

© 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 1. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДО СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

©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 1. THEORETICAL JUSTIFICATION FOR A MATHEMATICAL MODEL COMPILING

**Мета.** Підвищення точності оцінювання сепараційного режиму спірального класифікатора.

**Методика дослідження** полягає у встановленні індикативної крупності розділення відповідно до теоретичних побудов і кількісних співвідношень параметрів класифікації.

**Результати дослідження.** Виконано аналіз фізичних процесів, що відбуваються в потоці пульпи, розташованому безпосередньо перед зливним порогом. Отримано математичну модель розшарування твердої фази в цій частині потоку.

**Наукова новизна.** Відповідно до теоретичних побудов і кількісних співвідношень, отримана залежність значення максимальної крупності частинок в потоці пульпи, розташованому над гребенем зливного порога. Тобто, індикативна крупність, яка визначає межу розділення функції розподілу частинок за крупністю на дві частини: частинки великого розміру осідають і виносяться в піски, а більш тонкі – надходять в злив. Значення цієї крупності залежить від режимних параметрів класифікації, а функція розподілу залежить від фізичних властивостей перероблюваної руди. Моделювати процес розділення твердого в спіральному класифікаторі досить в пристінковій області його зливу, так як масштаб турбулентності можна порівняти з розміром класифікатора. Крім того, в розрахунках слід враховувати зміну температури пульпи для обчислення показників в'язкості середовища.

**Практичне значення.** Індикативна крупність, отримана на основі математичної моделі, визначає всі подальші якісні показники збагачувального процесу, і може бути встановлена на підставі показників, які можуть бути безпосередньо виміряні або обчислені автоматично в режимі реального часу. Таким чином, стає можливим вести керування підготовчим процесом для досягнення стабільних показників якості концентрату.

**Ключові слова:** турбулентність потоку пульпи в класифікаторі, індикативна крупність, функція розподілу частинок за крупністю, часткові похідні від режимних параметрів класифікації.

**Вступ.** Стаття присвячена математичному моделюванню процесу гідравлічної класифікації в спіральних незанурених класифікаторах. Як і будь-який збагачувальний апарат, він має безліч станів. Тому єдиним способом дослідження

його роботи є аналітичний. Існуючі моделі використовують гіпотези, далекі від реальних явищ, на підставі яких немає можливості робити коректні висновки про кількісні співвідношення в вихідних показниках класифікації. Тому пошук математичної моделі, яка б достовірно описувала фізичний процес гідравлічної класифікації, залишається актуальним завданням.

Гідравлічна класифікація є важливим технологічним процесом для виділення готового класу крупності і автоматичної зміни часу подрібнення, якщо відхилення фізичних характеристик корисної копалини не дають можливості забезпечити необхідне розкриття цінного компонента. На збагачувальних фабриках Кривого Рогу набули поширення незанурені спіральні класифікатори, в яких транспортуючий шнек неповністю занурений в пульпу. У міру транспортування крупного класу (пісків), гребки шнека створюють великомасштабну турбулентність в пульпі. Ця турбулентність сприяє перемішування частинок. В результаті, дрібні частинки сягають поверхні пульпи, а ближче до зливного порога створюється досить сильний висхідний потік, який виносить тонкі частинки в злив.

Експериментально дослідити цей технологічний апарат досить проблематично, оскільки кількість його станів нескінченна. Тому природним є бажання створити математичну модель цього технологічного процесу.

Перші публікації, присвячені цьому питанню, стосувалися опису ліній течії в пульпі, яка зосереджена в кориті класифікатора і переміщається від місця подачі пульпи до зливного порога. Однак, такого порядку в класифікаторі не спостерігається: гребки скламучують пульпу, і ні про які лінії течії не може бути й мови. І тільки в зоні, прилеглій до зливного порога, створюється висхідний, відносно шаруватий потік.

Спіральний класифікатор (шнековий) являє собою прямокутне корито, встановлене довгою стороною під деяким кутом  $\varphi = 18^\circ$ . Коротка сторона розташована нормально до днища. Пульпа і додаткова вода подаються в протилежних точках бортів корита на лінії перетину з поверхнею дзеркала пульпи класифікатора.

Гідравлічна класифікація в спіральних класифікаторах здебільшого обходилася дослідниками через труднощі з виділенням ділянок, в яких власне і відбувається розшарування пульпи. Спостереження за переміщенням пульпи в кориті класифікатора показує, що вона всією масою відразу ж з млина випадає на дно класифікатора, а потім вже переміщується лопатями спіралей. Масштаб турбулентності визначається кроком між лопатями і висотою лопатей. В результаті, діаметр вихору (масштаб турбулентності) становить близько 60-70 см. Перелив через лопаті створює потік зі швидкістю, що перевищує швидкість потоку в зливі класифікатора. Ця турбулентність має досить значну вихорову швидкість, що створює сприятливі умови для скаламучування потоку переміщуваних пісків і виносу тонких частинок твердої фази в верхні шари пульпи. Однак, більша частина готового класу так і залишається в пісках.

Додаткова вода, яка подається в корито класифікатора і вода, яка віджимается з потоку пісків, які вийшли з контакту з масою пульпи, утворюють новий потік, який має тенденцію до переміщення в сторону зливу за рахунок різниці

висот рівня зливу і рівня дзеркала пульпи в місці подачі пульпи із млина. Цей потік звільняється від механічних збудників турбулентності тільки в пристінній області біля зливного порога, при цьому довжина цієї області складає біля 50 см. У цій області створюється висхідний потік, який і виносить більшу частину тонких частинок в злив, що йде в подальшому на сепарацію.

З підвищенням об'ємної продуктивності класифікатора посилюється висхідний потік, отже, у злив виносяться крупніші частинки. Це погіршує показники розкриття твердої частини зливної пульпи, і, як наслідок, призводить до зниження показників збагаченого продукту при подальшій сепарації, оскільки розділення відбувається за вмістом цінного мінералу в частинках. Таким чином, крупність частинок в зливі класифікатора є основним показником можливої якості проміжного продукту і, в подальшому, концентрату. І навпаки, будь-яке збурення, пов'язане зі зміною збагачувальних ознак руди, призводить до зміни крупності частинок в зливі.

**Матеріали та результати досліджень.** Дослідження класифікації гальмувалося також через те, що для отримання функції розподілу часток по крупності в зливі необхідно знати такий же розподіл на вході, а також всі закономірності перетворення цих функцій від входу до виходу. Простежити таке перетворення практично неможливо для такого стохастично невизначеного об'єкта, як спіральний класифікатор. Тому необхідно знайти певний показник, який би акумулював у собі всі явища, що відбуваються при класифікації і, в той же час, не був пов'язаний з необхідністю ідентифікувати його функцією розподілу частинок по крупності на вході і виході.

В якості такої оцінки пропонується прийняти діаметр частинки твердого, що знаходиться на межі ребра зливу, у якої вертикальна складова швидкості потоку врівноважується швидкістю стисненого падіння частинки в полідисперсному середовищі (пульпі) –  $v_{ст}$ .

У той же час, якщо відомі показники властивостей руди, то завжди можна підібрати таку крупність частинок в зливі класифікатора, коли можна стабілізувати якісні показники подальшої сепарації.

Оперативне вимірювання крупності частинок в зливі класифікатора в даний час не представляється можливим. Однак, якщо за відомими параметрами процесу розділення у класифікаторі обчислити будь-якої показник, який буде характеризувати крупність частинок в зливі, то вирішити задачу стабілізації якості концентрату вже буде можливо.

Отже, з розглянутих позицій спробуємо вирішити поставлену задачу.

Розглянемо пристінну область зливу класифікатора, в якій, власне, і відбувається розділення за крупністю (рис.).

Висота дзеркала пульпи над порогом (гребенем, верхньою кромкою водозливу) визначає витрату пульпи через злив. Напір водозливу  $H$  (рис.).

Відповідно до класифікації водозливів [1], водозливи з  $h_{зл}/H < 0,67$  (де  $h_{зл}$  – товщина стінки (ребра) сторони зливу) є водозливами з гострим ребром. До даного типу водозливу відноситься і розглянутий класифікатор. За розташу-

ванням порога він відноситься до прямих водозливів; за умовами підходу до водозливу – до водозливу без бокового стиснення потоку, тобто ширина водозливу дорівнює ширині підвідного каналу; за типом сполучення спадаючого струменя з нижнім б'єфом – до непідтоплених водозливів, у яких рівень нижнього б'єфу не впливає на витрату водозливу.

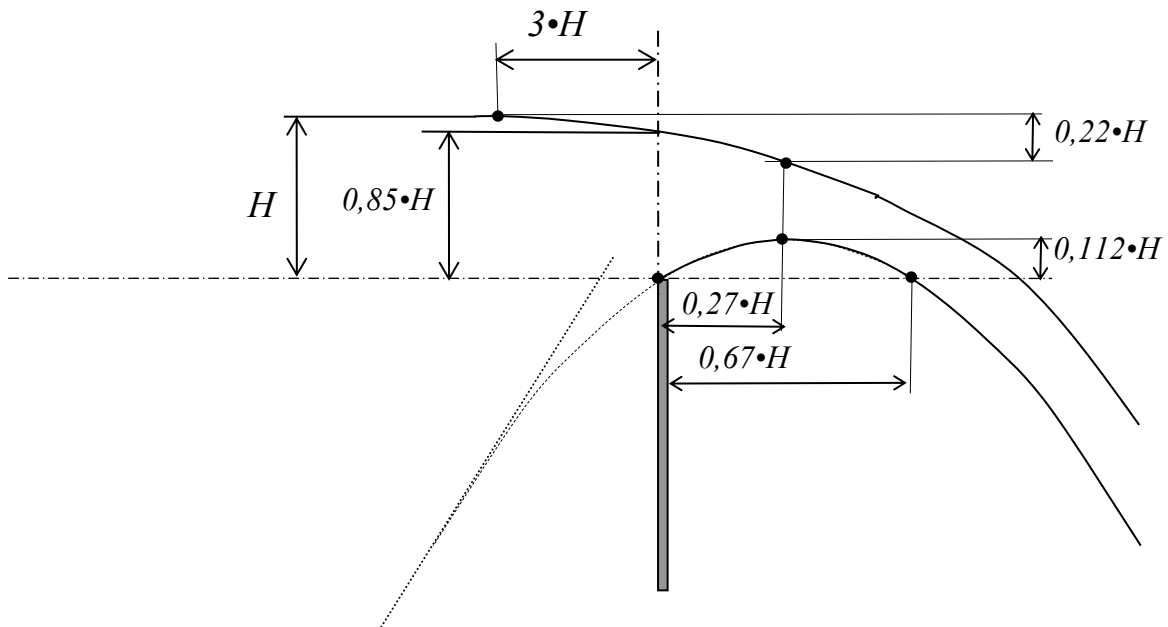


Рис. Гідравлічна схема зливу через тонку непідтоплену перегородку

Для непідтопленого водозливу витрата пульпи через водозлив визначається з рівняння:

$$Q_{V_{\text{КС}}} = k_{\text{НВЗ}} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B_{\text{ЗЛ}} \cdot H_{\text{ЗЛ}}^{3/2}, \quad (1)$$

де  $B_{\text{ЗЛ}}$  – ширина потоку зливу (ширина корита класифікатора по зливу);  $H_{\text{ЗЛ}}$  – напір над гребенем зливу [м];  $k_{\text{НВЗ}}$  – гідравлічний коефіцієнт для непідтопленого зливу (звичайно приймають  $k_{\text{НВЗ}} = 0,42 \div 0,5$ ).

З рівняння (1) виразимо величину напору:

$$H = \sqrt[3]{\frac{Q_{V_{\text{КС}}}^2}{2 \cdot g \cdot k_{\text{НВЗ}}^2 \cdot B_{\text{ЗЛ}}^2}}; \quad \left[ \text{М} = \frac{\text{М}^6 \cdot \text{С}^2}{\text{С}^2 \cdot \text{М} \cdot \text{М}^2} \right] \quad (2)$$

Для розрахунку гідравлічного коефіцієнта використовують емпіричні формули, наприклад, формулу Ребока:

$$k_{\text{НВЗ}} = 0,403 + 0,53 \cdot \frac{H}{h_{\text{СТВН}}} + \frac{0,0007}{H}, \quad (3)$$

де  $h_{\text{СТВН}}$  – висота стінки водозливу з боку верхнього б'єфу.

У точці найбільшого під'йому нижнього контуру потоку (рис.) товщина

останнього становить  $0,668 \cdot H$ . У точці цього перетину на глибині  $\frac{2}{3} \cdot H_{\text{зл}}$  (від дзеркала рідини) горизонтальна складова швидкості становить  $v_x = 0,7 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{зл}}}$ .

Нижню лінію течії можна апроксимувати параболою з вершиною в точці  $\{x_B = 0,27 \cdot H_{\text{зл}}; y_B = 0,112 \cdot H_{\text{зл}}\}$  [2]. Рівняння такої параболи, що проходить через точку  $\{x_{\text{Гс}} = 0; y_{\text{Гс}} = 0\}$  ( $x_{\text{Гс}}$  та  $y_{\text{Гс}}$  – відповідно горизонтальна та вертикальна координати), що відповідає верхній межі зливу, будемо шукати у вигляді:

$$y = a + b \cdot (x - c)^2 \quad (4)$$

Коефіцієнти такої параболи дорівнюють:

$$a = y_B = 0,112 \cdot H; c = x_B = 0,27 \cdot H; b = \frac{y_{\text{Гс}} - y_B}{(x_{\text{Гс}} - x_B)^2} = -1,536 \cdot \frac{1}{H_{\text{зл}}} \quad (5)$$

Тоді рівняння (4) набуває вигляду:

$$y = \left(0,112 - 1,536 \cdot \left(\frac{x}{H} - 0,27\right)^2\right) \cdot H \quad (6)$$

Похідна, що визначає напрямок вектору швидкості, дорівнює:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -3,072 \cdot \left(\frac{x}{H} - 0,27\right). \quad (7)$$

Звідси можна визначити напрямок вектору швидкості потоку в точці пошуку крупності розділення  $\{x_{\text{Гс}} = 0; y_{\text{Гс}} = 0\}$  – а саме, кут його нахилу до горизонталі  $\varphi_{\text{Гс}}$ :

$$\varphi_{\text{Гс}} = \tan^{-1} 0,82944 = 39^\circ 20' \quad (8)$$

Вертикальна –  $v_{\text{Гсв}}$ , та горизонтальна –  $v_{\text{Гсг}}$  складові швидкості в точці  $\{x_{\text{Гс}} = 0; y_{\text{Гс}} = 0\}$  пов'язані залежністю:

$$v_{\text{Гсв}} = v_{\text{Гсг}} \cdot \tan \varphi_{\text{Гс}} \quad (9)$$

Оскільки вертикальна складова змінюється під дією сили тяжіння від  $v_{\text{Гсв}}$  в точці  $\{x_{\text{Гс}} = 0; y_{\text{Гс}} = 0\}$  до нуля в точці  $\{x_B; y_B\}$ , то, з урахуванням того, що висота підйому над рівнем ребра зливу в точці  $\{x_B; y_B\}$  становить  $0,668 \cdot H$  (Рис.1), справедливо записати:

$$v_{\text{Гсв}} = 0,473 \cdot \sqrt{g \cdot H} \quad (10)$$

Таким чином, вертикальна складова швидкості потоку в точці дотику струменя до гребеня зливу однозначно визначається напором зливу.

Горизонтальна складова швидкості зливу може бути визначена з (9) після підстановки в нього (10) і розв'язання щодо  $v_{\text{Гсг}}$ :

$$v_{\text{Гсг}} = 0,57 \cdot \sqrt{g \cdot H} \quad (11)$$

В якості оцінки  $v_{\text{СТ}}$  в даному випадку приймається  $v_{\text{Гсв}}$ , розрахована за рівнянням (10).

Дана складова швидкості може бути розрахована за формулою Годена [3]:

$$v_{CT} = v_{CB} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\gamma_{II}^2}\right) \cdot (1 - \gamma_{II}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{II}), \quad (12)$$

де  $v_{CB}$  – швидкість вільного (нестисненого) падіння частинки в рідині;  $\gamma_{II}$  – частина об'єму пульпи, зайнята твердими частинками, при цьому:

$$\gamma_{II} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_T - \rho_{CL}}{\rho_{CL} - \rho_B}} = \frac{\rho_{CL} - \rho_B}{\rho_T - \rho_B}, \quad (13)$$

де  $\rho_T$  – густина твердого в зливі;  $\rho_B$  – густина води;  $\rho_{CL}$  – густина пульпи зливу.

Тоді:

$$v_{CB} = \frac{v_{CT}}{\left(1 - \sqrt[3]{\gamma_{II}^2}\right) \cdot (1 - \gamma_{II}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{II})}. \quad (14)$$

Вільне падіння одиночної частинки діаметром  $d_{ch}$  в рідині описується рівнянням:

$$\frac{\pi \cdot d_{ch}^3}{6} \cdot (\rho_T - \rho_B) \cdot g = C_D \cdot \frac{\pi \cdot d_{ch}^2}{6} \cdot \frac{v_{CB}^2}{2} \cdot \rho_B \left[ \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{С}^2} = \text{Н} \right] \quad (15)$$

де:  $\rho_T, \rho_B$  – густина частинки твердого і води відповідно;  $v_{CB}$  – швидкість вільного падіння частинки;  $C_D$  – коефіцієнт лобового опору частинки.

Звідки отримаємо:

$$d_{ch} = 0,75 \cdot C_D \cdot \frac{v_{CB}^2}{g} \cdot \frac{\rho_B}{\rho_T - \rho_B} \quad (16)$$

**Наближена оцінка максимального діаметра частинок в зливі класифікатора.** Слід зазначити, що потік в зливі має частково турбулентний характер. В результаті, частинка в зливі зазнає не тільки поступального вертикального та горизонтального, але і вихрового руху. Наслідком цього є рівномірність обтікання частинки водою і можливість застосувати формулу Стокса для розрахунку коефіцієнта лобового опору:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (17)$$

Число Рейнольдса  $Re$  розраховується як:

$$Re = \frac{\rho_B \cdot d_{ch} \cdot v_{CB}}{\mu_B} \quad (18)$$

де  $\mu_B$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води.

Для попередньої оцінки прийmemo:  $\mu_B = 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{С}}{\text{М}^2}$ .

Після підстановки (17) та (18) в (15), отримаємо:

$$v_{CB} = \frac{g \cdot d_q^2 \cdot (\rho_T - \rho_B)}{18 \cdot \mu_B} \quad (19)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт в'язкості води істотно залежить від температури води. Тоді і швидкість вільного падіння також залежить від даного параметра.

Прирівнюючи  $v_{CB}$  до  $v_{CT}$  та вирішуючи відносно  $d_q$ , отримуємо індикативне значення діаметра частинки для оцінки фракційного складу твердого в зливні класифікатора –  $d_{індзл}$ :

$$d_{індзл} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_B \cdot v_{CB}}{g \cdot (\rho_T - \rho_B)}} \quad (20)$$

$$d_{індзл} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_B \cdot 0,473 \cdot \sqrt{g \cdot H}}{g \cdot (\rho_T - \rho_B) \cdot (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\Pi}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\Pi}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\Pi})}} \quad (21)$$

де:  $\rho_T, \rho_B$  – густина частинки твердого і води відповідно;  $\mu_B$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води.

Назвемо цей показник індикативною крупністю частинок в зливні класифікатора. Будь-яка його зміна буде ідентифікувати зміну властивостей руди і параметрів розділення. Властивість частинки є функцією її розміру та вмісту цінного компоненту. Тому при подальшому аналізі, в залежності від необхідності, ці параметри є рівнозначними.

**Вплив режимних факторів потоку пульпи на сепараційні властивості класифікатора.** Базовими факторами, що впливають на сепараційні властивості класифікатора, і які можуть контролюватися безпосередньо або опосередковано, є:  $Q_{V_{KC}}$  – об'ємна витрата пульпи через водозлив;  $t_{\Pi}^0$  – температура пульпи в класифікаторі;  $\rho_T$  – густина частинок руди (твердого);  $\rho_{зл}$  – густина пульпи зливу;  $Q_{mв}$  – масова витрата води в зливні класифікатора,  $\left[\frac{кг}{с}\right]$ ;  $Q_{mр}$  – масова витрата твердого (руди) в зливні класифікатора.

Густина води  $\rho_B = const$ . Підставивши (2) у (21), маємо:

$$d_{індзл} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_B \cdot 0,473 \cdot \sqrt{g \cdot \sqrt[3]{\frac{Q_{V_{KC}}^2}{2 \cdot g \cdot k_{HВЗ}^2 \cdot B_{зл}^2}}}}{g \cdot (\rho_T - \rho_B) \cdot (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\Pi}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\Pi}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\Pi})}} \quad (22)$$

Знайдемо часткові похідні за аргументами правої частини з метою визначення чутливості індикативного діаметра частинок до зміни параметрів класифікації:

$$\frac{\partial d_{\text{індзл}}}{\partial \mu_{\text{в}}} = \frac{k_{d_{\text{кк}}}}{2} \cdot \frac{\mu_{\text{в}}^{-\frac{1}{2}} \cdot Q_{V_{\text{кк}}}^{\frac{2}{3}}}{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left( (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\text{п}}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\text{п}}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\text{п}}) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial d_{\text{індзл}}}{\partial Q_{V_{\text{кк}}}} = \frac{2}{3} \cdot k_{d_{\text{кк}}} \cdot \frac{\mu_{\text{в}}^{\frac{1}{2}} \cdot Q_{V_{\text{кк}}}^{-\frac{1}{3}}}{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left( (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\text{п}}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\text{п}}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\text{п}}) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

$$\frac{\partial d_{\text{індзл}}}{\partial \rho_{\text{т}}} = -\frac{1}{2} \cdot k_{d_{\text{кк}}} \cdot \frac{\mu_{\text{в}}^{\frac{1}{2}} \cdot Q_{V_{\text{кк}}}^{\frac{2}{3}}}{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}})^{\frac{3}{2}} \cdot \left( (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\text{п}}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\text{п}}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\text{п}}) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial d_{\text{індзл}}}{\partial \gamma_{\text{п}}} = -\frac{1}{2} \cdot k_{d_{\text{кк}}} \cdot \frac{\mu_{\text{в}}^{\frac{1}{2}} \cdot Q_{V_{\text{кк}}}^{\frac{2}{3}} \cdot (1 - \gamma_{\text{п}}) \cdot \left( \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot \gamma_{\text{п}}^{-\frac{1}{3}} \right) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\text{п}}) \cdot -2,5 \cdot \left( 1 - \gamma_{\text{п}}^{\frac{2}{3}} \right) \right)}{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{в}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left( (1 - \sqrt[3]{\gamma_{\text{п}}^2}) \cdot (1 - \gamma_{\text{п}}) \cdot (1 - 2,5 \cdot \gamma_{\text{п}}) \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (26)$$

Розглянемо розв'язання щодо незалежних факторів, які піддаються контролю:  $t_{\text{в}}^0$  – температура води в класифікаторі;  $\rho_{\text{т}}$  – густина частинок руди (твердого);  $Q_{\text{мв}}$  – масова витрата води в зливні класифікатора;  $Q_{\text{мр}}$  – масова витрата твердого (руди) в зливні класифікатора.

В такому випадку, від температури пульпи з величин, що входять в (20), (21), (22), буде залежати тільки її в'язкість, яку в подальшому і будемо розглядати як параметр, що піддається контролю.

Для того, щоб визначити  $d_{\text{індзл}}$  через незалежні контрольовані змінні, виразимо через них величини, що входять в (22), а саме  $Q_{V_{\text{кк}}}$  та  $\gamma_{\text{п}}$ :

$$Q_{V_{\text{кк}}} = \frac{Q_{\text{мр}}}{\rho_{\text{т}}} + \frac{Q_{\text{мв}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{Q_{\text{мр}} \cdot \rho_{\text{в}} + Q_{\text{мв}} \cdot \rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}} \cdot \rho_{\text{в}}}, \quad (27)$$

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot Q_{\text{мр}}}{(Q_{\text{мр}} \cdot \rho_{\text{в}} + Q_{\text{мв}} \cdot \rho_{\text{т}})} \quad (28)$$

Густина зливу класифікатора (опосередковано контрольований параметр) становитиме:

$$\rho_{\text{зл}} = \frac{\frac{Q_{\text{мр}}}{\rho_{\text{т}}} + \frac{Q_{\text{мв}}}{\rho_{\text{в}}}}{\frac{Q_{\text{мр}} \cdot \rho_{\text{в}} + Q_{\text{мв}} \cdot \rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}} \cdot \rho_{\text{в}}}} = \frac{\rho_{\text{т}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (Q_{\text{мр}} + Q_{\text{мв}})}{Q_{\text{мр}} \cdot \rho_{\text{в}} + Q_{\text{мв}} \cdot \rho_{\text{т}}} \quad (29)$$

Якщо є пристрій, що безпосередньо контролює густину пульпи зливу класифікатора, то  $\gamma_{\text{п}}$  визначається через (13).

Одним із можливих способів ідентифікації густини руди на вході в секцію



збагачення є ідентифікація за параметрами подачі руди в млин першої стадії подрібнення. Він заснований на тому, що тічки, з яких руда надходить на конвеєр, налаштовуються таким чином, щоб товщина і ширина шару руди на входному конвеєрі була постійною.

Тоді об'єм руди, що надходить за час  $\Delta\tau$  в млин ( $V_{\text{ВХ}\Delta\tau}$ ), може бути оцінений за формулою:

$$V_{\text{ВХ}\Delta\tau} = k_{\text{ВХ}} \cdot v_{\text{КЗ}} \cdot \Delta\tau, \quad (30)$$

де  $v_{\text{КЗ}}$  – лінійна швидкість руху стрічки конвеєра;  $k_{\text{ВХ}}$  – коефіцієнт пропорційності. Даний коефіцієнт може бути розрахований за площею поперечного перетину шару руди на конвеєрі (він стабільний, але, в принципі, може трохи змінювати розміри в залежності від поточної швидкості  $v_{\text{КЗ}}$ ) і коефіцієнтом заповнення об'єму залізною рудою.

В підсумку, коефіцієнт пропорційності розрахований і прийнятий постійним –  $k_{\text{ВХ}} = \text{const}$ , або розраховується за лінійною моделлю:

$$k_{\text{ВХ}} = k_{\text{ВХ}_0} + k_{\text{ВХ}_V} \cdot v_{\text{КЗ}}. \quad (31)$$

Маса руди, що надходить за час  $\Delta\tau$  в млин –  $m_{\text{р}\Delta\tau}$ , розраховується на основі даних про витрату руди –  $Q_{\text{р}}$ , що контролюється конвеєрними вагами:

$$m_{\text{р}\Delta\tau} = Q_{\text{р}} \cdot \Delta\tau \quad (32)$$

Тоді густина руди –  $\rho_{\text{р}}$ , може бути розрахована наступним чином:

$$\rho_{\text{р}} = \frac{m_{\text{р}\Delta\tau}}{V_{\text{ВХ}\Delta\tau}} = \frac{1}{k_{\text{ВХ}}} \cdot \frac{Q_{\text{р}}}{v_{\text{КЗ}}} \quad (33)$$

Якщо відома вологість руди – масовий вміст води в руді –  $\xi_{\text{р}}$ , то густина «сухої» руди визначається як:

$$\rho_{\text{р(сх)}} = \frac{\rho_{\text{р}}}{1 - \xi_{\text{р}}} \quad (34)$$

Руду, в загальному випадку, можна представити як суміш двокомпонентних частинок, що складаються з магнетиту, густина якого відома ( $\delta_{\text{м}}$ ), та іншої породи з середньою густиною  $\delta_{\text{п}}$ . Ці дві густини пов'язані з густиною руди і вмістом магнетиту в ній ( $\alpha_{\text{вих}}$ ) залежністю типу (13), яка для масових співвідношень набуває вигляду:

$$\delta_{\text{р}} = \frac{\delta_{\text{м}} \cdot \delta_{\text{п}}}{\delta_{\text{м}} - \alpha_{\text{вих}} \cdot (\delta_{\text{м}} - \delta_{\text{п}})} \quad (35)$$

Таким чином, всі необхідні теоретичні та кількісні передумови нами визначено. Перейдемо до чисельної перевірки отриманих результатів. Що виконаємо в другій частині статті.

**Висновок.** Моделювати процес розділення твердого в спіральному класифікаторі досить в пристінковій області його зливу, так як масштаб турбулентності можна порівняти з розміром класифікатора. Моделювання здійснюється шляхом

визначення граничної крупності розділення, яка формується над гребенем зливного порогу, і називається індикативною крупністю частинок. Крім того, в розрахунках слід враховувати зміну температури пульпи для обчислення показників в'язкості середовища.

#### Перелік посилань

1. Агроскин, И.И., Дмитриев, Г.Т., & Пикалов, Ф.И. (1964). *Гидравлика*. Энергия.
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.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Повышение точности оценки сепарационного режима спирального классификатора.

**Методика исследования** заключается в установлении индикативной крупности разделения в соответствии с теоретическими построениями и количественными соотношениями параметров классификации.

**Результаты исследования.** Выполнен анализ физических процессов, происходящих в потоке пульпы, расположенном непосредственно перед сливным порогом. Получена математическая модель расслоения твердой фазы в этой части потока.

**Научная новизна.** Согласно теоретическим построениям и количественным соотношениям, получена зависимость значения максимальной крупности частиц в потоке пульпы, расположенном над гребнем сливного порога. То есть, индикативная крупность, которая определяет границу разделения функции распределения частиц по крупности на две части: частицы большего размера оседают и выносятся в пески, а более тонкие – поступают в слив. Значение этой крупности зависит от режимных параметров классификации, а функция распределения зависит от физических свойств перерабатываемой руды. Моделировать процесс разделения твердого в спиральном классификаторе достаточно в пристеночной области его слива, так как масштаб турбулентности можно сравнить с размером классификатора. Кроме того, в расчетах следует учитывать изменение температуры пульпы для вычисления показателей вязкости среды.

**Практическая значимость.** Индикативная крупность, полученная на основе математической модели, определяет все дальнейшие качественные показатели обогащительного процесса, и может быть установлена на основании показателей, которые могут быть непосредственно измерены или вычислены автоматически в режиме реального времени. Таким образом, становится возможным вести управление подготовительным процессом для достижения стабильных показателей качества концентрата.

**Ключевые слова:** турбулентность потока пульпы в классификаторе, индикативная крупность, функция распределения частиц по крупности, частные производные от режимных параметров классификации.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Improving the accuracy of evaluating the separation mode of the spiral classifier.

**The methodology** of research consists on establishment of the indicative size of the separation in accordance with the theoretical constructions and quantitative ratios of the classification parameters.

**Findings.** The analysis of physical processes occurring in the pulp stream located just before the overflow weir was performed. A mathematical model of the solid phase stratification in this part of the flow was obtained.

**Originality.** According to the theoretical constructions and quantitative relations, the dependence of the value of the maximum particle size in the pulp flow located above the crest of the overflow weir was obtained. That is, the indicative size, which determines the boundary of the division of the particle size distribution function into two parts: larger particles settle and are carried to the sands, and thinner ones – go into the overflow. The value of this size depends on the regime parameters of the classification, and the distribution function depends on the physical properties of the processed ore. It is sufficient to simulate the process of solid particles separation in spiral classifier in the near-wall area of its overflow, since the scale of turbulence can be compared with the size of the classifier. In addition, the calculations should take into account the change in pulp temperature to calculate the viscosity of the medium.

**Practical implication.** Indicative particle size, which was obtained on the basis of this mathematical model, determines all further qualitative indicators of the enrichment process, and can be established on the basis of indicators that can be directly measured or calculated automatically in real-time mode. Thus, it becomes possible to manage the preparatory process to achieve stable quality indicators of the concentrate.

**Keywords:** *turbulence of pulp flow in the classifier, indicative size, particle size distribution function, partial derivatives of classification regime parameters.*