

**П.І. ПІЛОВ**, д-р техн. наук,**К.А. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук,**В.Ю. ШУТОВ**

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"),

**І.В. САМОФАЛ, О.М. ЧУМАК, Є.П. КОРЧАГІН**

(Україна, Вільногірськ, Акціонерне товариство "Об'єднана гірничо-хімічна компанія" філія "Вільногірський гірничо-металургійний комбінат")

## **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО РОДОВИЩА ВІЛЬНОГІРСЬКОГО ГМКа**

Вільногірський гірничо-металургійний комбінат (ВГМК) видобуває й переробляє титано-цирконієві піски Східної ділянки Малишевського родовища уже майже понад 30 років. В 2025 році очікується завершення відпрацювання вказаної ділянки. Перед підприємством постало питання зміни виду діяльності, або перехід на збагачення техногенного родовища, а саме відходів підприємства, які накопичилися за 60 років його існування.

В процесі відпрацювання Східної ділянки утворилося понад 200 млн. тонн відходів виробництва, які за мінеральним складом вміщують до 20% глинистих домішок, 70...75% кварцового піску, а також містять близько 0,8...2,0% мінералів важкої фракції. Вміст до 1,5% мінералів важкої фракції у відходах підприємства обумовлений прийнятою технологією переробки рудних пісків на збагачувальному виробництві і є нормованими втратами для задіяної технологічної схеми з особливостями її побудови та встановленим апаратним наповненням технологічного ланцюжка, який сформований в період 60...80-х років ХХ сторіччя з використанням в якості основних збагачувальних апаратів конусних сепараторів (на ділянці гравітаційного збагачення), пластинчатих електростатичних та валкових електромагнітних сепараторів (на ділянці доводочних операцій).

Мінералогічний склад пісків Малишевського родовища Східної ділянки, техногенного родовища ВГМК та відходів поточного виробництва ВГМК станом на червень 2019 року наведено в табл. 1.

Як видно із табл. 1. в процесі відпрацювання Малишевського родовища практично повністю вилучені такі мінерали, як циркон, рутил та лейкоксен. Відходи виробництва ВГМК та його техногенне родовище представлено в основному мінералами ільменіту, дистен-силліманіту, ставроліту та турмаліну. Тому при вторинному відпрацюванні відходів ВГМК необхідно не лише отримати моноконцентрати мінералів важкої фракції, а також отримати кварцовий пісок з вмістом важкої фракції менше 0,1% та вмістом  $Fe_2O_3$  не більше 0,025%, що дозволить ефективно його використовувати, як високоякісну кварцову сировину в скляній промисловості. При розробці схеми переробки техногенного родовища ВГМК та відходів поточного виробництва необхідно застосувати но-

## **Загальні питання технологій збагачення**

ві розробки в галузі моделювання схем збагачення, які дозволяють прогнозувати показники збагачувального виробництва з дуже високою точністю при зміні сировинної бази, технології збагачення, або устаткування. Але одна із умов такого моделювання необхідно мати сепараційну характеристику розділового апарату.

Таблиця 1

Мінералогічний склад пісків Вільногірського ГМК

№ з/п	Найменування мінералу	Вміст мінералу		
		Малишевське родовище, Східна ділянка	Техногенне родовище ВГМК	Відходи поточного виробництва ВГМК
1	Глинисті частинки та шлам	20	19,5	–
2	Кварц	71,6	78,8	98,2
3	Мінерали важкої фракції	8,4	1,7	1,8
	в тому числі:			
4	Циркон	0,7	0,02	0,01
5	Рутил	1,0	0,05	0,04
6	Лейкоксен	0,2	0,04	0,02
7	Ільменіт	3,7	0,43	0,35
8	Дистен-силліманіт	1,5	0,63	0,87
9	Ставроліт	0,9	0,33	0,33
10	Турмалін	0,4	0,2	0,18
11	Всього	100,0	100,0	100,0

Сепараційні характеристики збагачувальних апаратів, тобто залежність ймовірності вилучення фракцій від розділової ознаки (в нашому випадку - щільності), має властивість – бути в деякому діапазоні параметрів сепараційного процесу незалежно від складу матеріалу, що підлягає розділенню.

Якщо відома сепараційна характеристика устаткування технологічного ланцюгу апаратів, то можна синтезувати сепараційні характеристики збагачувальної схеми і розрахувати показники збагачення.

Одним із основних етапів збагачення є отримання колективного концентрату із митих пісків. На цьому етапі формуються також основні відходи, а саме кварцова сировина. Повнота вилучення мінералів важкої фракції з однієї сторони підвищує вихід колективного концентрату, а з іншої робить чистішими відходи виробництва. Основними операціями при отриманні колективного концентрату за існуючою технологією є:

- основна концентрація (операція II, виконується на конусних сепараторах СК 3,6/3-6);
- перелісна концентрація промпродукту (операція IV, СК 3,6/3-6);
- перелісна концентрація 1 важкої фракції та отримання колективного концентрату (операція VI, СК 3-5);
- контрольна концентрація легкої фракції (операція VIII, СК 3,6/3-6);

– перчисна концентрація 2 важкої фракції (операція X, СК 3-5).

У зв'язку з викладеним, необхідно визначити сепараційні характеристики конусних сепараторів за результатами їх роботи на поточному виробництві при збагаченні титаноцирконієвих пісків (подібного за властивостями матеріалу).

Для цього представимо процес розділення в конусних сепараторах, що складається з двох прийомів: виділення легкої фракції і розділення міксту (суміші, що утворилася) на важку фракцію і промпродукт (рис. 1).

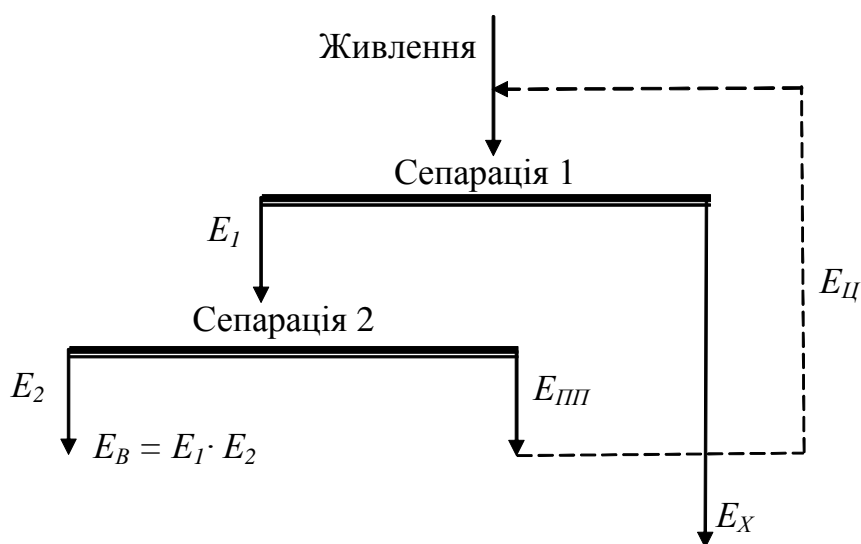


Рис. 1. Схема розділення на конусних сепараторах:

$E_B$  – вилучення мінералів у важку фракцію;

$E_{III}$  – вилучення мінералів у промпродуктову фракцію;

$E_X$  – вилучення мінералів у легку фракцію;

$E_1$  – вилучення мінералів у важку фракцію першого прийому сепарації;

$E_2$  – вилучення мінералів у важку фракцію другого прийому сепарації;

$E_{II}$  – вилучення мінералів у важку фракцію при рециркуляції промпродукту

За даними дослідження поточних схем, що використовуються для збагачення рудних пісків в конусних сепараторах за різними прийомами концентрації отримані результати, які представлені нижче в табл. 2 та на рис. 2, 3.

Часткові вилучення мінералів у важку ( $E_B$ ), промпродуктову ( $E_{III}$ ) та легку фракцію ( $E_X$ ) визначалися за результатами випробування схеми збагачення. Інші вилучення знаходилися із наступних співвідношень:

– вилучення мінералів у важку фракцію першого прийому сепарації ( $E_1$ ):

$$E_1 = 100 - E_X, \%;$$

– вилучення мінералів у важку фракцію другого прийому сепарації ( $E_2$ ):

$$E_2 = \frac{E_B}{E_1} \cdot 100, \%;$$

## Загальні питання технологій збагачення

– вилучення мінералів у важку фракцію при рециркуляції промпродукту ( $E_{Ц}$ ):

$$E_{Ц} = \left( \frac{E_1 \cdot E_2}{100 - \frac{E_1 \cdot (100 - E_2)}{100}} \right), \%$$

Таблиця 2

Ступінь вилучення мінералів за операціями							
Мінерал	Щільність, $\delta$ , г/см <sup>3</sup>	Вилучення мінералу, %					
		$E_B$	$E_{III}$	$E_X$	$E_I$	$E_2$	$E_{Ц}$
<b>операція II, основна концентрації (СК 3,6/3-6)</b>							
ц. (циркон)	4,70	87,69	11,87	0,44	99,56	88,08	99,50
р. (рутил)	4,30	57,67	39,06	3,27	96,73	59,62	94,63
і. (ільменіт)	4,70	61,83	34,61	3,56	96,44	64,11	94,55
д. (дистен)	3,60	27,48	60,76	11,77	88,23	31,14	70,02
с. (ставроліт)	3,69	60,26	34,07	5,68	94,32	63,88	91,39
л ф (кварц)	2,65	6,26	50,84	42,90	57,10	10,96	12,73
<b>операція IV, перечисна концентрація промпродуктів (СК 3,6/3-6)</b>							
ц. (циркон)	4,70	66,05	29,15	4,80	95,20	69,38	93,23
р. (рутил)	4,30	58,70	38,17	3,13	96,87	60,60	94,93
і. (ільменіт)	4,70	53,10	42,51	4,39	95,61	55,54	92,37
д. (дистен)	3,60	45,49	43,84	10,67	89,33	50,92	81,01
с. (ставроліт)	3,69	28,11	65,20	6,69	93,31	30,12	80,79
л ф (кварц)	2,65	7,05	50,19	42,76	57,24	12,31	14,15
<b>операція VI, перечисна концентрація 1 (СК 3-5)</b>							
ц. (циркон)	4,70	44,85	30,94	24,21	75,79	59,17	64,94
р. (рутил)	4,30	33,05	48,64	18,30	81,70	40,46	64,36
і. (ільменіт)	4,70	30,49	56,85	12,66	87,34	34,91	70,67
д. (дистен)	3,60	15,77	70,74	13,49	86,51	18,23	53,88
с. (ставроліт)	3,69	23,40	65,63	10,98	89,02	26,28	68,07
л ф (кварц)	2,65	2,07	41,53	56,39	43,61	4,76	3,55
<b>операція VIII, контрольна концентрація легкої фракції (СК 3,6/3-6)</b>							
ц. (циркон)	4,70	86,64	10,37	2,99	97,01	89,31	96,67
р. (рутил)	4,30	62,31	28,04	9,65	90,35	68,97	86,58
і. (ільменіт)	4,70	48,97	49,40	1,62	98,38	49,78	96,79
д. (дистен)	3,60	23,46	64,88	11,66	88,34	26,56	66,79
с. (ставроліт)	3,69	37,39	54,33	8,28	91,72	40,77	81,88
л ф (кварц)	2,65	9,81	62,93	27,26	72,74	13,49	26,46
<b>операція X, перечисна концентрація 2 (СК 3-5)</b>							
ц. (циркон)	4,70	83,98	15,11	0,91	99,09	84,75	98,93
р. (рутил)	4,30	55,25	39,19	5,55	94,45	58,50	90,87
і. (ільменіт)	4,70	35,79	56,41	7,80	92,20	38,82	82,10
д. (дистен)	3,60	7,85	76,52	15,63	84,37	9,30	33,43
с. (ставроліт)	3,69	16,02	71,41	12,57	87,43	18,32	56,02
л ф (кварц)	2,65	3,20	52,78	44,02	55,98	5,72	6,78

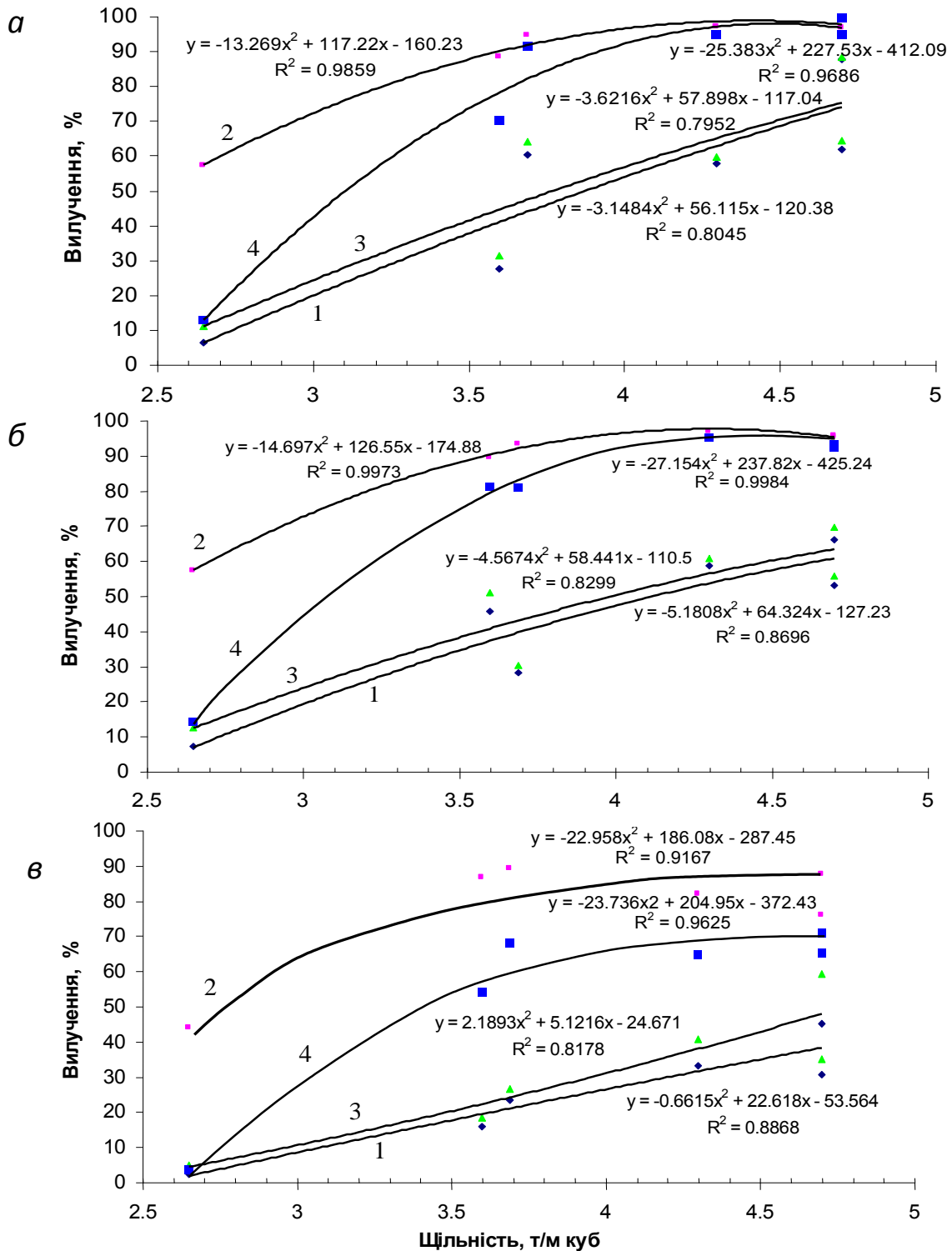


Рис. 2. Лінії тренда вилучення мінералів у важку фракцію за операціями:  
 а – операція II, основної концентрації (СК 3,6/3-6);  
 б – операція IV, перелісна концентрація промпродуктів (СК 3,6/3-6);  
 в – операція VI, перелісна концентрація 1 (СК 3-5).

- 1 – вилучення мінералів у важку фракцію ( $E_B$ );
- 2 – вилучення мінералів у важку фракцію першого прийому ( $E_1$ );
- 3 – вилучення мінералів у важку фракцію другого прийому ( $E_2$ );
- 4 – вилучення мінералів у важку фракцію при рециркуляції промпродукту ( $E_{Ц}$ )

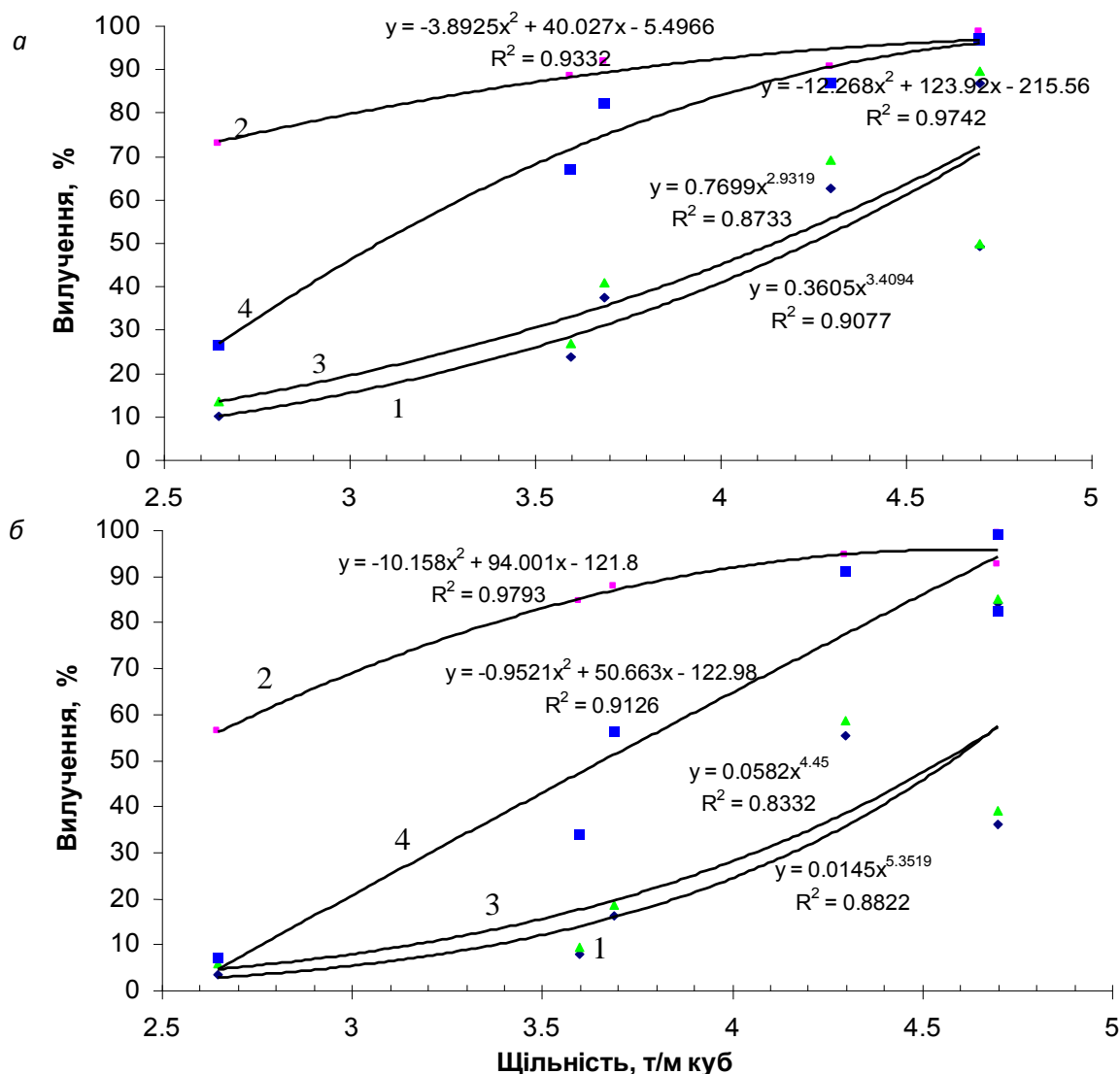


Рис. 3. Лінії тренда вилучення мінералів у важку фракцію за операціями:  
 а – операція VIII, контрольна концентрація легкої фракції (СК 3,6/3-6);  
 б – операція X, перечисна концентрація 2 (СК 3-5).

- 1 – вилучення мінералів у важку фракцію ( $E_B$ );
- 2 – вилучення мінералів у важку фракцію першого прийому ( $E_1$ );
- 3 – вилучення мінералів у важку фракцію другого прийому ( $E_2$ );
- 4 – вилучення мінералів у важку фракцію при рециркуляції промпродукту ( $E_{II}$ );

Аналіз представленої інформації показав тісний кореляційний зв'язок між сепараційними характеристиками представлених прийомів сепарації.

На рис. 4 наведені лінії тренда вилучення мінералів у легку фракцію за операціями.

При аналізі вказаних кривих видно, що відмінність спостерігається лише для операції VI, перечисна концентрація 1 (СК 3-5). Виключаючи дану операцію, визначено залежність середнього значення вилучення мінералів в легку фракцію (рис. 5).

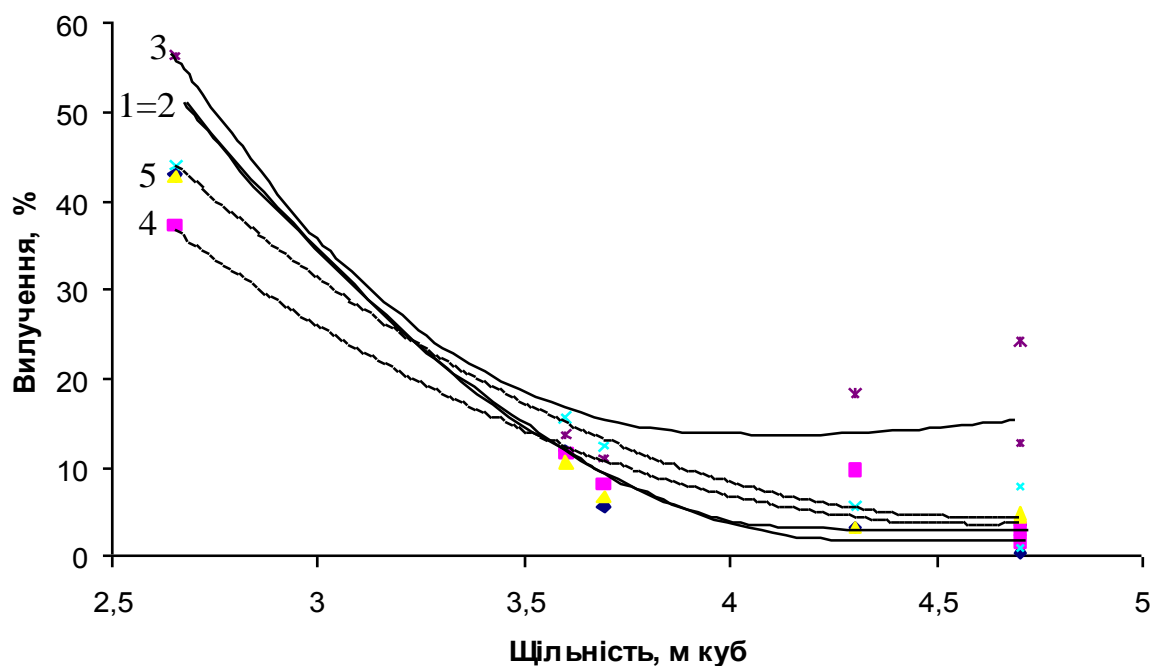


Рис. 5. Лінія тренду середнього вилучення мінералів у легку фракцію:  
 1 – операція II, основної концентрації (СК 3,6/3-6; лінія тренду описується рівнянням  $y = 13,269x^2 - 117,22x + 260,23$ ; коефіцієнт кореляції  $R^2 = 0,9859$ );  
 2 – операція IV, перелісна концентрація промпродуктів (СК 3,6/3-6;  $y = 14,697x^2 - 126,55x + 274,88$ ;  $R^2 = 0,9973$ );  
 3 – операція VI, перелісна концентрація 1 (СК 3-5;  $y = 22,958x^2 - 186,08x + 387,45$ ;  $R^2 = 0,9167$ );  
 4 – операція VIII, контрольна концентрація легкої фракції (СК 3,6/3-6;  $y = 8,5652x^2 - 79,063x + 185,99$ ;  $R^2 = 0,9533$ );  
 5 – операція X, перелісна концентрація 2 (СК 3-5;  $y = 10,158x^2 - 94,001x + 221,8$ ;  $R^2 = 0,9793$ )

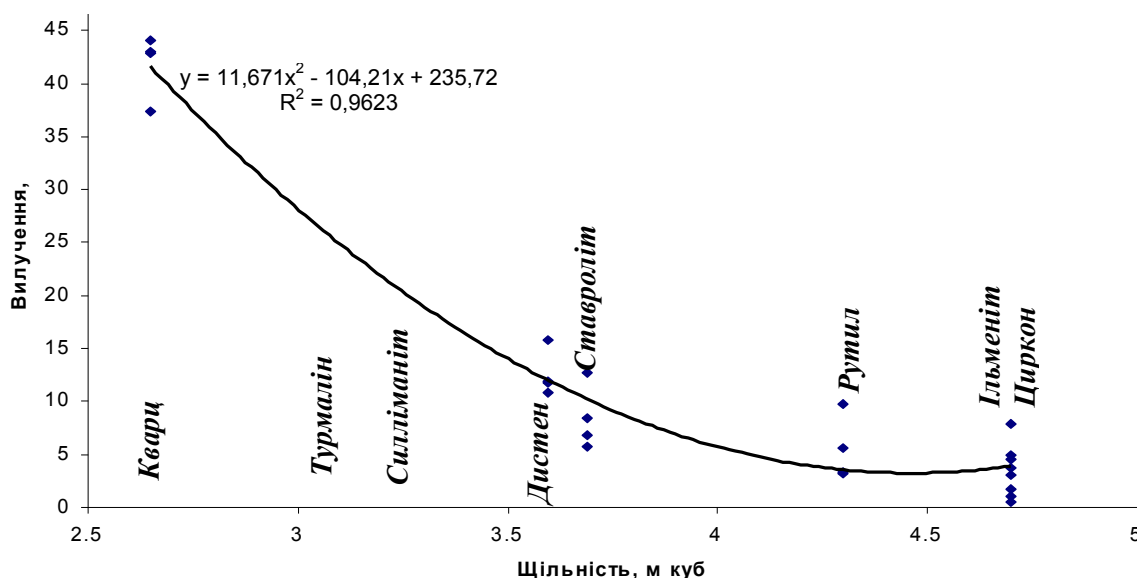


Рис. 6. Лінії тренда вилучення мінералів у легку фракцію за операціями за технологічною схемою переробки поточних пісків

## **Загальні питання технологій збагачення**

Обробка цієї інформації дозволила встановити рівняння лінії тренду у вигляді:  $E = 11,671 \delta^2 - 104,21\delta + 235,72$  при досить високому значенні коефіцієнта апроксимації  $R^2 = 0,9623$ .

У практиці збагачення корисних копалин, вважаючи, що помилки при сепарації підкоряються нормальному закону розподілу випадкової величини, широко використовується опис сепараційних характеристик за допомогою інтеграла ймовірності Гауса:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Значення параметра  $x$  являє собою відхилення середньої щільності фракції  $\delta$  від щільності розділення  $\delta_p$  в частках середньоквадратичного відхилення.

Для гравітаційних процесів сепарації:

$$x = 0,675 \frac{\delta_p - \bar{\delta}}{E_{pm}}$$

де  $E_{pm}$  – середнє ймовірне відхилення щільності розділення.

Значення інтеграла ймовірності Гауса може бути визначено за спеціальними таблицями.

З точністю до  $10^{-3}$  інтеграл Гауса можна обчислювати за формулами:

$$\text{– при } x > 0 \quad F(x) = \frac{1}{2} \exp\left(-2^{1/4} |x|^{4/3}\right);$$

$$\text{– при } x < 0 \quad F(x) = 1 - \frac{1}{2} \exp\left(-2^{1/4} x^{4/3}\right).$$

Використаний нормальний закон розподілу випадкової величини – двопараметричний. Параметри цього розподілу: математичне очікування (тут граничне значення розділової ознаки)  $\delta_p$  і середнє квадратичне відхилення або середнє ймовірне відхилення  $E_{pm}$ . Якщо ці параметри відомі, то і опис сепараційної характеристики буде цілком визначеним і з задовільною точністю вилучення фракцій розраховується за вище наведеними формулами.

Середнє ймовірне відхилення прийнято визначати наступним чином:

$$E_{pm} = \frac{\delta_{25} - \delta_{75}}{2},$$



а щільність розділення прийнято вважати такою, при якій значення сепараційної характеристики становить 50%.

При цьому  $\delta_{25}$ ,  $\delta_{50}$ ,  $\delta_{75}$  – відповідно, щільність, при якій значення сепараційної характеристики дорівнює 25, 50, і 75%.

Представляючи рівняння лінії тренда  $E = 11,671 \delta^2 - 104,21\delta + 235,72$  у вигляді  $E = a\delta^2 + b\delta + c$  та на підставі вище викладеного, отримуємо:

$$\delta_{25} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - 25)}}{2a};$$

$$\delta_{50} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - 50)}}{2a};$$

$$\delta_{75} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - 75)}}{2a}.$$

Для розглянутого випадку в результаті розрахунку маємо:

$$\delta_{25} = 3,095; \quad \delta_{50} = 2,46; \quad \delta_{75} = 1,98; \quad E_{pm} = 0,556 \text{ г/см}^3.$$

Таким чином, сепараційна характеристика розраховується і використовується для синтезу нових технологій. При необхідності зміни сепараційної характеристики, потрібно використовувати інше значення щільності розділення при певному із випробувань процесів сепарації середньої ймовірності відхилення  $E_{pm}$ .

Із застосуванням сепараційних характеристик розділових апаратів на основі мінералогічного складу була перерахована схема збагачення поточних відходів виробництва ВГМК за існуючою технологією. В результаті за схемою, що використовується, можливо отримати: 1,88% колективного концентрату з вмістом важкої фракції 66,3% при вилученні близько 70%, та 97,0% відходів з вмістом важкої фракції 0,55%. Важка фракція у відходах представлена зокрема: 67,0% дистен-силіманіту, 12,4% ставроліту, 14,4% турмаліну, 5,2% ільменіту та близько 1,0% рутилу.

На жаль, за вмістом важкої фракції, отриманий колективний концентрат має незадовільну якість. Для ефективного його розділення вміст важкої фракції повинен бути не менше 75%. Цей показник можливо досягти за рахунок використання додаткової перемішувальної операції із застосуванням гвинтових сепараторів. При використанні двох перемішувальних операцій вміст важкої фракції у колективному концентраті можливо підвищити до значення більше 80,0%.

Для зменшення вмісту важкої фракції у відходах також необхідно застосувати дві перемішувальні та одну контрольну операції. В цьому випадку вміст важкої

## **Загальні питання технологій збагачення**

фракції у кварцовому піску буде становити менше 0,05%, що дозволить його використовувати як високоякісну кварцову сировину. За рахунок зменшення мінералів важкої фракції в кварцовому піску, його вилучення в концентрат буде складати 90,0...95,0%.

Таким чином:

– розроблена методика, яка дозволяє виконувати розрахунки основних показників збагачення при зміні сировини на основі визначених сепараційних характеристик розділових апаратів;

– пропонується при відпрацюванні техногенного родовища ВГМК для отримання продуктів розділення задовільної якості, а саме колективного концентрату та кварцової сировини, доповнити технологічну схему наступними операціями: дві операції переочищення колективного концентрату та дві операції переочищення і одну контрольну операцію кварцового піску.

### **Список літератури**

1. Кармазин В. В., Младецкий И. К., Пилов П. И. Расчеты технологических показателей обогащения полезных ископаемых: учеб. пособие / Московский гос. горн. ун-т. – 2-е изд., стереотип. – М.: МГГУ, 2009. – 224 с.

2. Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин: Навчальний посібник – І.К. Младецкий, П.І. Пилов, К.А. Левченко, Я.Г. Куваєв – Дніпро: Журфонд, 2019. – 204 с.

3. Пилов П.И., Младецкий И.К., Левченко К.А., Горбачева А.П. Стабильность сепарационных характеристик разделительных аппаратов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2013. – Вип. 55(96). – С. 3-7.

4. Пилов П.И., Младецкий И.К., Левченко К.А., Горбачева А.П. Изучение влияния согласования характеристик сырья и сепаратора при создании разделительных блоков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 56(97). – С. 28-34.

5. Левченко К.А., Пилов П.И., Младецкий И.К. Методика аналитического расчета технологических показателей обогащения полезных ископаемых // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 57(98). – С. 66-74.

6. Младецкий И.К., Левченко К.А., Чвилева А.Н. Методика синтеза структуры технологий обогащения полезных ископаемых // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2015. – Вип. 60(101). – С. 11-26.

© Пілов П.І., Левченко К.А., Шутов В.Ю., Самофал І.В.,  
Чумак О.М., Корчагін Є.П., 2019

*Надійшла до редколегії 11.10.2019 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*