

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.7

Морозюк С. В., асистент, **Калько А. Д.**, д.геогр.н., доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Мащенко В. А.**, к.ф.-м.н., доц., **Сідлецький В. О.**, к.ф.-м.н., доц. (Рівненський державний гуманітарний університет)

МОДЕЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПОТОКІВ ПРИ ДЕЗІНТЕГРАЦІЙНОМУ ВІДПРАЦЮВАННІ ВАЖКОПРОМИВНИХ РОЗСИПНИХ РОДОВИЩ

На базі систем диференціальних динамічних рівнянь, що описують рух трифазної гетерогенної гідросуміші (рідка фаза, пульпа і бульбашки повітря), побудовано модель гідродинамічних потоків у камері комплексу механо-гідравлічного добутку важкопромивних розсипних родовищ.

Ключові слова: гідродинамічні потоки, гідросуміш, пульпа.

Вступ. Технологія відпрацювання важкопромивних розсипних корисних копалин передбачає процес дезінтеграції корисної компоненти за рахунок тангенціального введення напірної води з одночасним обертанням виконавчого органу комплексу механо-гідравлічного добутку (КМГД). Даний процес призводить до обертання утвореної пульпи за напрямками осевого і радіального переміщення від стінок виймальної камери КМГД до превентора, де відбувається накопичення корисної компоненти.

Експериментальні дослідження показують, що у камері КМГД при відпрацюванні утворюються три зони гідродинамічних потоків: зовнішня (пристінна) – низхідна (1); внутрішня – висхідна (3); середня – циркуляційна (2), яка займає основний об'єм виймальної камери (рисунок).

Основними факторами, які підвищують розділення пульпи, є низхідна безвихрова течія концентрованого потоку мілких важких частинок пульпи і винос вихровим циркуляційним потоком частинок корисної компоненти у приосьову висхідну зону КМГД.

Гідродинамічна структура потоку багатозфазного середовища (рідина, тверда фаза, газоподібна фаза) є достатньо складною, що зумовле-

но взаємодією різних фаз між собою. Тому для її дослідження слід використовувати рівняння багатофазних середовищ [1, 2].

Складний характер таких потоків змушує вдаватися до експериментальних досліджень та імітаційного моделювання, враховуючи різні спрощення і припущення в залежності від характеру руху різних фаз гідросуміші у камері. Беручи до уваги складність характеру руху потоків, на основі моделювання можна встановити лише окремі наближені закономірності зміни деяких параметрів, а остаточні технологічні параметри дезінтеграції визначаються лише на основі досвідних даних.

Метою роботи є побудова моделі гідродинамічних потоків у камері КМГД з урахуванням геометрії зон та фізичних властивостей важкопримивної пульпи.

Модель. Для моделювання гідродинаміки потоків гідросуміші у камері КМГД використовуємо рівняння нерозривності та Нав'є – Стокса без урахування в'язкості і теплопровідності [3]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \text{div} \vec{V} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{f} - \frac{\nabla p}{\rho}, \quad (2)$$

де ρ – щільність; t – час; \vec{V} – швидкість руху; \vec{f} – рівнодійна об'ємних сил; p – тиск.

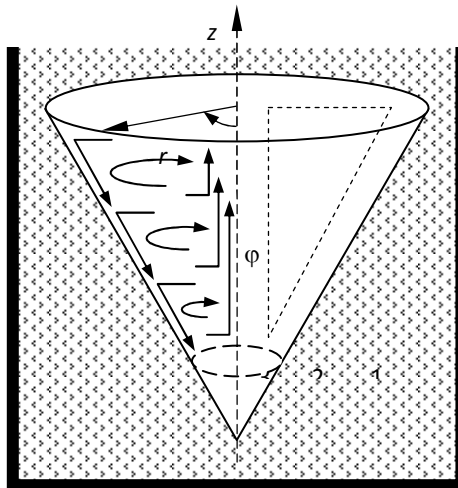


Рисунок. Схема гідропотоків у камері КМГД

Математичну модель руху трифазної гідросуміші представимо наступними системами диференціальних рівнянь нерозривності (3) – (5) і руху (6) – (8), записаними в циліндричній системі координат (r, θ, z) відповідно для рідкої, та двох дискретних фаз – твердої і газоподібної (бульбашки повітря), де єдиною об'ємною силою є сила тяжіння F [4].

Рух будемо розглядати з континуальної точки зору, враховуючи, що кожна фаза рухається із власною швидкістю, нехтуючи силами безпосереднього тертя, взаємоперетвореннями фаз „вода – повітря” і навпаки, а також взаємодіями твердих і газоподібних частинок:

$$(1 - C_1 - C_2) \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_0 v_0^2 \frac{\partial C_1}{\partial t} - \rho_0 v_0^2 \frac{\partial C_2}{\partial t} + \rho_0 v_0^2 (1 - C_1 - C_2) \times \left(\frac{\partial V_{0r}}{\partial r} + \frac{V_{0r}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{0\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_{0z}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$C_1 \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_1 v_1^2 \frac{\partial C_1}{\partial t} + \rho_1 v_1^2 C_1 \left(\frac{\partial V_{1r}}{\partial r} + \frac{V_{1r}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{1\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_{1z}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

$$C_2 \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_2 v_2^2 \frac{\partial C_2}{\partial t} + \rho_2 v_2^2 C_2 \left(\frac{\partial V_{2r}}{\partial r} + \frac{V_{2r}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{2\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_{2z}}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\left(1 + \frac{C_1 n_1 + C_2 n_2}{2} \right) \frac{\partial \vec{V}_0}{\partial t} - \frac{C_1 n_1}{2} \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} - \frac{C_2 n_2}{2} \frac{\partial \vec{V}_2}{\partial t} + (\vec{V}_0 \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_0 = \vec{F} - \frac{(1 - C_1 - C_2)}{\rho_0} \vec{\nabla} p \quad (6)$$

$$\left(\frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{n_1}{2} \right) \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} - \left(1 + \frac{n_1}{2} \right) \frac{\partial \vec{V}_0}{\partial t} + (\vec{V}_1 \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_1 = \vec{F} - \frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p \quad (7)$$

$$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{n_2}{2} \right) \frac{\partial \vec{V}_2}{\partial t} - \left(1 + \frac{n_1}{2} \right) \frac{\partial \vec{V}_0}{\partial t} + (\vec{V}_2 \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_2 = \vec{F} - \frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p, \quad (8)$$

де n_1, n_2 – коефіцієнти, що враховують несферичність частинок, а також концентрації твердих частинок і бульбашок повітря на приєднаних масах; ρ_i – щільність фази; V_i – швидкість фази; v_i – швидкість звуку у фазі; C_i – концентрація фази; індекси 0 – гідросуміш; 1 – пульпа; 2 – бульбашки повітря.

При стаціонарному режимі математичну модель руху трифазної гідросуміші для різних фаз подамо у вигляді систем для складових швидкості руху (V_r, V_φ, V_z):

$$\left\{ \begin{aligned}
 & V_{0r} \frac{\partial V_{0r}}{\partial r} + \frac{V_{0\varphi}}{r} \frac{\partial V_{0r}}{\partial \varphi} + V_{0z} \frac{\partial V_{0r}}{\partial z} - \frac{V_{0\varphi}^2}{r} = - \frac{(1 - C_1 - C_2)}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} - \\
 & - \left(\frac{C_1 C_{xm}}{R_1} |V_{0r} - V_{1r}| (V_{0r} - V_{1r}) + \frac{C_2 C_{x\bar{\sigma}}}{R_2} |V_{0r} - V_{2r}| (V_{0r} - V_{2r}) \right) \\
 & V_{0r} \frac{\partial V_{0\varphi}}{\partial r} + \frac{V_{0\varphi}}{r} \frac{\partial V_{0\varphi}}{\partial \varphi} + V_{0z} \frac{\partial V_{0\varphi}}{\partial z} - \frac{V_{0r} V_{0\varphi}}{r} = - \frac{(1 - C_1 - C_2)}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - \\
 & - \left(\frac{C_1 C_{xm}}{R_1} |V_{0\varphi} - V_{1\varphi}| (V_{0\varphi} - V_{1\varphi}) + \frac{C_2 C_{x\bar{\sigma}}}{R_2} |V_{0\varphi} - V_{2\varphi}| (V_{0\varphi} - V_{2\varphi}) \right) \\
 & V_{0r} \frac{\partial V_{0z}}{\partial r} + \frac{V_{0\varphi}}{r} \frac{\partial V_{0z}}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_{0z}}{\partial z} = -(1 - C_1 - C_2) \left(g \pm \frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \\
 & - \left(\frac{C_1 C_{xm}}{R_1} |V_{0z} - V_{1z}| (V_{0z} - V_{1z}) + \frac{C_2 C_{x\bar{\sigma}}}{R_2} |V_{0z} - V_{2z}| (V_{0z} - V_{2z}) \right)
 \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 & V_{1r} \frac{\partial V_{1r}}{\partial r} + \frac{V_{1\varphi}}{r} \frac{\partial V_{1r}}{\partial \varphi} + V_{1z} \frac{\partial V_{1r}}{\partial z} - \frac{V_{1\varphi}^2}{r} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} - \\
 & - \left(\frac{C_{xm}}{R_1} |V_{0r} - V_{1r}| (V_{0r} - V_{1r}) \right) \\
 & V_{1r} \frac{\partial V_{1\varphi}}{\partial r} + \frac{V_{1\varphi}}{r} \frac{\partial V_{1\varphi}}{\partial \varphi} + V_{1z} \frac{\partial V_{1\varphi}}{\partial z} - \frac{V_{1r} V_{1\varphi}}{r} = - \frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - \\
 & - \left(\frac{C_{xm}}{R_1} |V_{0\varphi} - V_{1\varphi}| (V_{0\varphi} - V_{1\varphi}) \right) \\
 & V_{1r} \frac{\partial V_{1z}}{\partial r} + \frac{V_{1\varphi}}{r} \frac{\partial V_{1z}}{\partial \varphi} + V_{1z} \frac{\partial V_{1z}}{\partial z} = - \frac{\rho_1}{\rho_0} g - \frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial z} - \\
 & - \left(\frac{C_{xm}}{R_1} |V_{0z} - V_{1z}| (V_{0z} - V_{1z}) \right)
 \end{aligned} \right. , \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{2r} \frac{\partial V_{2r}}{\partial r} + \frac{V_{2r}}{r} \frac{\partial V_{2r}}{\partial \varphi} + V_{2z} \frac{\partial V_{2r}}{\partial z} - \frac{V_{2\varphi}^2}{r} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} - \\ \left(\frac{C_{x\delta}}{R_2} |V_{0r} - V_{2r}| (V_{0r} - V_{2r}) \right) \\ V_{2r} \frac{\partial V_{2\varphi}}{\partial r} + \frac{V_{2\varphi}}{r} \frac{\partial V_{2\varphi}}{\partial \varphi} + V_{2z} \frac{\partial V_{2\varphi}}{\partial z} - \frac{V_{2r} V_{2\varphi}}{r} = -\frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - \\ \left(\frac{C_{x\delta}}{R_2} |V_{0\varphi} - V_{2\varphi}| (V_{0\varphi} - V_{2\varphi}) \right) \\ V_{2r} \frac{\partial V_{2z}}{\partial r} + \frac{V_{2\varphi}}{r} \frac{\partial V_{2z}}{\partial \varphi} + V_{2z} \frac{\partial V_{2z}}{\partial z} = -\frac{\rho_2}{\rho_0} g - \frac{1}{\rho_0 r} \frac{\partial p}{\partial z} - \\ \left(\frac{C_{x\delta}}{R_2} |V_{0z} - V_{2z}| (V_{0z} - V_{2z}) \right) \end{array} \right. , \quad (11)$$

де g – прискорення вільного падіння, R_1, R_2 – еквівалентні радіуси твердих частинок і повітряних бульбашок.

Для трьох зон камери КМГД (низхідної, циркуляційної і висхідної) зробимо наступні спрощення і припущення.

У низхідній зоні відсутні бульбашки повітря, кутові швидкості є постійними величинами

$$V_{i\varphi} = const , \quad (12)$$

не має зміни радіальної складової швидкості за кутом повороту, відсутні зміни тангенціальної складової швидкості по z -координаті і відсутній градієнт тиску $\left(\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \right)$.

У циркуляційній зоні відсутні зміни складові швидкостей по z -координаті. Граничні умови на межі поділу областей визначаються наступним чином: $V_{0r}^{(низхідна)} = V_{0r}^{(циркуляційна)}$, $V_{1r}^{(низхідна)} = V_{1r}^{(циркуляційна)}$, $V_{0\varphi}^{(низхідна)} = V_{0\varphi}^{(циркуляційна)}$, $V_{1\varphi}^{(низхідна)} = V_{1\varphi}^{(циркуляційна)}$, а зміна кутових швидкостей описується співвідношенням [5]:

$$V_{i\varphi} r^\gamma = const , \quad (13)$$

де γ є функцією тиску.

У висхідній зоні кутові швидкості є постійними величинами, немає зміни радіальної складової швидкості за кутом повороту, відсутні змі-

ни тангенціальної складової швидкості по z -координаті та градієнт тиску $\left(\frac{\partial p}{\partial r} = 0\right)$. Граничні умови мають наступний вигляд:

$$V_{0r}^{(\text{циркуляційна})} = V_{0r}^{(\text{висхідна})}, V_{1r}^{(\text{низхідна})} = V_{1r}^{(\text{циркуляційна})}, V_{2r}^{(\text{низхідна})} = V_{2r}^{(\text{циркуляційна})}, \\ V_{0\phi}^{(\text{циркуляційна})} = V_{0\phi}^{(\text{висхідна})}, V_{1\phi}^{(\text{циркуляційна})} = V_{1\phi}^{(\text{висхідна})}, V_{2\phi}^{(\text{циркуляційна})} = V_{2\phi}^{(\text{висхідна})}.$$

Приведена математична модель може бути реалізована із використанням методів скінчених різниць [6] і контрольних об'ємів [7].

Висновки. Для моделювання дезінтеграційного процесу у камері КМГД отримані системи рівнянь на основі багатофазної динамічної моделі руху складових гідросуміші.

Оцінка концентрації корисної компоненти у трьох зонах камери КМГД при різних умовах дезінтеграційного процесу в залежності від радіуса дасть змогу розробити технологічні рекомендації стосовно оптимізації гідророзмиву важкопромивних розсипних родовищ.

Авторами передбачається у подальших дослідженнях отримані результати взяти за базові при аналізі особливостей дезінтеграції твердої фази корисної компоненти у камері КМГД.

1. Лойцянский Р. И. Механика жидкостей и газа / Р. И. Лойцянский. – М. : Наука, 1970. – 960 с.
2. Фортъе Г. Механика суспензий / Г. Фортъе. – М. : Мир, 1971. – 264 с.
3. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Уоллис Г. – М. : Мир, 1972. – 440 с.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
5. Поваров А. И. Гидроциклоны / А. И. Поваров. – М. : Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1961. – 268 с.
6. Ивлев В. М. Численное моделирование турбулентных течений / В. М. Ивлев. – М. : Наука, 1990. – 216 с.
7. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене / А. А. Приходько. – К. : Наукова думка, 2003. – 379 с.

Рецензент д.т.н., проф. Власюк А. П. (НУВГП)

Moroziuk S. V., Assistant, Kalko A. D., Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne), Mashchenko V. A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Sidletskyi V. A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Rivne State Humanitarian University)

MODEL OF HYDRODYNAMIC FLOWS AT DISINTEGRATIONS MINING OF HARDLY WASHED PLACER DEPOSITS

A model is constructed of hydrodynamic flows in the chamber of the complex mechanical and hydraulic mining of hardly washed placer deposits on the basis of system of differential dynamic equations describing the motion of a three-phase heterogeneous slurry (liquid phase, sludge and air bubbles)

Keywords: hydrodynamic flows, slurry, sludge.

Морозюк С. В., асистент, **Калько А. Д.,** д.геогр.н., доцент (Національний університет водного господарства та природопользования, г. Ровно), **Мащенко В. А.,** к.ф.-м.н., доцент, **Сидлецкий В. А.,** к.ф.-м.н., доцент (Ривненський державний гуманітарний університет)

**МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРИ
ДЕЗИНТЕГРАЦИОННОЙ ОТРАБОТКЕ
ТЯЖЕЛОПРОМЫВНЫХ РАССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

На базе систем дифференциальных динамических уравнений, описывающих движение трехфазной гетерогенной гидросмеси (жидкая фаза, пульпа и пузырьки воздуха), построена модель гидродинамических потоков в камере комплекса механо-гидравлической добычи тяжелопромывных рассыпных месторождений.

Ключевые слова: гидродинамические потоки, гидросмесь, пульпа.
