломерата и окатышей / В.К. Дурнов, Н.М. Бабушкин, А.М. Штейнберг // Сталь. – 1981. – № 5. – С. 6-8.

References:

1. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo okislennykh okatyshej. Tekhnologiya. Oborudovanie* [Production of oxidized pellets. Technology. Equipment]. Ekaterinburg, Marat Publ., 2004. 280 p. (Rus.)
2. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Morkun V.S., Chuprinov E.V., Kassim D.A. *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnyk* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast-furnace and blast-furnace metallurgy of iron: textbook]. Krivoy Rog, Izdatel Chernyavskiy D.A. Publ., 2020. 663 p. (Rus.)
3. Durnov V.K., Babushkin N.M., Shtejnberg A.M. *Vozdushnaya klassifikaciya aglomerata i okatyshej* [Air classification of sinter and pellets]. *Stal' – Steel*, 1981, no. 5, pp. 6-8. (Rus.)

Рецензент: О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф. ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.04.2021

УДК 739.4

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240578

© Аніщенко О.С.¹, Гущин А.В.², Кухар В.В.³, Присяжний А.Г.⁴

ВРАХУВАННЯ ПРУЖИНЕННЯ ПРИ ХУДОЖНЬОМУ КУВАННІ ВОЛЮТОПОДІБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для волюти у вигляді спіралі Архімеда, яка умовно поділена на 5 ділянок, наведений алгоритм розрахунків збільшення радіусів та кутів гнуття кожної з ділянок. Розрахунки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше відношення радіусу гнуття до товщини для кожної ділянки волюти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації. Значне пружинення фіксується, якщо радіуси гнуття та товщина відрізняються майже на порядок.

Ключові слова: пружинення, волюта, радіус гнуття, кут гнуття, степенева функція.

O.S. Anishchenko, A.V. Hushchyn, V.V. Kukhar, A.G. Prysiazhnyi. Taking into account springing in art forging of volute products. The article shows that bending of volutes consists of two stages. At the stage of loading there is an elastic and plastic deformation of the workpiece. Elastic deformation is described by a linear function (Hooke's law), plastic deformation is described by an exponential function of strain stress in the workpiece. In the second stage of bending a partial restoration of the original shape of the workpiece takes place. For a volute in the form of an Archimedes spiral, which is conditionally divided into 5 sections, an algorithm for calculating the increase in radii

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, aas540628@gmail.com

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, titan482@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0002-4863-7233,kvv.mariupol@gmail.com)

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [ORCID: 0000-0001-8062-075X, agr87514@gmail.com](mailto:ORCID:0000-0001-8062-075X,agr87514@gmail.com)