

© В.М. Куваєв<sup>1</sup>, І.К. Младецький<sup>1</sup>, М.В. Куваєв<sup>2</sup>, О.О. Березняк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

<sup>2</sup> ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ», Дніпро, Україна

## ГІДРАВЛІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ В СПІРАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРАХ. ЧАСТИНА 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗЛИВУ СПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

©V. Kuvaiev<sup>1</sup>, I. Mladetskyi<sup>1</sup>, M. Kuvaiev<sup>2</sup>, O. Berezniak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> FLIGHT CONTROL LLC, Dnipro, Ukraine

### HYDRAULIC SEPARATION IN SPIRAL CLASSIFIERS. PART 2. METHODOLOGY FOR CALCULATING TECHNOLOGICAL INDICATORS OF A SPIRAL CLASSIFIER OVERFLOW

**Мета.** Апробувати математичну модель спірального класифікатора, яка адекватно відображає фізичні явища, що відбуваються в ньому. Це дозволить оперативно і точніше ідентифікувати розділові властивості класифікатора за крупністю шляхом чисельного моделювання показника розділення в зливному продукті. Ідентифікація може бути виконана за допомогою функцій розподілу частинок за крупністю, які визначаються однопараметричним законом розподілу через те, що в зливні зосереджуються досить дрібні частинки.

**Методика дослідження.** Аналітичний розрахунок всіх необхідних показників технологічного процесу класифікації для визначення індикативної крупності у зливні класифікатора на основі методики розрахунку, викладеної у частині першій даної роботи.

**Результати дослідження.** Ілюстрація послідовності розрахунків є результатом досліджень щодо ідентифікації змін роботи спірального класифікатора, які оцінюються на підставі часткових похідних від математичної моделі за режимними параметрами класифікації.

**Наукова новизна.** Доведено, що через параметри, що спостерігаються при роботі спірального класифікатора, може бути вираховано індикативну крупність – теоретично максимальний діаметр частинок твердого, які можуть знаходитися у зливні класифікатора, що забезпечує підвищення точності ідентифікації його сепараційного режиму. Показано суттєвий вплив температури води в зливні класифікатора на його поточну сепараційну характеристику.

**Практичне значення.** Використання такого параметра як індикативна крупність частинок в зливні класифікатора для аналізу режиму його роботи дозволяє підвищити точність ідентифікації його поточної сепараційної характеристики на 8-12% в порівнянні з використанням такого показника як густина зливу класифікатора.

**Ключові слова:** індикативна крупність розділення, класифікація, пульпа, злив класифікатора, вміст магнетиту в руді, густина руди, густина пульпи, розподіл частинок за крупністю.

**Вступ.** Аналітичне дослідження класифікації в спіральних класифікаторах використовує безліч параметрів як продукту, що переробляється, так і режимних параметрів роботи. Функціональне перетворення вхідних параметрів класифікації у вихідні передбачає створення деякої методики, яка вимагає підтвердження

її відповідності процесу, який моделюється. У цій роботі виконано деякі уточнюючі функціональні перетворення та розрахунки результуючого показника класифікації – індикативної крупності твердого у зливні класифікатора. Результати розрахунків підтверджують прийняті теоретичні передумови до виконаного дослідження.

Використання розробленої раніше математичної моделі [1] для прогнозування показників збагачення руд передбачає у якості вихідної інформації використовувати такі показники параметрів руди та технологічних режимів, котрі доступні прямому або опосередкованому контролю. Коректність моделі буде доведено, якщо розрахункові вихідні показники будуть близькими до одержаних під час натурних випробувань в умовах, подібних до розрахункових.

**Мета роботи** полягає у чисельному визначенні єдиного показника розділення продукту в зливні класифікатора за крупністю.

**Матеріали та результати досліджень.** Спочатку необхідно ідентифікувати параметри вихідної руди.

Продуктивність млина за вихідною рудою  $Q_p$  [кг/с] контролюється конвеєрними вагами шляхом вимірювання погонної маси  $m_{p\_\Delta t}$  [кг/м] ділянки потоку руди та швидкості стрічки конвеєра  $V_c$  [м/с]:

$$Q_p = m_{p\_ \Delta t} \cdot V_c \text{ [кг/с]}.$$

*Розрахунок параметрів зливу спірального класифікатора (сталій режим).*

Вважатимемо наступні параметри заданими:  $Q_{Пс}$  – потокова масова продуктивність класифікатора за пісками (твердим);  $Q_p$  – потокова масова продуктивність за рудою (твердим), кг/с;  $Q_{в\_р}$  – масова поточна подача води до класифікатора, кг/с;  $Q_{в\_п}$  – поточна масова подача води до піскового жолоба, кг/с;  $Q_{в\_м}$  – поточна подача води безпосередньо до млина, кг/с;  $Q_{в\_кc}$  – поточна подача води безпосередньо до класифікатора, кг/с;  $\rho_{p(сх)}$  – густина руди, кг/м<sup>3</sup>.

*Розрахунок густини пульпи зливу класифікатора*

Кількість твердого у зливні класифікатора:

$$Q_{Тзл\_кc} = Q_p. \quad (1)$$

Кількість води у зливні класифікатора:

$$Q_{Взл\_кc} = Q_{в\_п} + Q_{в\_м} + Q_{в\_кc}. \quad (2)$$

Об'ємна витрата зливу класифікатора:

$$W_{V\_кc} = \frac{Q_{Тзл\_кc}}{\rho_{p(сх)}} + \frac{Q_{Взл\_кc}}{\rho_{в}}. \quad (3)$$

Масову продуктивність класифікатора по зливу визначаємо за формулою:

$$Q_{М\_кc} = Q_{Тзл\_кc} + Q_{Взл\_кc}. \quad (4)$$

Густина пульпи зливу класифікатора:

$$\rho_{\text{зл\_кк}} = \frac{Q_{\text{М\_кк}}}{W_{\text{V\_кк}}}. \quad (5)$$

Густина руди  $\rho_p$  може бути розрахована наступним чином. Припустимо, руда магнетитова, і складається з двох компонентів: рудного, густиною  $\rho_m$  і нерудного з густиною  $\rho_n$ . Вміст цінного мінералу у руді становить  $\alpha$ . Густина рудного куска на цій підставі обчислюється за співвідношенням:

$$\rho_T = \frac{\rho_m \cdot \rho_n}{\rho_m - \alpha \cdot (\rho_m - \rho_n)}. \quad (6)$$

Крім того, не слід нехтувати класичним визначенням густини за відношенням маси  $P_T$  й об'єму  $V_T$ :  $\rho_T = P_T/V_T$ . Використовуючи даний метод, вимірюємо густину куска руди шляхом зважування для визначення його маси та за допомогою мензурки з водою для визначення об'єму.

Якщо є продукти збагачення з різними значеннями вмісту корисного компонента –  $\alpha_1, \alpha_2$ , отримані з однієї і тієї ж руди, то густини цих продуктів будуть різні. На цій підставі можна визначити густини складових компонентів руди.

Припустимо, що було проведено два вимірювання густини руди, отримано відповідно два значення –  $\rho_1, \rho_2$ , та визначено вмісти магнетиту в цих двох пробах – відповідно,  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . Вирішимо рівняння (6) відносно однієї із складових, припустимо, це буде  $\rho_m$ :

$$\rho_m = \frac{-\alpha \cdot \rho_p \cdot \rho_n}{\rho_p \cdot (1 - \alpha) - \rho_n}.$$

Позначимо:  $\alpha \cdot \rho_p = A$ ,  $(1 - \alpha) \cdot \rho_p = B$ , і на підставі двох вимірювань отримаємо:

$$\rho_m = \frac{A_1 \cdot \rho_n}{B_1 - \rho_n} = \frac{A_2 \cdot \rho_n}{B_2 - \rho_n}.$$

Вирішення цього рівняння дасть шукане значення густини нерудного включення:

$$\rho_n = \frac{A_1 \cdot B_2 - A_2 \cdot B_1}{A_1 - A_2}; \quad (7)$$

$$\alpha_1 \cdot \rho_{p1} = A_1; \alpha_2 \cdot \rho_{p2} = A_2;$$

$$(1 - \alpha_1) \cdot \rho_{p1} = B_1; (1 - \alpha_2) \cdot \rho_{p2} = B_2.$$

На його підставі з рівняння (7) знаходимо густину одного із цінних компонентів.

Виконавши кілька таких вимірювань і обчислень та усереднивши результати, отримаємо досить близькі значення густин складових руди.

**Приклад.** Узято два шматки руди одного родовища, але з різних вибоїв. З них підготовлені проби і визначений вміст цінного компоненту:  $\alpha_1 = 0,3$ ,  $\alpha_2 = 0,35$ .

Попередньо пікнометричним методом були визначені густини обох шматків руди, вони склали відповідно:  $\rho_1 = 3,2258 \text{ кг/дм}^3$ ,  $\rho_2 = 3,309 \text{ кг/дм}^3$ .

Необхідно визначити густини рудної і нерудної фаз.

Результати розрахунків наведено нижче.

$$\begin{aligned} A_1 &= 0,3 \cdot 3,2258 = 0,9669, & A_2 &= 0,35 \cdot 3,309 = 1,155. \\ B_1 &= 0,7 \cdot 3,2258 = 2,2582, & B_2 &= 0,65 \cdot 3,309 = 2,15. \\ \rho_H &= \frac{0,9669 \cdot 2,15 - 1,155 \cdot 2,2582}{0,9669 - 1,155} = 2,81, & \rho_M &= \frac{1,155 \cdot 2,81}{2,15 - 2,81} = 4,99. \end{aligned}$$

Ці дві густини пов'язані із густиною руди та вмістом магнетиту в ній залежністю:

$$\rho_{p(сх)} = \frac{\rho_M \cdot \rho_H}{\rho_M - \alpha_H \cdot (\rho_M - \rho_H)}. \quad (8)$$

### *Швидкість потоку пульпи у зливі класифікатора*

Хоча потік пульпи в кориті класифікатора має досить крупномасштабну турбулентність, вся пульпа має тенденцію до переміщення у бік зливу, тому при розрахунку швидкості потоку на зливі останній розглядається як невідтоплений водозлив. Відповідно до [2]:

$$W_{V\_кc} = k_{H\_B3} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot B_{зл} \cdot H_{зл}^{3/2}}, \quad (9)$$

де  $B_{зл}$  – ширина струменя зливу (ширина корита класифікатора по зливу);  $H_{зл}$  – висота струменя зливу;  $k_{H\_B3}$  – гідравлічний коефіцієнт для невідтопленого зливу,  $k_{H\_B3} = 0,42 \div 0,50$ .

Із (9) отримаємо:

$$H_{зл} = \sqrt[3]{\frac{W_{V\_кc}^2}{2 \cdot g \cdot k_{H\_B3}^2 \cdot B_{зл}^2}}. \quad (10)$$

У такому разі швидкість пульпи на зливі дорівнює:

$$v_{п\_кc} = \frac{W_{V\_кc}}{B_{зл} \cdot H_{зл}}. \quad (11)$$

Розрахункова схема руху потоків пульпи у класифікаторі наведена на рисунку.

Конструктивні параметри класифікатора М 554-1:

- внутрішня ширина корита класифікатора 6300 мм;
- відстань від точки подачі руди до зливу за рівнем зливу 4500 мм;
- відстань від дна корита до осі спіралей 1650 мм;
- відстань від осі спіралі до кромки зливу 850 мм;
- висота корита класифікатора:

$$h_k = 1650 + 850 = 2500 \text{ мм};$$

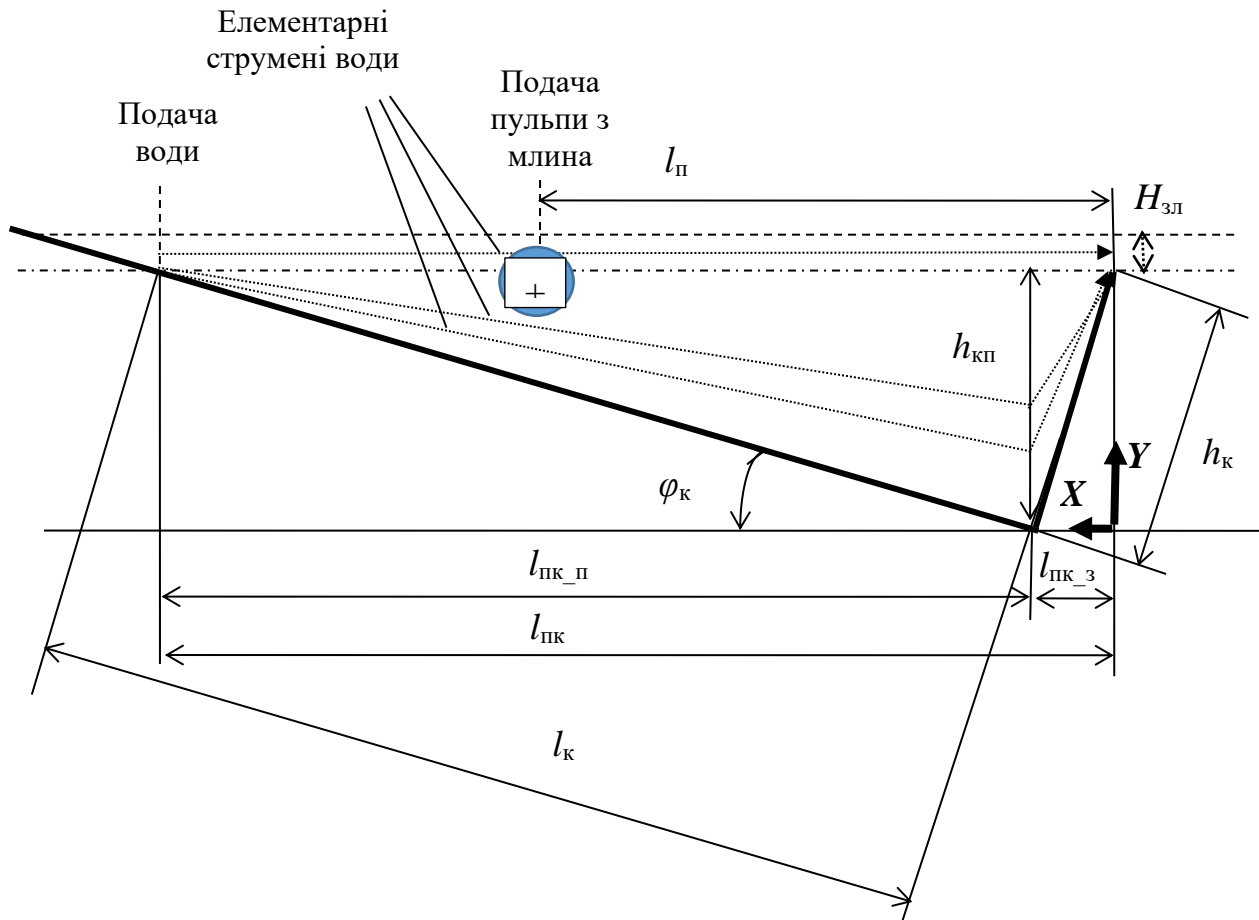


Рис. Розрахункова схема руху потоків води у класифікаторі

- діаметр спіралей класифікатора 3000 мм;
- крок спіралі класифікатора 800 мм;
- ширина кільця спіралі класифікатора 600 мм;
- відстані від осі корита до осі спіралі 1550 мм (кількість спіралей – 2 шт.);
- кількість обертів спіралі класифікатора 1,5-2,5 об/хвил;
- кут нахилу корита класифікатора  $\varphi_k = 180^\circ$ ;
- рівень зливу пульпи класифікатора:

$$h_{кп} = h_k \cdot \cos \varphi_k = 2500 \cdot 0,951 = 2378 \text{ мм};$$

- довжина дзеркала пульпи за мінімального рівня зливу по осі максимальної глибини до точки зливу:

$$l_{пк_з} = h_k \cdot \sin \varphi_k = 2500 \cdot 0,309 = 773 \text{ мм};$$

- довжина дзеркала пульпи за рівнем зливу від точки подачі води до осі максимальної глибини до точки зливу:

$$l_{пк_п} = h_{кп} / \operatorname{tg} \varphi_k = 2378 / 0,325 = 7317 \text{ мм};$$

- довжина дзеркала пульпи за рівнем зливу:

$$l_{пк} = h_k / \sin \varphi_k = 2500 / 0,309 = 8090 \text{ мм};$$

– довжина корита до рівня зливу:

$$l_k = h_k / \operatorname{tg} \varphi_k = 2500 / 0,325 = 7692 \text{ мм};$$

Розглянемо елементарний струмінь пульпи з товщиною (висотою), що прагне до нуля.

Якщо елементарний струмінь розташований на рівні зливу або вище, то його довжина  $l_{ec}$  дорівнює довжині корита за рівнем зливу пульпи  $l_{пк}$ :

$$l_{ec} = l_{пк}. \quad (12)$$

У свою чергу, довжина корита за рівнем зливу пульпи може бути пов'язана з величинами, зображеними на рис.1, наступним чином:

$$l_{пк} = l_{пк\_п} + l_{пк\_з}. \quad (13)$$

Нехай ордината елементарного струменя у перерізі  $x = l_{пк\_з}$  дорівнює  $y_{ec}$ .

Тоді довжина елементарного струменя може бути оцінена як:

$$l_{ec} = \sqrt{l_{пк\_п}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2} + \sqrt{l_{пк\_з}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2}. \quad (14)$$

Прийmemo гіпотезу, що для елементарних струменів потоку справедливе наступне твердження:

$$l_{ec} \cdot v_{ec} = \text{const}. \quad (15)$$

Витрату води через перетин  $x = l_{пк\_з} - Q_{пк\_з}$  можна розрахувати як:

$$Q_{пк\_з} = b_{пк} \cdot v_{ecб} \cdot H_{зл} + \int_{y=0}^{h_{пк}} b_{пк} \cdot v_{ec}(y) \cdot dy, \quad (16)$$

де  $b_{пк}$  – ширина корита класифікатора;  $v_{ecб}$  – швидкість базового елементарного струменя, тобто елементарного струменя з  $y \geq h_{пк}$ .

Виходячи з (15), для швидкості довільного елементарного струменя можна записати:

$$l_{ec} \cdot v_{ec} = l_{пк} \cdot v_{ecб}, \quad (17)$$

В результаті підстановки (14) до (17), отримаємо:

$$v_{ec}(y) = v_{ecб} \cdot \frac{l_{пк}}{l_{ec}(y)} = \frac{v_{ecб} \cdot l_{пк}}{\sqrt{l_{пк\_п}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2} + \sqrt{l_{пк\_з}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2}}, \quad (18)$$

а після підстановки (18) у (16), маємо:

$$Q_{пк\_з} = b_{пк} \cdot v_{ecб} \cdot \left( H_{зл} + l_{пк} \cdot \int_{y=0}^{h_{пк}} \frac{1}{\sqrt{l_{пк\_п}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2} + \sqrt{l_{пк\_з}^2 + (h_{пк} - y_{ec})^2}} \cdot dy \right). \quad (19)$$

Інтеграл у правій частині (19) –  $\int_{Q_{ПК_3}}$ , знаходимо за допомогою пакета математичних програм:

$$\begin{aligned} \int_{Q_{ПК_3}} = & \int_{y=0}^{h_{ПК}} \frac{1}{\sqrt{l_{ПК\Pi}^2 + (h_{ПК} - y)^2} + \sqrt{l_{ПК_3}^2 + (h_{ПК} - y)^2}} \cdot dy = \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{ПК_3}^2 \cdot \ln(l_{ПК_3}) - l_{ПК\Pi}^2 \cdot \ln(l_{ПК\Pi})}{l_{ПК_3}^2 - l_{ПК\Pi}^2} + \\ & + \frac{1}{2} \cdot \frac{l_{ПК_3}^2 \cdot \ln\left(-h_{ПК} + \sqrt{l_{ПК_3}^2 + h^2}\right) - l_{ПК\Pi}^2 \cdot \ln\left(-h_{ПК} + \sqrt{l_{ПК\Pi}^2 + h^2}\right)}{l_{ПК_3}^2 - l_{ПК\Pi}^2} + \\ & + \frac{1}{2} \cdot \frac{h_{ПК} \cdot \sqrt{l_{ПК\Pi}^2 + h_{ПК}^2} - h_{ПК} \cdot \sqrt{l_{ПК_3}^2 + h_{ПК}^2}}{l_{ПК_3}^2 - l_{ПК\Pi}^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

і зазначимо, що для випадку  $l_{ПК_3} = l_{ПК\Pi} = 0,5 \cdot l_{ПК}$  отримаємо:

$$\begin{aligned} \int_{Q_{ПК_3}} = & \int_{y=0}^{h_{ПК}} \frac{1}{\sqrt{0,25 \cdot l_{ПК}^2 + (h_{ПК} - y)^2} + \sqrt{0,25 \cdot l_{ПК}^2 + (h_{ПК} - y)^2}} \cdot dy = \\ = & \frac{1}{2} \cdot \ln(0,5 \cdot l_{ПК_3}) - \frac{1}{2} \cdot \ln\left(-h_{ПК} + \sqrt{0,25 \cdot l_{ПК\Pi}^2 + h_{ПК}^2}\right). \end{aligned} \quad (21)$$

Тоді (19) запишеться у вигляді:

$$Q_{ПК_3} = b_{ПК} \cdot v_{есб} \cdot \left(H_{зл} + l_{ПК} \cdot \int_{Q_{ПК_3}}\right). \quad (22)$$

Швидкість руху пульпи у верхньому шарі у такому разі становитиме:

$$v_{есб} = \frac{Q_{ПК_3}}{b_{ПК} \cdot \left(H_{зл} + l_{ПК} \cdot \int_{Q_{ПК_3}}\right)}, \quad (23)$$

а витрата по зливу горизонтального потоку –  $Q_{ПК_Н}$  складе:

$$Q_{ПК_Н} = v_{есб} \cdot b_{ПК} \cdot H_{зл} = \frac{1}{1 + \frac{l_{ПК} \cdot \int_{Q_{ПК_3}}}{H_{зл}}} \cdot Q_{ПК_3}. \quad (24)$$

Відповідно, витрата пульпи по зливу з шару пульпи всередині корита  $Q_{ПК_К}$  складе:

$$Q_{ПК_К} = Q_{ПК_3} - Q_{ПК_Н}. \quad (25)$$

Потік пульпи з витратою  $Q_{ПК_К}$  на злив буде направлений у бік зливу вздовж торцевої стінки корита класифікатора під кутом  $\phi_c = \pi/2 - \phi_k$  до горизонталі із середньою швидкістю в області зливу  $v_{ск}$ :

$$v_{ск} = \frac{Q_{ПК_К}}{b_{ПК} \cdot h_{ПК} \cdot \sin\phi_k} = \frac{Q_{ПК_К}}{b_{ПК} \cdot h_k \cdot \cos\phi_k \cdot \sin\phi_k}. \quad (26)$$

Вертикальна складова швидкості такого потоку  $v_{ск_в}$  дорівнює:

$$v_{ск_в} = v_{ск} \cdot \cos\varphi_k = \frac{Q_{пк_к}}{b_{пк} \cdot h_k \cdot \sin\varphi_k}. \quad (27)$$

Розрахуємо базові параметри для класифікатора М 554-1:

$$\int_{Q_{пк_з}} = 0,267807.$$

З (24) випливає, що

$$\frac{Q_{пк_н}}{Q_{пк_з}} = \frac{1}{1 + \frac{l_{пк} \cdot \int_{Q_{пк_з}}}{H_{зл}}} = \frac{1}{1 + \frac{8090 \cdot 0,267807}{H_{зл}}} = \frac{1}{1 + \frac{2167}{H_{зл}}}.$$

У роботі [3] у прикладі (с. 61) наведено розрахунок  $H$ . Його значення лежать у межах 25-50 мм. В цьому випадку:

$$\frac{Q_{пк_н}}{Q_{пк_з}} \approx 0,011 \div 0,023.$$

У даній моделі руху потоку частинки, що потрапляють у злив, визначаються вертикальною складовою швидкості руху потоку води вздовж торцевої стінки корита класифікатора. У цьому випадку спіралі класифікатора виконують роль перемішувача придонних шарів пульпи для того, щоб осілі частинки були поетапно перенесені до торцевої стінки класифікатора і висхідним потоком води перенесені до зливу.

Звідси випливає, що тверде в злив переноситься потоком води з витратою  $Q_{пк_з}$ , а потік води з витратою  $Q_{пк_н}$  містить тільки частинки з діаметром, суттєво меншим, ніж верхній граничний діаметр частинок у зливі.

Визначаємо граничний діаметр – максимальний розмір частинок у зливі.

Припустимо, що потік пульпи з витратою води  $Q_в$  рухається як рівномірний потік з однаковою швидкістю перерізу вздовж торцевої стінки корита класифікатора, тобто під кутом  $\alpha_{п_с}$  до горизонталі:

$$\alpha_{п_с} = 90^\circ - \varphi_k. \quad (28)$$

Ширина потоку дорівнює  $B_{сл}$ , висота потоку –  $h_{пс}$ .

$$h_{пс} = h_{пк} \cdot \cos\alpha_{п_с}. \quad (29)$$

Потік переносить у собі твердий компонент, об'ємна витрата якого становить  $Q_т$ . Густина матеріалу твердого складає  $\rho_т$ .

Швидкість потоку –  $v_{пс}$ , який виносить у злив тверде, за такою моделлю може бути розрахована як:

$$v_{пс} = \frac{Q_в + Q_т}{h_{пс} \cdot B_{зл}}, \quad (30)$$

а може бути прийнята рівною  $v_{п_к_с}$ , розрахованій за (11).



Вертикальну складову швидкості потоку з пульпою –  $v_{\text{пс}_\Pi}$ , можна визначити як:

$$v_{\text{пс}_\Pi} = v_{\text{пс}} \cdot \sin \alpha_{\text{пс}} \quad (31)$$

Порядок розрахунку максимального діаметра частинок, що потрапляють у злив, наступний:

- розраховуємо параметри зливу класифікатора – зокрема, об'єм зливу, об'єми твердого та рідкого у зливі;
- розраховуємо частину об'єму пульпи, зайняту твердими частинками  $\gamma_\Pi$  за (ч.1);
- розраховуємо висоту струменя зливу  $H_{\text{зл}}$  за (10);
- розраховуємо швидкість пульпи у зливі  $v_{\text{п}_\text{кс}}$  за (11);
- розраховуємо середню швидкість потоку в області зливу  $v_{\text{ск}}$  за (26);
- розраховуємо середню величину вертикальної складової швидкості потоку в області зливу  $v_{\text{ск}_\text{в}}$  за (26) або  $v_{\text{пс}_\Pi}$  за (31);
- розраховуємо швидкість вільного падіння частинок  $v_{\text{св}}$ . У якості  $v_{\text{ст}}$  підставляємо  $v_{\text{ск}_\text{в}}$  або  $v_{\text{пс}_\Pi}$ ;
- розраховуємо  $d_\text{ч}$  за (ч.1);
- перевіряємо  $Re$  за (ч1). Якщо  $Re < 2$ , задовольняємося результатом.

Висота зливного порога від дна корита до зливної кромки для класифікатора типу КСН становить від 0,8 до 1,05 діаметра спіралі.

Таблиця 1

Величина поправочного коефіцієнту  $K_\alpha$  в залежності від кута нахилу корита спірального класифікатора

$\alpha$	$15^\circ$	$18^\circ$	$23^\circ$	$24^\circ$
$K_\alpha$	1,1	1,0	0,855	0,822

Таблиця 2

Величина поправочних коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  для пісків різної крупності

Коефіцієнти	Кут нахилу корита	Значення $K_1$ і $K_2$ для номінальної крупності пісків, мм			Область застосування
		до 1,6	від 1,6 до 8,0	від 8,0 до 25	
$K_1$	–	0,049	0,82	від 0,109 до 0,131	для класифікаторів зі спіраллю діаметром від 1,2 до 3,0 м
$K_2$	від $15^\circ$ до $18^\circ$	0,0025	0,0033	від 0,0041 до 0,0044	
	від $23^\circ$ до $24^\circ$	0,0028	0,0036	від 0,044 до 0,0050	

Продуктивність класифікатора за пісками –  $Q_{\Pi}$  (т/год) розраховується за формулою:

$$Q_{\Pi} = 5,45 \cdot m \cdot D^3 \cdot (\rho/27000) \cdot K_{\alpha} \left[ \frac{\text{Т}}{\text{Год}} \right],$$

де  $m$  – кількість спіралей;  $D$  – діаметр спіралей, мм;  $n$  – частота обертання спіралей, 1/хвил;  $\rho$  – густина пісків, кг/м<sup>3</sup>,  $K_{\alpha}$  – поправочний коефіцієнт на кут нахилу корита  $\alpha$  (див. табл. 1, 2).

Чисельну оцінку будемо проводити, ґрунтуючись на даних АСК ТП першої секції збагачення фабрики РЗФ-1 ПрАТ «Полтавський ГЗК».

Перша стадія збагачення цієї секції обладнана класифікатором 2КСН 30х125. Розглядаються зовнішні фактори, що впливають на показники зливу класифікатора, які піддаються контролю:  $t_{\text{в}}^0$  – температура води у класифікаторі;  $\rho_{\text{т}}$  – густина частинок руди (твердого);  $\rho_{\text{зл}}$  – густина зливу класифікатора;  $Q_{\text{мр}}$  – масова витрата твердого (руди) у зливі класифікатора (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри режимів збагачення першої стадії

№ рядка (режиму)	$\rho_{\text{сл}}$ – густина зливу класифікатора (розрахункова), кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{сл}}$ – густина зливу класифікатора (виміряна), кг/м <sup>3</sup>	$Q_{\text{мр}}$ – масова витрата твердого у зливі класифікатора, кг/с	$d_{\text{інд}}$ , м/мм
9	1548	1639	64,101	0,001034/1,034
363	1364	1518	48,146	0,000782/0,782
555	1562	1652	64,568	0,001058/1,058
584	1406	1445	46,998	0,000815/0,815
628	1375	1399	45,6	0,000784/0,784
899	1476	1464	58,931	0,000907/0,907
931	1483	1532	59,186	0,000929/0,929

Приймається, що масова витрата води у зливі класифікатора  $Q_{\text{мв}}$  регулюється в залежності від масової витрати твердого (руди) у зливі класифікатора так, що забезпечується необхідна густина зливу класифікатора.

Конструктивні параметри класифікатора враховуються через постійний множник  $k_{d_{\text{кс}}}$ :

$$k_{d_{\text{кс}}} = \frac{1,287}{(k_{\text{н_вс}} \cdot B_{\text{зл}})^{\frac{1}{6}}}, \quad (32)$$

де  $B_{зл}$  – ширина струменя зливу (ширина корита класифікатора за зливом). У класифікатора 2КСН 30х125 внутрішня ширина корита  $B_{зл} = 6,3$  м;  $k_{н_вс}$  – гідравлічний коефіцієнт для невідтопленого зливу,  $k_{н_вс} = 0,403$ .

У такому разі, отримаємо:  $k_{d_кc} = 1,0188841 \left[ \frac{м^3}{с} \right]^{-\frac{1}{6}}$ .

Режими контролю густини зливу класифікатора розраховувалися для густини руди  $\rho_T = 3400 \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$  та густини води  $\rho_B = 1000 \left[ \frac{кг}{м^3} \right]$ . Температура води у зливні класифікатора приймалася рівною  $20^\circ C$ , тобто  $t_B^0 = 20^\circ C$ .

Динамічна в'язкість води –  $\mu_B$  розраховується за апроксимуючою залежністю (формулою Пуазейля, модифікованою для температурного діапазону від  $0^\circ C$  до  $80^\circ C$ )

$$\mu_B = 1789 \cdot \left( 1 + 0,035 \cdot t_B^0 + 0,0002 \cdot t_B^{0^2} \right)^{-1}. \quad (33)$$

У такому разі, при  $t_B^0 = 20^\circ C$  отримаємо  $\mu_B = 0,001005$  [Па · с].

Тоді:

$$\left. \frac{\partial \mu_B}{\partial t_B^0} \right|_{t_B^0=20^\circ C} = -0,2428 \cdot 10^{-4}.$$

Результати розрахунку похідних у точках досліджуваних режимів контролю густини наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Чутливість індикативного діаметра до зміни параметрів режиму збагачення першої стадії

№ режима	$d_{інд_зл}$ $10^{-3}$ м	$\frac{\partial d_{інд_зл}}{\partial \mu_B}$ м/(Па · с)	$\frac{\partial d_{інд_зл}}{\partial t_B^0}$ м/град. $C^0$	$\frac{\partial d_{інд_зл}}{\partial Q_{мр}}$ м/(кг/с)	$\frac{\partial d_{інд_зл}}{\partial \rho_T}$ м/(кг/м <sup>3</sup> )	$\frac{\partial d_{інд_зл}}{\partial \rho_{зл}}$ м/(кг/м <sup>3</sup> )
9	1,034	0,5139	$-0,12478 \times 10^{-4}$	$0,2686 \times 10^{-5}$	$-0,6296 \times 10^{-6}$	$0,15932 \times 10^{-5}$
363	0,782	0,3892	$-0,09449 \times 10^{-4}$	$0,2708 \times 10^{-5}$	$-0,3189 \times 10^{-6}$	$0,07749 \times 10^{-5}$
555	1,058	0,5260	$-0,12771 \times 10^{-4}$	$0,2729 \times 10^{-5}$	$-0,6670 \times 10^{-6}$	$0,168654 \times 10^{-5}$
584	0,815	0,4051	$-0,09835 \times 10^{-4}$	$0,2887 \times 10^{-5}$	$-0,36168 \times 10^{-6}$	$0,089937 \times 10^{-5}$
628	0,784	0,390	$-0,09468 \times 10^{-4}$	$0,2865 \times 10^{-5}$	$-0,32672 \times 10^{-6}$	$0,079984 \times 10^{-5}$
899	0,907	0,45757	$-0,111096 \times 10^{-4}$	$0,260127 \times 10^{-5}$	$-0,47453 \times 10^{-6}$	$0,1199099 \times 10^{-5}$
931	0,929	0,46213	$-0,112203 \times 10^{-4}$	$0,261588 \times 10^{-5}$	$-0,48676 \times 10^{-6}$	$0,1230794 \times 10^{-5}$

Зіставити ступінь впливу різних факторів на сепараційні властивості класифікатора зручно, оцінивши відносне збільшення індикативного впливу. Наприклад, збільшення відповідного параметра на 10% при незмінних інших параметрах. Дане збільшення входить в область можливих варіацій параметрів для реального процесу у квазі-сталому режимі першої секції збагачення. З тих же міркувань, порівняльну оцінку впливу температури зручно проводити для абсолютного збільшення температури на величину  $10\text{ C}^0$ .

Результати розрахунків наведено у наступній табл. 5.

Таблиця 5

Відносна чутливість індикативного діаметра до відносної зміни параметрів збагачення першої стадії

№	$\Delta d_{\text{інд\_зл}}/d_{\text{інд\_зл}}, \%$ $\Delta t_{\text{в}}^0 = 10\text{ C}^0$	$\Delta d_{\text{інд\_зл}}/d_{\text{інд\_зл}}, \%$ $\Delta Q_{\text{мр}}/Q_{\text{мр}} = 10\%$	$\Delta d_{\text{інд\_зл}}/d_{\text{інд\_зл}}, \%$ $\Delta \rho_{\text{т}}/\rho_{\text{т}} = 10\%$	$\Delta d_{\text{інд\_зл}}/d_{\text{інд\_зл}}, \%$ $\Delta \rho_{\text{зл}}/\rho_{\text{зл}} = 10\%$
9	-12,07%	1,67%	-20,70%	23,85%
363	-12,08%	1,67%	-13,87%	13,52%
555	-12,07%	1,67%	-21,43%	24,90%
584	-12,07%	1,66%	-15,09%	15,52%
628	-12,08%	1,67%	-14,17%	14,03%
899	-12,25%	1,69%	-17,79%	19,51%
931	-12,08%	1,67%	-17,81%	19,65%

**Висновки.** Оцінити вплив збурень можливо, зіставивши їх із максимальними значеннями відносних змін густинних параметрів зливу класифікатора та індикативного діаметра частинок у зливі класифікатора. Для режимів збагачення, представлених в табл. 5, вони склали відповідно 13,52% та 24,9%. Це свідчить про те, що дані параметри повинні прямо чи опосередковано враховуватися при налаштуванні та керуванні режимами збагачення першої стадії, а у якості основного критерія для налаштування слід приймати індикативний діаметр частинок у зливі класифікатора, оскільки він досить повно характеризує сепараційний режим спірального класифікатора.

Використання такого параметра як індикативна крупність частинок в зливі класифікатора для аналізу режиму його роботи дозволяє підвищити точність ідентифікації його поточної сепараційної характеристики на 8-12% в порівнянні з використанням такого показника як густина зливу класифікатора.

#### Перелік посилань

1. *Справочник по обогащению руд. В 3-х т. Том 1. Подготовительные процессы* (1972). О.С. Богданов (Гл. ред.), В.А. Олевский (Отв. ред.). Недра.
2. Избаш, С.В. (1952). *Основы гидравлики*. Гос. изд-во л-ры по строительству и архитектуре.
3. Олевский, В.А. (1960). *Конструкции и расчет механических классификаторов и гидроциклонов*. Гос. научно-техн. изд-во по горному делу.

## АННОТАЦІЯ

**Цель.** Апробировать математическую модель спирального классификатора, которая адекватно отражает происходящие в нем физические явления. Это позволит оперативно с повышенной точностью идентифицировать разделительные свойства классификатора по крупности путем численного моделирования показателя разделения в сливном продукте. Идентификация может быть осуществлена с помощью функций распределения частиц по крупности, которые определяются однопараметрическим законом распределения в виду того, что в сливе сосредотачиваются достаточно мелкие частицы.

**Методика исследования.** Аналитический расчет всех необходимых показателей технологического процесса классификации для определения индикативной крупности в сливе классификатора на основе методики расчета, изложенной в части первой данной работы.

**Результаты исследования.** Иллюстрация последовательности расчетов является результатом исследований по идентификации изменений работы спирального классификатора, которые оцениваются на основании частных производных от математической модели по режимным параметрам классификации.

**Научная новизна.** Доказано, что через параметры, наблюдаемые при работе спирального классификатора, может быть вычислена индикативная крупность – теоретически максимальный размер частиц твердого, которые могут находиться в сливе классификатора, что обеспечивает повышение точности идентификации его сепарационного режима. Показано существенное влияние температуры воды в сливе классификатора на его текущую сепарационную характеристику.

**Практическая значимость.** Использование такого параметра как индикативная крупность частиц в сливе классификатора для анализа режима его работы позволяет повысить точность идентификации его текущей сепарационной характеристики на 8-12% по сравнению с использованием такого показателя, как плотность слива классификатора.

**Ключевые слова:** индикативная крупность разделения, классификация, пульпа, слив классификатора, содержание магнетита в руде, плотность руды, плотность пульпы, распределение частиц по крупности.

## ABSTRACT

**Purpose.** To test the mathematical model of the spiral classifier, which properly reflects the physical phenomena occurring in it. This will make it possible to quickly identify the separating properties of the size classifier by numerically modeling the separation index in the overflow product. Identification can be carried out using the particle size distribution functions, which are determined by a one-parameter distribution law in view of the fact that rather small particles are concentrated in the overflow.

**The methodology of research.** Analytical calculation of all the necessary indicators of the technological process of classification to determine the indicative fineness in the overflow of the classifier based on the calculation methodology set forth in the first part of this article.

**Findings.** The illustration of the sequence of calculations is the result of studies to identify changes in the operation of the spiral classifier, which are estimated on the basis of partial derivatives of the mathematical model according to the regime parameters of classification.

**Originality.** It is proved that through the parameters observed during the operation of the spiral classifier, the indicative fineness can be calculated - theoretically maximum size of solid particles that can be found in the classifier overflow, which ensures an increase in the accuracy of identifying

its separation mode. A significant influence of the water temperature in the classifier overflow on its current separation characteristic is shown.

**Practical implication.** The use of such a parameter as the indicative particle size in the classifier overflow to analyze its operation mode makes it possible to increase the accuracy of identifying its current separation characteristics by 8-12% compared to using such an indicator as the density of the classifier overflow.

**Keywords:** *indicative separation size, classification, pulp, classifier overflow, magnetite content in ore, ore density, pulp density, particle size distribution.*