

УДК : 622.7, 622.778

№ держреєстрації 0124U004163

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з науково-дослідної
роботи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»



Володимир КУХАР
«26» червня 2026 року

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Підвищення ефективності розділових процесів шляхом
математичного моделювання з урахуванням властивості сировини»
(заклучний)

Етап 2. Дослідження ефективності процесів розділення, вибір
сепараційної характеристики технологічної схеми. Розробка методики
побудови блоку розділення із заданими параметрами

Науковий керівник, д.т.н., професор _____ Ігор МЛАДЕЦЬКИЙ
«31» травня 2026 року

2026

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
протокол № 9 від «25» червня 2026 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
д-р техн. наук, професор



Ігор МЛАДЕЦЬКИЙ
(вступ, розділ 1,2, висновки)

Відповідальний виконавець,
канд. техн. наук, доцент



Костянтин ЛЕВЧЕНКО
(розділ 1)

Виконавець,
канд техн. наук, доцент



Наталія КУШНІРУК
(розділ 2)

Виконавець,
канд техн. наук, доцент



Іван ЧЕБЕРЯЧКО
(розділ 2)

Виконавець,
викладач



Діна МИХАЙЛОВА
(розділ 2)

Виконавець,
студент ГСз-23-1П



Альона АГУДИНА
(розділ 2)

Виконавець,
студент ГСз-24-1П



Володимир СУЗДАЛЬ
(розділ 2)

Виконавець,
студент ГСз-24-1П



Наталія КРИЛОВА
(розділ 2)

Виконавець,
студент ГСз-24-1М



Олена СТРЕЛЬЦОВА
(розділ 2)

Виконавець,
студент ГСз-24-1М



Владислав ЖУРАВЛЬОВ
(розділ 2)

РЕФЕРАТ

ЗВІТ про НДР: 32 рис., 34 табл., 114 с., 15 джерел.

Ключові слова: сепараційні характеристики процесів розділення, змішування, дроблення, подрібнення, схеми з'єднання апаратів; визначення показників розкриття корисної копалини

Об'єкт дослідження – технологічні процеси переробки та збагачення корисних копалин

Мета роботи – підвищення ефективності процесів розділення твердих корисних копалин.

Предмет дослідження: сепараційні характеристики процесів розділення та переробки корисних копалин та їх вплив на кінцеві показники збагачення.

Результати та їх новизна: виконано аналіз та узагальнення теорії визначення сепараційних характеристик, як окремого апарату, так і схеми загалом, досліджено аналітичну модель розкриття рудного мінералу при дробленні та подрібненні.

Інформація щодо впровадження – результати роботи будуть використані при удосконаленні навчальних дисциплін: “Синтез технологій збагачення корисних копалин” та “Моделювання процесів збагачення корисних копалин”, які викладаються відповідно магістрам та бакалаврам.

Рекомендації щодо використання – результати роботи можуть використовуватися при корегуванні, удосконаленні та розробці схем збагачення мінеральної сировини.

Сфера застосування: підприємства гірничозбагачувальної галузі та навчальний процес в Університеті.

Економічна та соціально-економічна ефективність роботи: по завершенні розробки доцільно використання у гірничозбагачувальній галузі.

Значимість роботи: робота значима для гірничозбагачувальної галузі.

Висновки, пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження й доцільності продовження досліджень: об'єкт дослідження актуальний, доцільно продовжити дослідження.

Умови одержання ЗВІТУ: за договором (для заключного звіту).

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН	9
1.1. Математичні моделі для технологій.....	9
1.2. Характеристики подрібнення.....	15
1.3. Замкнутий цикл подрібнення.....	16
1.4. Збагачувальні ознаки корисних копалин.....	20
1.5. Аналіз, як спосіб пошуку технологічної схеми.....	22
2. АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	29
2.1. Розкриття рудного мінералу при дробленні.....	29
2.2. Розкриття рудного мінералу при подрібненні	30
2.3. Перетворення якісних показників у характеристику розмірів.....	32
2.4. Визначення середнього вмісту цінного компоненту у продуктах розділення за крупністю.....	36
2.5. Розкриття цінного мінералу у другій та наступних стадіях подрібнення.....	38
2.6. Показник розкриття рудного мінералу.....	50
2.7. Класифікація у спіральних класифікаторах.....	57
2.8. Ідентифікація сепараційної характеристики у відповідності з параметрами сировини.....	60
3. ПРИНЦИПИ ПОГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АПАРАТІВ.....	64
3.1. Погодження параметрів сировини та подрібнення.....	64
3.2. Узгодження характеристики підготовки та розділення при збагаченні сировини.....	67
3.3. Оцінка досконалості технології розділення.....	70

3.4. Синтез технології збагачення залізної руди.....	80
3.5. Визначення структури технології.....	84
3.5.1. Синтез технологій збагачення руд зі стадіальним виділенням відкритих фракцій.....	84
3.5.2. Формування розділового технологічного блоку.....	93
3.5.3. Синтез технологій збагачення руд без виділенням промпродукту.....	100
3.6. Формування сепараційних характеристик.....	104
ВИСНОВКИ.....	109
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	113

ВСТУП

У сфері збагачення корисних копалин і переробки матеріалів технології створюються за певною послідовністю: дослідження властивостей вихідної сировини, відокремлення цінної складової від пустої породи, їх подальше розділення та приведення продуктів до товарного вигляду. Ці етапи частково стандартизовані та мають математичне відображення, що стимулює прагнення до формалізації всього процесу добору переробної технології.

З цією метою було розроблено багато критеріїв вибору апаратів та їх режимів з урахуванням типу мінеральної сировини й способу її підготовки до розділення. Створено моделі різної природи, які дозволяють надійно описати ступінь розкриття мінералів. Також сформовано підхід до моделювання процесу подрібнення. Це стало основою для побудови повних алгоритмів технологічного розрахунку збагачувальних вузлів, які були запропоновані науковій спільноті.

Проектування технології переробки передбачає пошук оптимальної структури технологічної схеми, способів поєднання апаратів та підбір технологічних режимів, які забезпечать досягнення поставлених цілей. Але довгий час розв'язання цих завдань здійснювалося одразу на детальному рівні – шляхом вибору параметрів процесів методом прямого перебору, що призводило до величезної кількості можливих варіантів. Навіть застосування комп'ютерного моделювання лише частково вирішувало цю проблему, адже завдання залишалося неформалізованим.

Одним із ключових аспектів переробки є подрібнення до необхідної крупності, що є передумовою ефективного подальшого перетворення. Надмірне подрібнення недоцільне через високу енерговитратність. При цьому важливо враховувати, що під час подрібнення відбувається часткове розкриття цінного компонента, який

має бути вилучений. Звідси виникає необхідність одночасного застосування процесів подрібнення і розділення – тобто, поєднання подрібнення з сепарацією. Цей підхід був узагальнений Чечетом у вигляді принципу «не подрібнювати зайвого», що є одним із базових у синтезі схем: спочатку – підготовка, потім – розділення. У формулюванні Чечета – «виділення і розділення».

Процес переробки матеріалів полягає в поетапному наближенні показників якості до встановлених нормативів, $\beta_K \rightarrow \beta_{K_зад}$. Оскільки технологічна схема передбачає послідовне з'єднання окремих блоків, кожен із них має на виході певний рівень якості продукту, який повинен поступово наближатися до заданого значення якості концентрату $\beta_{Ki} < \beta_{K(i+1)} < \dots < \beta_{Kn} \geq \beta_{K_зад}$.

Із практики відомо, що бажаного результату за один цикл переробки досягти неможливо, тому застосовують послідовні операції одного типу, які наближають продукт до необхідних показників – це і є основа β_{Ki} або β_{KiT} .

Оцінка ефективності переробки має здійснюватися за певним критерієм досягнення цільового рівня якості. Наразі такого універсального критерію не існує, тому на підприємствах використовують орієнтовні значення, які оцінюють за результатами роботи суб'єктивно. Визначення чіткого критерію ефективності є важливим завданням при синтезі технологічних схем.

Технологічна схема є визначенням поєднанням апаратів, де кожен характеризується специфічними параметрами перетворення початкових властивостей матеріалу. Якість перетворення залежить від узгодженості характеристик сировини з параметрами апарата. Відповідно, узгодження параметрів підготовки та характеристик обладнання є важливою умовою ефективної роботи.

1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН

1.1. Математичні моделі для технологій

Під час пошуку оптимальних технологічних рішень характеристики апаратів або окремих технологічних блоків мають встановлювати зв'язок між вхідними та вихідними параметрами за допомогою певного оператора [2], наприклад:

$$y = f(x) \quad \text{або} \quad \bar{Y} = A(\bar{X}),$$

$$A = \frac{Y}{X}, \quad \text{тобто} \quad Y = A \cdot X.$$

Таким чином, оператор A визначає, які перетворення необхідно застосувати до початкових параметрів, щоб отримати відповідні вихідні значення (тобто алгоритм обчислення). Бажано, щоб такий оператор мав просту форму, що полегшує аналіз і відстеження змін технологічного показника в процесі його перетворення. Задля наочності подання матеріалу та чіткості аналізу у дослідженні застосовуватимуться системні характеристики процесів розділення, а самі розрахунки виконуватимуться за допомогою чисельного моделювання.

До таких характеристик належать:

– для апаратів розділення – сепараційні характеристики, які описують ймовірність переходу частинок певного розміру або класу до збагаченого продукту (у разі двопродуктового розділення). Якщо ж передбачено багатодуктове розділення, кожен потік виходу має свою сепараційну характеристику. Основним показником оцінки ефективності сепарації є вилучення. Баланс вузьких фракцій при

багатопродуктовому розділенні характерний тим, що сума значень усіх сепараційних характеристик, при заданому значенні аргументу, для них дорівнює одиниці;

– для подрібнювального обладнання використовуються подрібнювальні характеристики, які показують співвідношення вмісту однакових вузьких фракцій за крупністю на вході й виході з подрібнювального апарату, агрегату або технологічного блоку.

Сепараційна характеристика (СХ) для всієї схеми розділення формується на основі сепараційних характеристик окремих стадій, їх кількості та послідовного поєднання. Головна особливість СХ полягає в наявності закономірності, притаманної будь-якому розділовому апарату: чим більша концентрація цінного мінералу в частинці, тим вища ймовірність її потрапляння до збагаченого продукту. Це співвідношення описується монотонною функцією. Уявімо, що до змішування, кількість частинок із заданою ознакою розділення X у вихідному потоці становила $P_i - 1$, а після змішування P_i тобто сумарну кількість частинок до змішування та тих, що потрапили в цю операцію з циркуляційним навантаженням:

$$P_i = P_{i-1} + \sum_{j=1}^m P_j,$$

де j – порядковий номер циркуляційного навантаження.

Циркуляція після послідовного з'єднання апаратів, дорівнює:

$$P_j = P_i \prod_{i=i+1}^{n_1} E_i,$$

де E_i – вилучення вузької фракції.

Тоді:

$$P_i = P_{i-1} + P_i \sum_{j=1}^m \prod_{i=i+1}^{n_1} E_i.$$

Звідки:

$$P_{i-1} = P_i \cdot (1 - \sum_{j=1}^m \prod_{i=i+1}^{n_1} E_i) ,$$

Отже, СХ операції змішування дорівнює:

$$P_{3Mi} = \frac{P_i}{P_{i-1}} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^m \prod_{i=i+1}^{n_1} E_i} . \quad (1.1)$$

Технологічна схема збагачення корисних копалин має певну послідовність операцій змішування та розділення. Тому одним із головних етапів розрахунків є визначення ступеня вилучення вузьких фракцій у продукти, що утворюються на кожному етапі переробки за всіма операціями схеми. Розглянемо, як на практиці застосовуються отримані розрахункові співвідношення, проілюструвавши це на прикладі окремого фрагмента схеми розділення. (рис. 1.1).

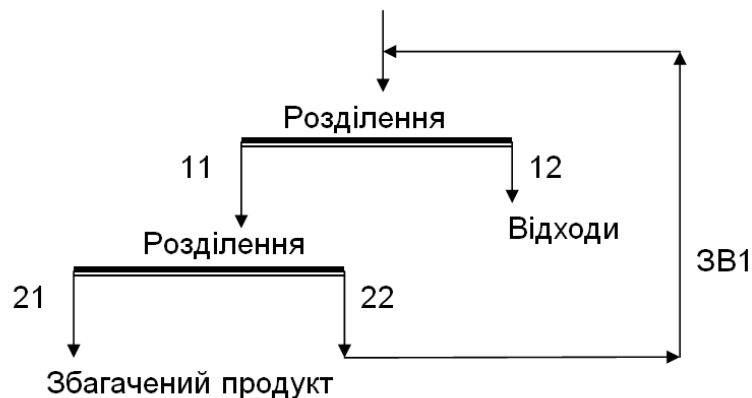


Рисунок 1.1. – Схема технологічного блоку розділення

Вихідних точок умовно позначаються наступним чином: перша значення це – номер апарату, а друге – номер продукту. Рецикл (зворотний зв'язок, циркуляція) це – 3В1.

Відповідно до законів послідовного з'єднання [3] сепараційна характеристика наведеної схеми визначається, як:

$$P_{\beta} = P_1 \cdot P_{3B1} \cdot P_2 ,$$

де P_{β} , P_1 , P_2 , P_{3B1} – сепараційна характеристика відповідно схеми розділення, операцій та зворотного зв'язку.

Для рециклу СХ (оператор) P_{3B1} дорівнює:

$$P_{3B1} = \frac{1}{1 - P_1 \cdot P_2^1}.$$

де P_2^1 – ймовірність вилучення частинок у другій операції у збіднений продукт (відходи), визначається як: $P_2^1 = 1 - P_2$, ($P_1^1 = 1 - P_1$).

Виконуємо певні перетворення та отримуємо СХ технологічного блоку розділення:

$$P_{\beta} = P_1 \cdot P_{3B1} \cdot P_2 = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 \cdot P_2^1} = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 \cdot (1 - P_2)} = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 + P_1 \cdot P_2}.$$

Загальний вигляд СХ при розділенні за масовою часткою цінного компонента має вигляд неспадної кривої (рис. 1.2).

Користуватися сепараційними характеристиками будемо у графічному вигляді, оскільки аналітичний опис є досить складним і не дозволяє наочно оцінити її поведінку. Ці характеристикb отримуються за допомогою експериментальним даних. Для цього необхідно провести опробування процесу розділення в трьох технологічних точках: продукт живлення, збагачений продукт та продукт, що направляється у відходи.

Отримані проби готують та направляють на хімічний аналіз задля визначення середнього значення масової частки цінного компонента.

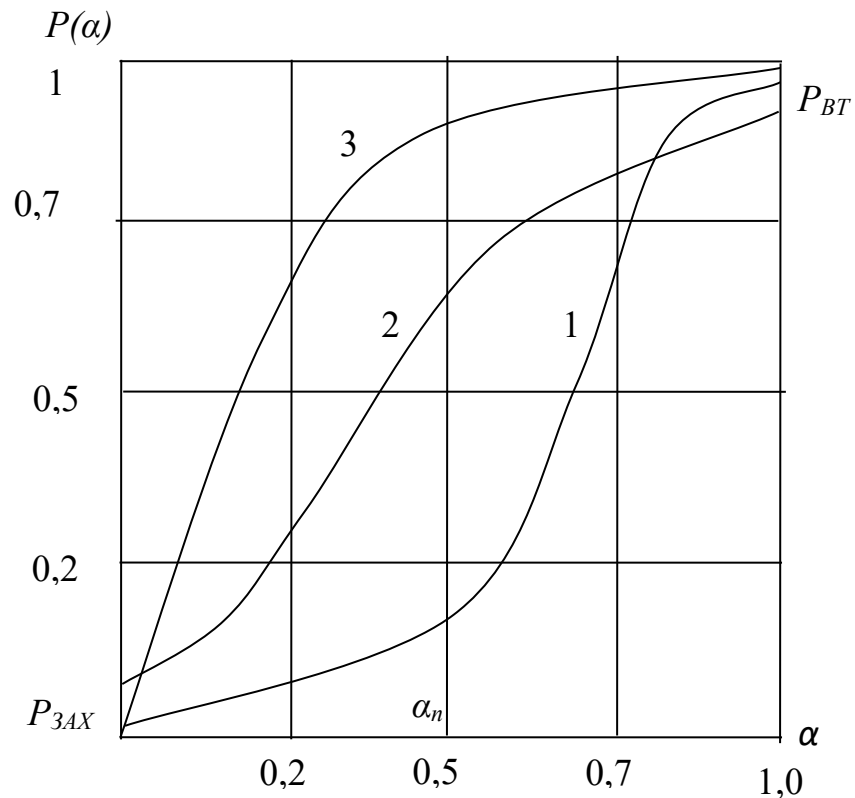


Рисунок 1.2. – Сепараційні характеристики для розділення за вмістом цінного мінералу:

1 – для виділення багаті фракції;

2 – типова сепараційна характеристика;

3 – для виділення бідної фракції;

$P_{ЗАХ}$ – імовірність захоплення нерудної фракції в збагачений продукт;

$P_{ВТ}$ – імовірність втрат рудної фракції в збіднений продукт.

Визначають вихід збагаченого продукту за виразом:

$$\gamma = \frac{\alpha - \nu}{\beta - \nu},$$

де α , β , ν – масова частка цінного компоненту у вхідному продукті (живлення) і продуктах розділення (збагаченому та збідненому).

Наступний етап це фракційне розділення вхідного продукту й продукту збагачення за фракціями $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. Зважують проби, що були відібрані, та кожену фракцію. Отримують відповідні виходи фракцій: $\gamma_{\alpha 1}, \gamma_{\alpha 2}, \dots, \gamma_{\alpha n}$, та $\gamma_{\beta 1}, \gamma_{\beta 2}, \dots, \gamma_{\beta n}$. Обчислюють значення ймовірності вилучення для кожної вузької фракції за виразом:

$$P_i = \gamma \cdot \frac{\gamma_{\beta i}}{\gamma_{\alpha i}}.$$

Множина цих значень і є сепараційна характеристика [3]. Отримані результати подають у вигляді графіка $P_i = f(\alpha_i)$.

Для ідентифікації процесу класифікації також користуються сепараційною характеристикою, яку отримують аналогічно.

Відбирають проби на вході апарату, у зливі та пісках. Проби піддають ситовому аналізу за деяким заданим класом крупності d_3 . Далі фіксують продукти, що менші заданого класу крупності ($-d_3$), і отримують $p_B(-d_3)$, $p_3(-d_3)$, $p_{\Pi}(-d_3)$ (Аналогія з сепарацією: піски – збіднений продукт, злив – збагачений продукт). Визначають вихід зливу за формулою:

$$\gamma_3 = \frac{p_B(-d_3) - p_{\Pi}(-d_3)}{p_3(-d_3) - p_{\Pi}(-d_3)}.$$

Проби початкового продукту та зливу піддають ситовому аналізу за класами крупності $d_1, d_2, \dots, d_n$. Зважують надрешітні продукти. Отримують: $p_{31}, p_{32}, \dots, p_{3n}$ та $p_{\Pi 1}, p_{\Pi 2}, \dots, p_{\Pi n}$.

Обчислюють значення сепараційної характеристики:

$$P_i = \gamma \cdot \frac{p_{3i}}{p_{\Pi i}}.$$

Подають результати у вигляді графіка $P_i = f(d_i)$

1.2. Характеристики подрібнення

Прогнозування вихідних показників подрібнення пов'язане з визначенням функції розподілу частинок за крупністю. Це досить складне завдання, і зазвичай обмежуються прогнозуванням одного показника – середньої крупності подрібнення. Потім необхідно прийняти деякий закон розподілу і таким чином спиратися на отримані значення вмісту вузьких класів крупності.

Відомо, що млини, що працюють у певних стадіях підготовки сировини до розділення, характеризуються відносно стабільними значеннями відношення вмісту класів крупності на вході та виході млинів. Це так звані характеристики подрібнення виду:

$$A(d_i) = \frac{\Delta F_{\text{вих}}(d_i)}{\Delta F_{\text{вх}}(d_i)}.$$

На базі цього виразу можливе прогнозування вихідної функції розподілу частинок за крупністю:

$$\Delta F_{\text{вих}}(d_i) = A(d_i) \cdot \Delta F_{\text{вх}}(d_i).$$

Функції входу і виходу подрібнення співвідносяться між собою відповідно до рис. 1.3.

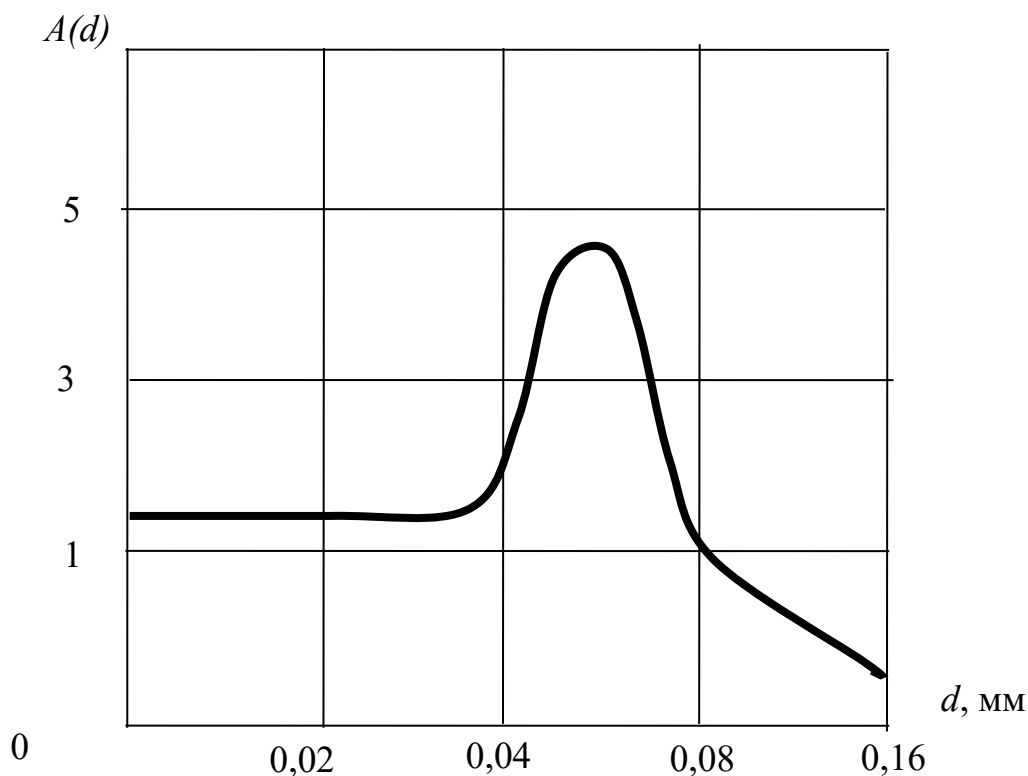


Рисунок 1.3. – Характеристика подрібнення

Вона відображає напрямок, у якому змінюється вміст відповідного класу крупності: якщо $A(d) < 1$, то зменшується, якщо $A(d) > 1$, то збільшується. Коли $A(d) = 1$, цей клас перебуває у динамічній рівновазі, тобто: яка частина даного класу пішла з нього, така ж і прийшла [5].

1.3. Замкнутий цикл подрібнення

Для збільшення коефіцієнта статичного перетворення крупності матеріалу подрібненням застосовують рецикли, в яких подрібнений матеріал розділяється за крупністю, а потім крупні частинки (піски) спрямовуються на додрібнення назад в цей самий млин, а дрібний клас вважається досить підготовленим для подальшого розділення за якоюсь іншою фізичною властивістю. Як апарат для розділення за крупністю застосовують поверхні для просіювання (грохоти) і

гідравлічну класифікацію. Розглянемо такого типу з'єднання. Розрахувати таке сполучення – отже визначити функцію гранулометричного складу зливу класифікатора, тобто на його виході.

Поява пісового навантаження діє на функцію $F(d)$ двояко. З одного боку, крупність пісків нижче, ніж початкової (вхідної) руди, і тому у вхідному потоці (живлення) крупність знижується, що впливає на зменшення крупності у злив.

Припустимо, що на вході та виході млина відома функція розподілу частинок за крупністю.

Класифікація має розділову характеристику P_K і перетворює вихідну функцію розподілу за крупністю відповідно до залежностей:

– перехід частинок вузької фракції в злив

$$p_3 = P_K \cdot p_1;$$

– перехід частинок фракції в піски, відповідно

$$p_{\pi} = (1 - P_K) \cdot p_1,$$

де p_1 – вміст фракції крупності на вході класифікатора (злив млина).

Розглянемо замкнутий цикл подрібнення (ЗЦП) (рис. 1.4).

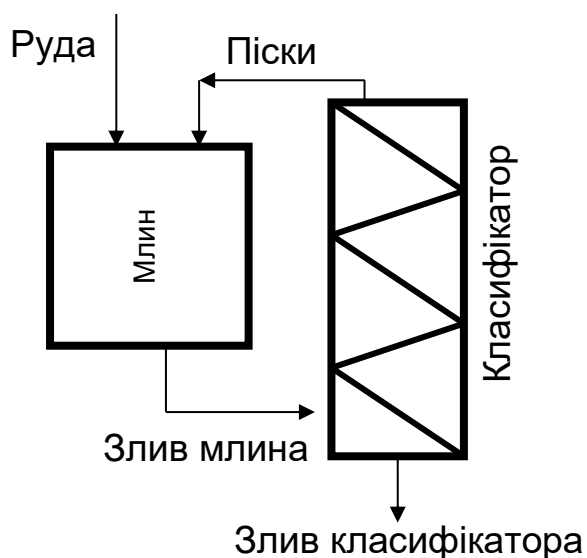


Рисунок 1.4. – Схема замкнутого циклу подрібнення з класифікатором

Запишемо для цього циклу рівняння балансу вузьких фракцій крупності:

$$p_3 = P_K \cdot p_1; \quad p_1 = A \cdot (p_0 + p_\Pi); \quad p_1 = p_3 + p_\Pi.$$

Необхідно ідентифікувати три продукти, тому маємо три рівняння. Розв'язання єдине. Шляхом підстановки знайдемо залежність $p_3 = f(p_0)$, де f включає дії з операторами елементів системи A і P_K . Спочатку отримуємо рівняння:

$$p_3 = P_K \cdot A \cdot \left(p_0 + p_3 \cdot \frac{1-P_K}{P_K} \right),$$

з якого знаходимо залежність p_3 :

$$p_3 = \frac{P_K \cdot A}{1 - A \cdot (1 - P_K)} \cdot p_0.$$

Тоді оператор замкнутого циклу подрібнення знаходиться, як:

$$P_{зцп} = \frac{p_3}{p_0} = \frac{P_K \cdot A}{1 \pm A \cdot (1 - P_K)}. \quad (1.2)$$

Величина $P_{зцп}$ може бути від'ємною, оскільки в знаменнику стоїть різницю і від'ємне може виявитися більше зменшуваного. Це говорить про те, що за цим класом крупності зворотний зв'язок від'ємний і кількість цього класу зменшується в системі. Якщо ж оператор більше одиниці, то за даним класом крупності зворотний зв'язок додатній і кількість такого класу збільшується. Коли знаменник стає від'ємним, слід змінити знак після одиниці в знаменнику на плюс. Коли характеристика $A(d) = 1$, це означає, що клас крупності, що відповідає

такому значенню функції знаходиться в динамічній рівновазі: скільки продукту пішло з цього класу, стільки ж і прийшло. Зміна параметрів циклу подрібнення призводить до зміни значення цієї крупності [6].

Після цього визначаємо оператор подрібнення, як відношення вмісту вузьких класів однойменних класів крупності на виході і вході подрібнення:

$$A(d_j) = \frac{\Delta F(d_j)}{\Delta F_{BX}(d_j)}.$$

Виконаємо розрахунок замкнутого циклу подрібнення (ЗЦП) за запропонованою методикою.

Припустимо, що на вхід млина надходить руда з відомою функцією розподілу частинок $\Delta F_{BX}(d_j)$ і з функцією розподілу частинок на виході млина $\Delta F(d_j)$ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. – Первісні дані для визначення оператора ЗЦП

$d \text{ мм}$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12	10,24
$\Delta F_{BX}(d_j)$	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,12	0,25	0,37	0,12
$\Delta F(d_j)$	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,25	0,2	0,02	0

Виконаємо далі всі необхідні розрахунки щодо визначення оператора замкнутого циклу подрібнення та його вихідної характеристики $\Delta F_{3K}(d_j)$. Усі розрахунки зведемо у табл. 1.2.

Загальний вихід продукту у злив (сума останнього рядка) $\gamma_{3K} = 0,3788$. Кількість пісового навантаження $\gamma_{\pi} = 1/\gamma_{3K} = 2,64$. А гранулометричний склад пісків неважко обчислити, якщо нормувати останній рядок табл. 1.2.

Таблиця 1.2. – Розрахунки для отримання оператора ЗЦП

$d \text{ мм}$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	2,56	5,12	10,24
$\Delta F_{BX}(d_j)$	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,12	0,25	0,37	0,12
$\Delta F(d_j)$	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,25	0,2	0,02	
A_j	2	1,5	2	3	4	5	6,7	2,08	0,8	0,05	
P	0,96	0,95	0,92	0,87	0,85	0,6	0,3	0,01	0	0	0
$1-P$	0,04	0,05	0,08	0,13	0,15	0,4	0,7	0,99	1	1	0
$A \cdot (1-P)$	0,08	0,075	0,16	0,39	0,6	2	4,7	2,06	0,8	0,05	0
AP	1,92	1,42	1,84	2,61	3,4	3	2,01	0,02	0	0	0
$1-A \cdot (1-P)$	0,92	0,925	0,84	0,61	0,4	-1	-3,7	-1,06	0,2	0,95	1
$1-A \cdot (1-P)_{\text{испр}}$	0,92	0,925	0,84	0,61	0,4	4	5,7	3,06	0,2	0,95	1
P_3	2,13	1,53	2,19	3,5	8,5	0,75	0,35	0,0065	0	0	0
$\Delta F_{3K}(d_j)$	0,0212	0,0306	0,044	0,07	0,17	0,015	0,007	0,0008	0	0	0

Таким чином, методика розрахунку вихідних показників замкнутого циклу подрібнення буде наступною:

- ідентифікуємо технологічну характеристику подрібнення;
- на базі сепараційної характеристики класифікатора визначаємо оператор замкнутого циклу подрібнення;
- обчислюємо функцію гранулометричного складу на виході замкнутого циклу.

Фракція, що відповідає $A = 1$ є частинки, з яких інтенсивно утворюються дрібні класи, і на місце яких приходять новоутворені частинки з великих класів. Це протиріччя можна вирішити за умови: якщо крива характеристики подрібнення досягає першого екстремуму, то знак у знаменнику після одиниці слід замінити на плюс.

1.4. Збагачувальні ознаки корисних копалин

Технологи характеризують корисні копалини, що направляються на збагачення, деякими фізичними параметрами, які впливають на показники технологічних процесів. Це насамперед вміст цінного мінералу (α_n). Чим більше цей параметр, тим показники технологічної переробки вищі. Оскільки потрібно спочатку відділити цінний мінерал

від породи (нецінного), то необхідно знати параметри розташування цінного мінералу в руді. Зазвичай це прошарки, у яких зосереджуються вкраплення мінералу. Рудні різновиди відрізняються один від одного потужностями рудних прошарків l_P , які ще поділяються на малорудні l_{MP} та нерудні l_H . Кожен із цих прошарків характеризується вмістом у них цінного мінералу, відповідно: α_P , α_{MP} , α_H [1]. При цьому баланс вмісту регламентується співвідношенням:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_P \cdot l_P + \alpha_{MP} \cdot l_{MP} + \alpha_H \cdot l_H}{l_P + l_{MP} + l_H}.$$

Вкраплення цінного мінералу характеризується функцією розподілу розмірів цих вкраплень $f(d_{BK})$. Зазвичай ця функція однопараметрична і тому її можна ідентифікувати одним числом – середнім значенням крупності вкраплення (d_{BK}).

Руди, в залежності від співвідношення у них цінного мінералу і породи, а також умов утворення родовища характеризуються міцністю, твердістю, крихкістю. Збагачувачі об'єднують ці фізичні показники одним, який називають подрібнюваністю. Визначають цей показник шляхом випробування у лабораторних млинах, а потім виконують ситовий аналіз подрібненого матеріалу і за його результатами будують функцію розподілу частинок за крупністю. Зазвичай це експонентна функція, та її апроксимують виразом:

$$F(d) = \exp(-K \cdot d).$$

Коефіцієнт K – показник експоненти, який служить оцінкою подрібнюваності.

Якщо експонента спадає повільно, то руда важко подрібнюється, коефіцієнт при цьому K має мале значення (рис. 1.5).

Якщо експонента спадає досить швидко, то руда добре подрібнюється, коефіцієнт K при цьому має велике значення (рис 1.5).

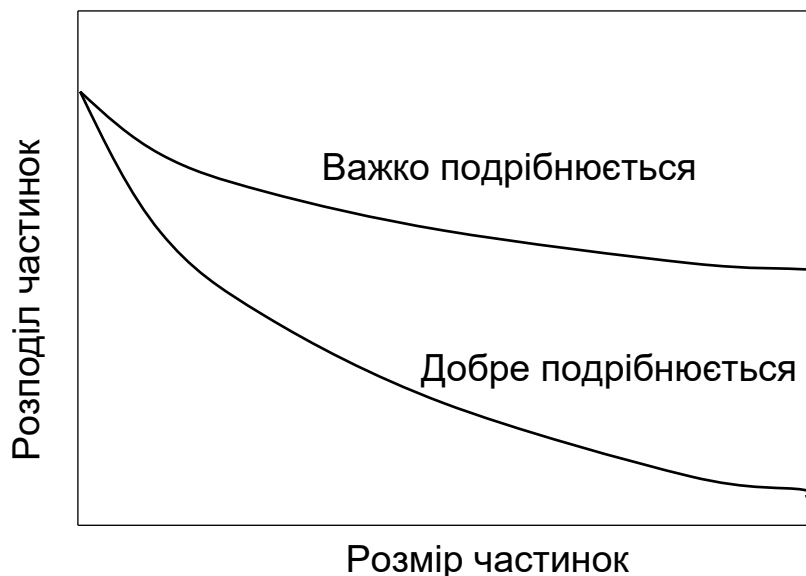


Рисунок 1.5. – Характеристики подрібнюваності корисної копалини

1.5. Аналіз, як спосіб пошуку технологічної схеми

Будь-який процес пошуку проводиться методом «проб і помилок». Це єдиний спосіб, який винайшло людство, коли починається шлях у невідоме. Тобто висувається гіпотеза, виконуються дії відповідно до неї та отримують результат. Якщо отриманий результат задовольняє висунутим вимогам, то ця гіпотеза приймається. Якщо ж результат незадовільний, то виконується коригування умов – висувається нова гіпотеза і процес випробовування триває. Народне формулювання такого шляху каже: якщо не знаєш з чого починати, починай, справа покаже. Більш пізня мудрість така: «Не навчишся поки по кишені не вдарить».

Перевірка працездатності гіпотези здійснюється шляхом аналізу. Аналіз це інструмент, коли відомі входні показники процесу $\bar{X}$, відомий

алгоритм перетворення їх у вихідні показники $A(\bar{X})$; обчислюються вихідні показники $\bar{Y} = A(\bar{X})$ та отримані результати порівнюють з прийнятими критеріями вибору.

Наприклад. Виконати аналіз найпростішого процесу розділення (рис. 1.6).

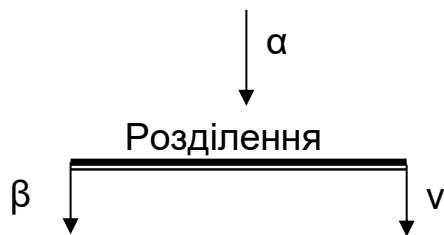


Рисунок 1.6. – Схема найпростішого розділового процесу

Відомі показники сировини: функція розподілу частинок за фракційним складом – $F(\alpha)$. Розділення відбувається за якісною ознакою α – вміст цінного компонента. Розділовий апарат повністю характеризується сепараційною характеристикою $P(\alpha)$. Вона відображає всі властивості апарату з перетворення початкової (вхідної) величини $F(\alpha)$ у вихідні – вміст цінного компонента у збагаченому (β) і збідненому (ν) продукті.

Оператор такого перетворення складається з наступних математичних співвідношень [2]:

– перехід вузької фракції з вмістом цінного компонента (α_i) у збагачений продукт:

$$\Delta\gamma_{\beta}(\alpha_i) = P(\alpha_i) \cdot \Delta F(\alpha_i);$$

– вихід збагаченого продукту:

$$\gamma_{\beta} = \sum_{i=1}^k \Delta\gamma_{\beta}(\alpha_i);$$

– кількість вузької фракції з вмістом цінного компонента (α_i) у збагаченому продукті:

$$\Delta F_{\beta}(\alpha_i) = \frac{\Delta \gamma_{\beta}(\alpha_i)}{\gamma_{\beta}};$$

– вміст цінного компоненту у збагаченому продукті:

$$\beta = \frac{1}{\gamma_{\beta}} \cdot \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \Delta \gamma_{\beta}(\alpha_i).$$

Для іншого збідненого продукту оператори аналогічні:

$$\Delta \gamma_v(\alpha_i) = (1 - P(\alpha_i)) \cdot \Delta F(\alpha_i);$$

$$\gamma_v = \sum_{i=1}^k \Delta \gamma_v(\alpha_i);$$

$$\Delta F_v(\alpha_i) = \frac{\Delta \gamma_v(\alpha_i)}{\gamma_v};$$

$$v = \frac{1}{\gamma_v} \cdot \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \Delta \gamma_v(\alpha_i).$$

Наприклад. Необхідно виконати аналіз фрагменту технології збагачення магнетитової залізної руди (рис. 1.7).

Проаналізувати технологічну схему – це визначити значення вихідних показників на базі відомих вхідних показників і відомого алгоритму такого перетворення, який є відображенням технологічних зв'язків та математичних моделей технологічних апаратів.

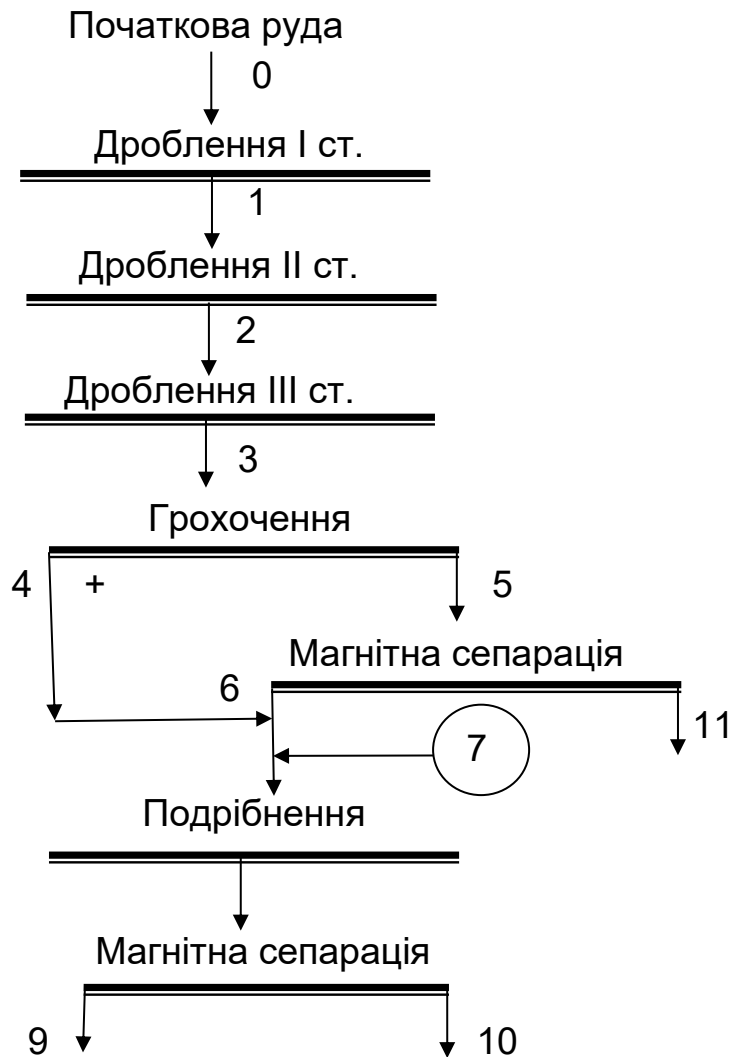


Рисунок 1.7. – Схема фрагменту технології збагачення магнетитової залізної руди

Вхід цієї схеми – потік руди з кар'єру. Достатнім описом такого потоку служить функція розподілу частинок за крупністю $F_0(d)$ та показник руди σ , що залежить від твердості.

Дроблення перетворює функцію розподілу частинок за крупністю на таку саму на виході (точка 1) $F_1(d)$. Для розрахунку такої операції необхідний оператор подрібнення $A_1(d)$. В результаті стане можливою наступна процедура розрахунку:

$$F_1(d) = A_1(d) \cdot F_0(d).$$

Аналогічні перетворення відбуваються і у наступних стадіях дроблення:

$$F_2(d) = A_2(d) \cdot F_1(d);$$

$$F_3(d) = A_3(d) \cdot F_2(d).$$

Для аналізу грохочення потрібна сепараційна характеристика $P_1(d)$ грохоту, і тоді вихідні показники грохочення можуть бути розраховані:

$$F_4(d) = (1 - P_1(d)) \cdot F_3(d);$$

$$F_5(d) = P_1(d) \cdot F_3(d).$$

П'ятий потік спрямований на сепарацію за вмістом цінного компоненту, тому необхідно виконати перетворення для отримання функції розподілу за вмістом цінного компоненту $F_5(d) \rightarrow F_1(\alpha)$, тобто потрібно визначити розкриття. Допустимо, що воно розраховується за наступним виразом:

$$F_1(\alpha) = R(F_5(d)).$$

За допомогою сепараційної характеристики $P_1(\alpha)$ знаходимо:

$$F_9(\alpha) = P_1(\alpha) \cdot F_1(\alpha);$$

$$F_6(\alpha) = (1 - P_1(\alpha)) \cdot F_1(\alpha).$$

Розраховуються також показники розділення β (т.6) та ν (т.11).

Потік 6 прямує на наступне подрібнення, тому необхідно визначати функцію розподілу за крупністю. Потік 7 змішується з двох потоків і для його аналізу необхідні дві функції $F_4(d)$, $F_6(d)$. Щоб отримати їх, потрібно виконати перетворення $F_6(\alpha) \rightarrow F_6(d)$. Припустимо, що це відбувається так:

$$F_6(d) = R^{-1}(F_6(\alpha)).$$

Сьомий потік має характеристику:

$$F_7(d) = F_6(d) + F_4(d).$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_0 \cdot F_4(d) + \beta \cdot F_6(d)}{F_4(d) + F_6(d)}.$$

Наступні перетворення виконуються так:

$$F_8(d) = A_4(d) \cdot F_7(d);$$

$$F_8(\alpha) = R_1(F_8(d), \alpha_2);$$

$$F_9(\alpha) = P_2(\alpha) \cdot F_8(\alpha);$$

$$F_{10}(\alpha) = (1 - P_2(\alpha)) \cdot F_8(\alpha).$$

Остаточні вихідні показники визначаються за виразами:

– вміст цінного компонента (якість) у збагаченому продукті:

$$\beta = \int_0^1 \alpha \cdot \frac{dF_9(\alpha)}{d\alpha} d\alpha;$$

– втрати (вміст цінного компоненту) в збідненому продукті:

$$v = \int_0^1 \alpha \cdot \frac{dF_{10}(\alpha)}{d\alpha} d\alpha.$$

Таким чином, для розв'язання задачі аналізу технології необхідні наступні моделі:

- дроблення – A_i
- грохочення – $P_i(d)$;
- визначення функції розкриття при дробленні;
- сепарації;
- перетворення функції розкриття на функцію крупності;
- розкриття при подрібненні;
- алгоритми змішування потоків та інших технологічних зв'язків.

Як видно з аналізу технологічного процесу вихідною характеристикою попереднього апарату є функція розподілу показника, який є вхідним наступного. Тому обов'язковим етапом синтезу схеми переробки будь-якого цінного мінералу є взаємне перетворення функцій гранулометричного складу на функцію фракційного складу та – навпаки.

2. АНАЛІТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1. Розкриття рудного мінералу при дробленні

При дробленні розкриваються рудні прошарки, потужність яких l_p . Масова частка цінного компоненту в них α_p . Потужність нерудних прошарків l_H із масовою часткою цінних компонентів у них α_H . При цьому середнє значення масової частки цінного компоненту в продукті:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_p \cdot l_p + \alpha_H \cdot l_H}{l_p + l_H}.$$

Тому при розкритті рудного мінералу дробленням $f(d)$ (диференційна функція гранулометричного складу) максимальний вміст цінного компонента в частинках становить тільки α_p . При врахуванні вказаних умов, показники розкриття будуть наступними [1]:

– вміст відкритих рудних частинок:

$$P_p = \frac{l_p}{l_p + l_H} \cdot \int_0^{l_p} \left(1 - \frac{d}{l_p}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

– вміст відкритих нерудних частинок

$$P_H = \frac{l_H}{l_p + l_H} \cdot \int_0^{l_H} \left(1 - \frac{d}{l_H}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

– вміст багатих (рудних) зростків:

$$P_{PЗ} = \frac{l_p}{l_p + l_H} \cdot \left(\int_0^{l_p} \frac{d}{l_p} \cdot f(d) \partial d + \int_{l_p}^{\infty} f(d) \partial d \right);$$

– вміст бідних (нерудних) зростків:

$$P_{H3} = \frac{l_H}{l_p + l_H} \cdot \int_0^{l_H} \frac{d}{l_H} \cdot f(d) \partial d,$$

де $f(d)$ – диференціальна функція розподілу частинок за крупністю на виході дроблення.

2.2. Розкриття рудного мінералу при подрібненні

При подрібненні розкриваються вкраплення цінного мінералу розмір яких d_{BK} . Нерудна фаза має розмір [7]:

$$r_{BK} = d_{BK} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} - 1 \right),$$

де d_{BK} – розмір вкраплення цінного мінералу; r_{BK} – відстань між сусідніми вкрапленнями цінного мінералу; L_{BK} – розмір блока руди ($L_{BK} = d_{BK} + r_{BK}$).

Якщо $\alpha_n > 0,65$, то рудна фаза стає суцільною, а нерудна – вкрапленою і тоді має сенс говорити про розкриття нерудної фази. Показники розкриття, а саме вміст рудних (P_P) та нерудних (породних) (P_H) зерен, багатих (P_{P3}) та бідних (P_{H3}) зростків, можна визначити із системи рівнянь [1]:

Відповідно до цих даних, загальний вигляд функції розподілу зростків представлено на рис. 2.1.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_P = \alpha_n \cdot \int_0^{d_{BK}} \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot f(d) \partial d; \\ P_H = (1 - \alpha_n) \cdot \int_0^{r_{BK}} \left(1 - \frac{d}{r_{BK}}\right) \cdot f(d) \partial d; \\ P_{H3} = (1 - \alpha_n) \cdot \left(\int_0^{r_{BK}} \frac{d}{r_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{r_{BK}}^{10L_{BK}} f(d) \partial d \right); \\ P_{P3} = \alpha_n \cdot \left(\int_0^{d_{BK}} \frac{d}{d_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{d_{BK}}^{10L_{BK}} f(d) \partial d \right) + \int_{10L_{BK}}^{\infty} f(d) \partial d; \end{array} \right. \quad (2.1)$$

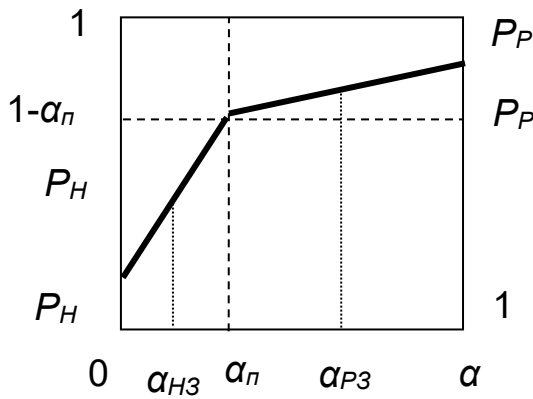


Рисунок 2.1. – Функція розподілу зростків після подрібнення

Коли розподіл частинок за крупністю однопараметричний, то інтеграли будуть табличними та їх вирази набувають вигляду:

$$P_H = (1 - \alpha_n) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right) - \frac{\bar{d}}{r_{BK}} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right)\right) \right);$$

$$P_{H3} = (1 - \alpha_n) \cdot \left(\frac{\bar{d}}{r_{BK}} \cdot \left(1 + \frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right) + \left(\exp\left(-\frac{r_{BK}}{\bar{d}}\right) - \exp\left(-\frac{10 \cdot L_{BK}}{\bar{d}}\right)\right) \right);$$

$$P_{P3} = \alpha_n \cdot \left(\frac{\bar{d}}{d_{BK}} \cdot \left(1 + \frac{d_{BK}}{\bar{d}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{d_{BK}}{\bar{d}}\right) + \left(\exp\left(-\frac{d_{BK}}{\bar{d}}\right) - \exp\left(-\frac{10 \cdot L_{BK}}{\bar{d}}\right)\right) + \exp\left(-\frac{10 \cdot L_{BK}}{\bar{d}}\right) \right);$$

де $\bar{d}$ – середня крупність частинок.

2.3. Перетворення якісних показників у характеристику розмірів

Вже давно стало аксіомою, що розмір вкраплення цінного компоненту в руді та крупність подрібнення цієї руди мають бути порівняними. Виходячи з цього були отримані залежності показників розкриття залежно від крупності частинок. Відомо, що для оцінки збагачуваності руд необхідно мати функції гранулометричного та фракційного складу. Здавалося, що цієї інформації достатньо для математичного моделювання будь-якої збагачувальної технології. Однак, сепарація у водному середовищі залежить від розміру частинок та їх питомої ваги. Крім того, в тонких класах крупності більше відкритих рудних та нерудних зерен. У результаті сепарація за крупністю супроводжується сепарацією за щільністю, що призводить до зміни вмісту корисного компоненту в продуктах, що отримуються [8].

Таким чином, при моделюванні будь-якого процесу сепарації необхідно застосовувати перетворювання двох функцій: розподіл за якісним показником і розподіл за крупністю. Для такого перетворення додатково повинна бути задана функція зв'язку крупності частинок із вмістом цінного мінералу, тобто:

$$d = f(\alpha).$$

Показники розкриття це вміст розкритих фракцій: рудних (P_P) та нерудних (P_H) зерен; багатих (P_{P3}) та бідних (P_{H3}) зростків. Багаті та бідні зростки розділені природною межею – середнім вмістом цінного компоненту в корисній копалині (α_n), яка підготовлена до розділення у цьому технологічному блоці. Це означає, що вміст цінного компоненту в багатих зростках змінюється в межах $\alpha_n \leq \alpha_{P3} < 1$, а в бідних – $0 \leq \alpha_{H3} < \alpha_n$. Така природна межа прийнята тому, що мають бути отримані продукти

у яких вміст цінних компонентів відрізняється: збагачений ($\alpha_n < \beta$) та збіднений ($\alpha_n > \nu$). Неважко бачити із системи (2.1), що крупність частинок у явному вигляді впливає на показники розкриття. Оскільки зерна різної крупності мають різний вміст корисного компонента, то середні крупності будуть визначатися за системою рівнянь 2.2.

При використанні зв'язку вміст цінного компоненту у фракціях α із крупністю d , отримуємо потрібну функцію.

Наприклад, для наступних вихідних даних: $\alpha_n = 0,3$; $d_{BK} = 0,2$ мм; $f(d) = \frac{1}{\bar{d}} \cdot \exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right)$; $\bar{d} = 0,2$ мм; ці величини становлять:
 $d_P = 0,041$ мм; $d_H = 0,0137$ мм; $d_{P31} = 0,133$ мм; $d_{P32} = 0,25$ мм; $d_{P3} = 0,16$ мм; $d_{H31} = 0,065$ мм; $d_{H32} = 0,25$ мм; $d_{H3} = 0,128$ мм;

$$\begin{cases} d_P = \frac{\alpha_n}{P_P} \cdot \int_0^{d_{BK}} d \cdot \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot f(d) \partial d \\ d_H = \frac{(1-\alpha_n)}{P_H} \cdot \int_0^{r_{BK}} d \cdot \left(1 - \frac{d}{r_{BK}}\right) \cdot f(d) \partial d \\ d_{H3} = \frac{(1-\alpha_n)}{P_{H3}} \cdot \left(\int_0^{r_{BK}} \frac{d^2}{r_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{r_{BK}}^{10L_{BK}} d \cdot f(d) \partial d \right) \\ d_{P3} = \frac{1}{P_{P3}} \left(\alpha_n \cdot \left(\int_0^{d_{BK}} \frac{d^2}{d_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{d_{BK}}^{10L_{BK}} d \cdot f(d) \partial d \right) + \int_{10L_{BK}}^{\infty} d \cdot f(d) \partial d \right) \end{cases} \quad (2.2)$$

Залежність між крупністю та вмістом цінного компоненту зображена на рис. 2.2.

Тепер визначимо середню крупність частинок в збагаченому та збідненому продуктах, якщо сепараційна характеристика має вигляд кривої 1, а функція розкриття, що відповідає обчисленим величинам, – кривій 2 (рис. 2.3).

Розрахунок дає наступні значення крупностей продуктів: $d_\beta = 0,18$; $d_\nu = 0,18$ мм. Оскільки точка перегину сепараційної характеристики збігається з максимальною крупністю частинок, то цей клас крупності переходить у багатий і бідний продукти і питома вага його в будь-якому з них стає меншою, ніж у наявному, а продукти розділення мають відповідно крупність дещо меншу за вхідну.

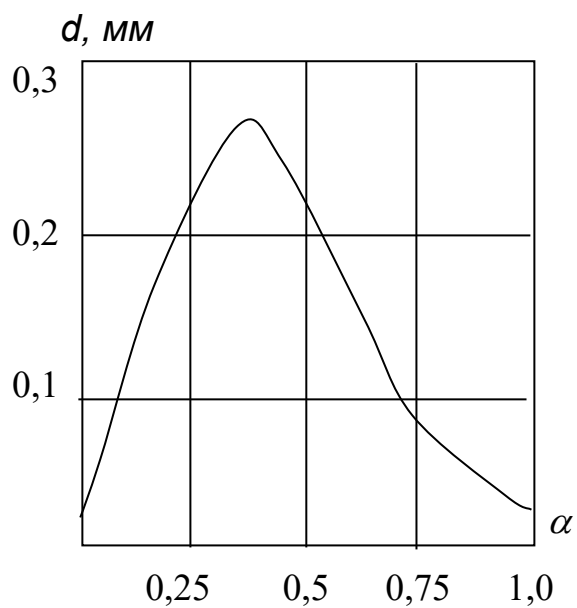


Рисунок 2.2. – Залежність
крупності частинок у фракціях
розкриття від вмісту цінного
мінералу

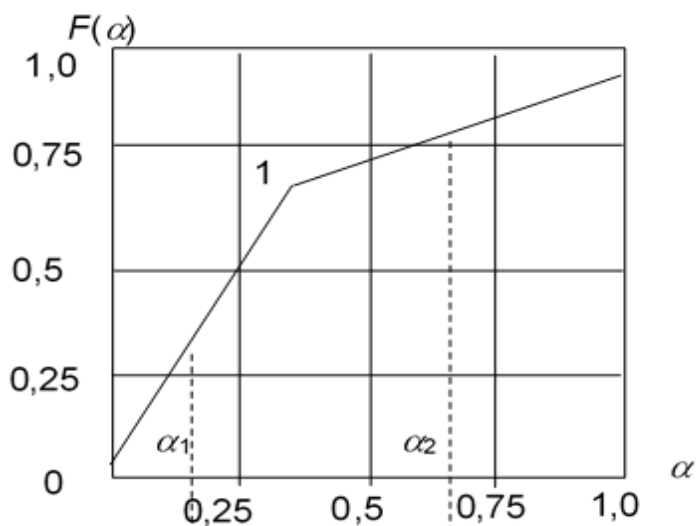
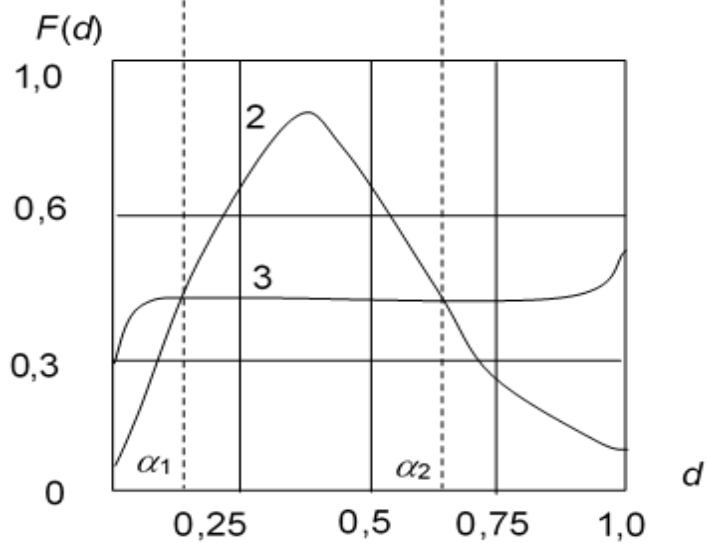


Рисунок 2.3. – Графіки зв'язку
розмірів частинок із вмістом
цінного мінералу в них



Коли сепараційна характеристика близька до ідеальної, крупності продуктів сепарації істотно відрізняються. Наприклад, якщо сепараційна характеристика має кут нахилу в точці перегину близько 85° і немає захоплення нерудної фази в концентрат і втрат рудної в хвостах, то $d_\beta = 0,25$ мм; $d_v = 0,16$ мм. Характеристика отримана шляхом усереднення на широкому інтервалі вмісту цінного компонента і тому не має значень максимальної крупності частинок.

Зменшивши інтервали усереднення або навіть звести їх до точки, отримаємо функціональну відповідність $d = f(\alpha)$.

Максимальний розмір частинок буде відповідати вихідному вмісту цінного компоненту. За допомогою такої функції легко визначати якісні показники гранулометричного складу.

Допустимо, є підготовлений продукт із розподілом зростків відповідно до кривої 1 (рис. 2.3). Сепараційна характеристика процесу розсіву відповідає кривій 2, а функція $d = f(\alpha)$ – кривій 3. Припустимо також, що відома функція розподілу частинок за крупністю $F(d)$. Виходи надрешітного (H) та підрешітного (Π) продуктів становлять:

$$\gamma^H = \int_0^{d_{\max}} \frac{F(d)}{\partial d} P(d); \quad \gamma^\Pi = \int_0^{d_{\max}} \frac{F(d)}{\partial d} (1 - P(d)).$$

Середні крупності цих продуктів:

$$d^H = \frac{1}{\gamma^H} \cdot \int_0^{d_{\max}} \frac{F(d)}{\partial d} d \cdot P(d); \quad d^\Pi = \frac{1}{\gamma^\Pi} \cdot \int_0^{d_{\max}} \frac{F(d)}{\partial d} d \cdot (1 - P(d)).$$

Розподіл частинок за крупністю у цих продуктах:

$$F^H(d) = \frac{1}{\gamma^H} \cdot \int_0^d (1 - P(d)) \cdot \frac{F(d)}{\partial d} \partial \alpha; \quad F^\Pi(d) = \frac{1}{\gamma^\Pi} \cdot \int_0^d P(d) \cdot \frac{F(d)}{\partial d} \partial \alpha.$$

Вміст цінного компоненту:

$$\alpha^H = \frac{1}{\gamma^H} \cdot \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha \cdot \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} d\alpha;$$

$$\alpha^П = \frac{1}{\gamma^П} \cdot \left(\int_0^{\alpha_1} \alpha \cdot \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} d\alpha + \int_{\alpha_2}^1 \alpha \cdot \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} d\alpha \right).$$

Таким чином, для моделювання технології збагачувальних процесів необхідно і достатньо мати три функції, що характеризують початковий (вхідний) потік на будь-який технологічний апарат. Це функції розподілу частинок за крупністю (гранулометричний склад) та вмісту цінного компонента (фракційний склад), а також функція зв'язку крупності частинок із вмістом цінного компонента за класами крупності.

2.4. Визначення середнього вмісту цінного компоненту у продуктах розділення за крупністю

Вивчення характеру розкриття вкрапленого цінного мінералу показало, що тонкі частинки містять більше розкритого мінералу. Отримані залежності, які дозволяють визначити функцію розподілу зростків $F(\alpha)$. Якщо виконати гранулометричний аналіз фракцій розкриття, то можна отримати функцію зв'язку крупності і вмісту цінного мінералу (рис. 2.4). Така залежність дозволяє виконувати моделювання розділових технологій без припущення, що розділення здійснюється лише за однією ознакою.

Припустимо, що розділення за крупністю проводиться на ситі. У цьому разі процес практично можна характеризувати одним значенням крупності розділення, що дорівнює розміру отвору сита, $d = d_o$. Уведемо рівень $d_{ГР}$ у графіку $d = f(\alpha)$ (рис. 2.4).

Це вже одразу дозволить визначити інтегральні показники в надрешітних та підрешітних продуктах за очевидними співвідношеннями:

$$\bar{\alpha}_{\Gamma P} = \frac{\int_{\alpha_{min}}^{\alpha_1} \alpha \cdot P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha + \int_{\alpha_2}^{\alpha_{max}} \alpha \cdot P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha}{\int_{\alpha_{min}}^{\alpha_1} P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha + \int_{\alpha_2}^{\alpha_{max}} P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha};$$

$$\bar{\alpha}_{HP} = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha \cdot P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} P(\alpha) \cdot f(\alpha) d\alpha};$$

де $P(\alpha)$ – сепараційна характеристика розділового апарату за крупністю.

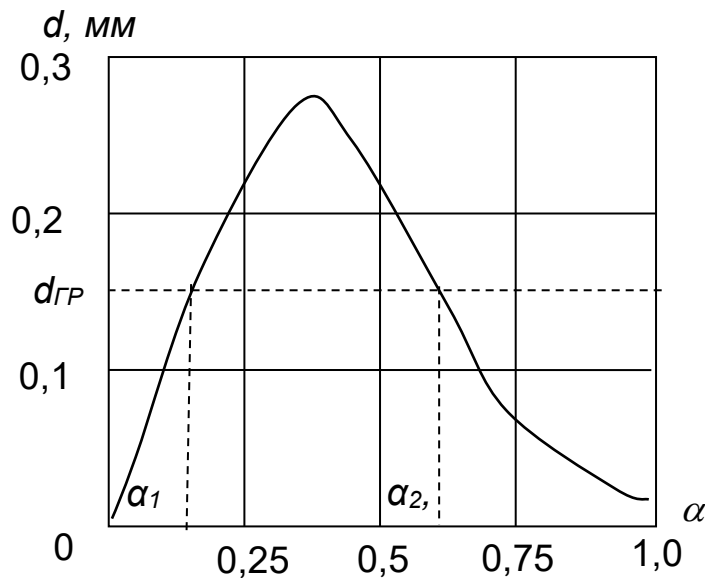


Рисунок 2.4. – Залежність крупності частинок у фракціях розкриття від вмісту цінного мінералу

Для отримання функцій розподілу зростків у продуктах розділення необхідно змінити межі інтегрування у виразах для P_P , P_{P3} , P_H , P_{H3} .

Припустимо, що $d_r = 2d_{BK}$. Тоді, порівнюючи значення границь з цим числом, розрахуємо кількість зростків, що перейшли в над- та підрешітний продукти:

$$P_{H3}^H = (1 - \alpha_n) \cdot \int_{0_r}^{\infty} f(d) \partial d;$$

$$P_{H3}^{\Pi} = (1 - \alpha_n) \cdot \left(\int_0^{r_{BK}} \frac{d}{d_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{r_{BK}}^{d_r} f(d) \partial d \right);$$

$$P_{P3}^H = \alpha_n \cdot \int_{d_r}^{\infty} f(d) \partial d;$$

$$P_{P3}^{\Pi} = \alpha_n \cdot \left(\int_0^{d_{BK}} \frac{d}{d_{BK}} \cdot f(d) \partial d + \int_{d_{BK}}^{d_r} f(d) \partial d \right).$$

Така подія типова для дроблення і, якщо припустити, що $d_r = 2l_p$, і підставити замість крупності вкраплення довжину прошарку, то отримаємо необхідні величини. Вміст цінного компонента в продуктах розділення наступний:

$$\alpha^{\Pi} = \frac{P_P \cdot \alpha_{P\Pi} + P_{P3}^{\Pi} \cdot \alpha_{P3} + P_{H3}^{\Pi} \cdot \alpha_{H3} + P_H \cdot \alpha_{H\Pi}}{P_P + P_{P3}^{\Pi} + P_{H3}^{\Pi} + P_H};$$

$$\alpha^H = \frac{P_{P3}^H \cdot \alpha_{P3} + P_{H3}^H \cdot \alpha_{H3}}{P_{P3}^H + P_{H3}^H}.$$

2.5. Розкриття цінного мінералу у другій та наступних стадіях подрібнення

Після первинного подрібнення структура руди порушується і про природне вкраплення говорити не має сенсу. Вкраплення утворюється

з рудних включень у зростках. Вторинне подрібнення сприяє подальшому розкриттю цих зростків.

Так з багатих зростків утворюються:

відкриті рудні зерна – $P_{PЗ}$;

відкриті нерудні зерна – $H_{PЗ}$;

багаті зростки – $P_{ЗPЗ}$;

бідні зростки – $H_{ЗPЗ}$.

З бідних зростків утворюються такі ж фракції: $P_{HЗ}$, $H_{HЗ}$, $P_{ЗHЗ}$, $H_{ЗHЗ}$.

Відмінність одного типу зростків від іншого полягає в середньому (об'ємному) вмісті в них цінного мінералу: у багатих – $\alpha_{PЗ}$; у бідних – $\alpha_{HЗ}$.

Розмір вкраплення залежить від розмірів частинки d_q . Тоді:

$$d_{ВКНЗ} = d_q \cdot \sqrt[3]{\alpha_{HЗ}}; \quad d_{ВКРЗ} = d_q \cdot \sqrt[3]{\alpha_{PЗ}}.$$

Відмінність між багатими та бідними зростками була визначена початковим вмістом цінного мінералу, що становить 0,35...0,4. Коли з підготовленого продукту видаляється відкрита фракція, тоді проміжним продуктом є зростки, а вміст у ньому цінного мінералу буде таким самим, як у вихідній руді, тобто α_n .

Коли технологія збагачення будується за принципом видалення відкритих фракцій після кожної підготовчої операції, тоді можна припустити, що вихідна інформація для розрахунків показників розкриття наступна:

$$\alpha_{Pi} = \alpha_n = const,$$

$$P_{Pi} = 0; \quad P_{Hi} = 0; \quad P_{PЗi} = \alpha_n; \quad P_{HЗi} = 1 - \alpha_n;$$

$$\alpha_{PЗi} = \frac{1+\alpha_n}{2}; \quad P_{HЗi} = \frac{\alpha_n}{2};$$

$$d_{BKP3i} = d_{\text{ч}} \cdot \sqrt[3]{\alpha_{P3i}}; \quad d_{BKH3i} = d_{\text{ч}} \cdot \sqrt[3]{\alpha_{H3i}}.$$

Розрахункові співвідношення мають вигляд:

$$P_{PP3} = \alpha_{P3i} \cdot \int_0^{d_{BKP3i}} \left(1 - \frac{d}{d_{BKP3i}}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{HP3} = (1 - \alpha_{P3i}) \cdot \int_0^{d - d_{BKP3i}} \left(1 - \frac{d}{d_{\text{ч}} - d_{BKP3i}}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{P3P3} = \alpha_{P3i} \cdot \int_0^{d_{BKP3i}} \frac{d}{d_{BKP3i}} \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{H3P3} = (1 - \alpha_{P3i}) \cdot \int_0^{d - d_{BKP3i}} \frac{d}{d_{\text{ч}} - d_{BKP3i}} \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{PH3} = \alpha_{H3i} \cdot \int_0^{d_{BKH3i}} \left(1 - \frac{d}{d_{BKH3i}}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{HH3} = (1 - \alpha_{H3i}) \cdot \int_0^{d - d_{BKH3i}} \left(1 - \frac{d}{d_{\text{ч}} - d_{BKH3i}}\right) \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{P3H3} = \alpha_{H3i} \cdot \int_0^{d_{BKH3i}} \frac{d}{d_{BKH3i}} \cdot f(d) \partial d;$$

$$P_{H3H3} = (1 - \alpha_{H3i}) \cdot \int_0^{d - d_{BKH3i}} \frac{d}{d_{\text{ч}} - d_{BKH3i}} \cdot f(d) \partial d.$$

Тоді кінцеві показники будуть наступними:

$$P_{Pi} = P_{\text{вех}} + P_{PP3} + P_{PH3};$$

$$P_{Hi} = P_{\text{вех}} + P_{HP3} + P_{HH3};$$

$$P_{P3i} = P_{P3P3} + P_{P3H3};$$

$$P_{H3i} = P_{H3P3} + P_{H3H3}.$$

Коли відкрита нерудна фракція не видаляється з наступної технологічної переробки, тоді необхідно вводити штучне обмеження. Припустимо що у деякій стадії збагачення розподіл зростків має вигляд, як на рис.2.5.

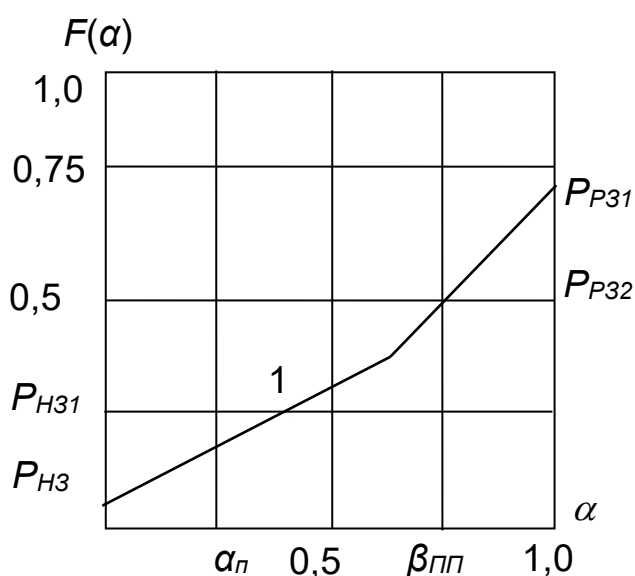


Рисунок 2.5. – Функція розкриття цінного мінералу

В цьому випадку середній вміст цінного мінералу у зростках становитиме:

у багатих зростках, вміст яких дорівнює:

$$P_{P3} = P_{P31} + P_{P32};$$

$$\alpha_{P3} = \frac{P_{P31} \cdot 0,5 \cdot (1 + \beta_{пп}) + P_{P32} \cdot 0,5 \cdot (\alpha_n + \beta_{пп})}{P_{P31} + P_{P32}},$$

у бідних зростках, вміст яких: $P_{H3} = P_{H31} + P_{H32};$

$$\alpha_{H3} = 0,5 \cdot \alpha_{П}.$$

Якщо ж припустити, що кожен клас крупності подрібнюється незалежно один від одного і розподіл уламків при подрібненні залежить від розміру частинок – чим дрібніше клас крупності, тим твердіше стає тіло, тоді розрахунок розкриття стає досить громіздким [9]. Крім того, необхідно мати можливість у будь-який спосіб оцінювати такі розподіли. Поки що це можна зробити експериментально.

Для цього необхідно мати безліч функцій розподілу частинок за крупністю, що виходять після подрібнення кожного вузького класу. Залежно від виду подрібнення ці функції змінюються. Проте головним залишається те, що функції $f(d/d_q)$ існують. Ці функції представлені на рис. 2.6, а їх приріст зведено в табл. 2.1 (рядки).

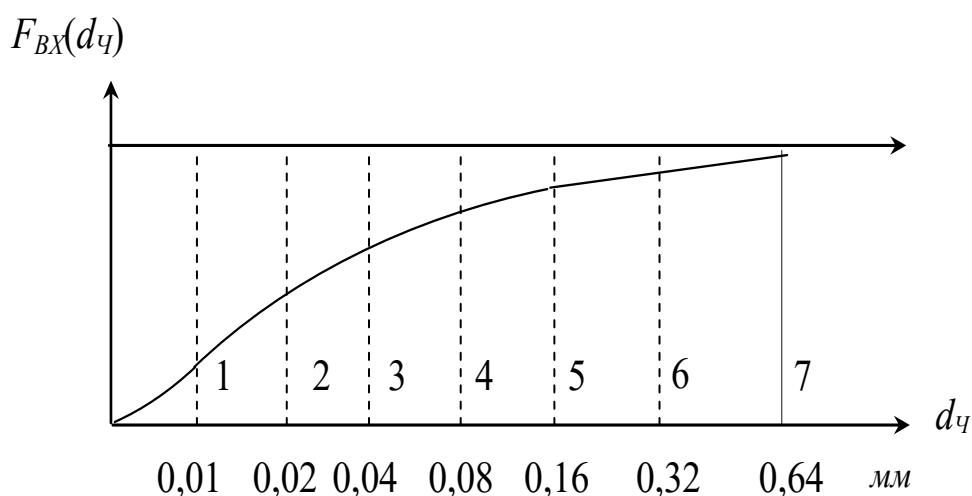


Рисунок 2.6. – Функція розподілу частинок на вході подрібнення

На вхід апарату для подрібнення надходить продукт з функцією розподілу за крупністю ΔF_{BX} .

Виконаємо розрахунок розкриття при таких початкових даних:

$$\alpha_{H3} = 0,15; \quad \alpha_{P3} = 0,65; \quad \sqrt[3]{0,15} = 0,53; \quad \sqrt[3]{0,65} = 0,866; \quad r_{BK} = d_q - d_{BK};$$

$$P_{P3} = 0,45; P_{H3} = 0,3; P_P = 0,15; P_H = 0,1.$$

Розрахунки представимо у вигляді таблиць. Початкові дані наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Початкові дані до розрахунків розкриття у другій стадії подрібнення

	Функції розподілу частинок, що отримані після подрібнення окремих класів крупності							Розмір вкраплення рудної фази у зростках			
								d_{BKP3}	d_{BKH3}	r_{BKP3}	r_{BKH3}
ΔF_1	1							0,0086	0,0053	0,0015	0,0047
ΔF_2	0,3	0,7						0,017	0,01	0,003	0,01
ΔF_3	0,2	0,3	0,5					0,034	0,02	0,006	0,02
ΔF_4	0,25	0,25	0,25	0,25				0,069	0,04	0,011	0,04
ΔF_5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2			0,137	0,08	0,023	0,08
ΔF_6	0,3	0,25	0,2	0,2	0,15	0		0,27	0,16	0,05	0,16
ΔF_7	0,35	0,25	0,2	0,15	0,05	0	0	0,54	0,32	0,1	0,32
ΔF_{BX}	0,12	0,28	0,22	0,15	0,08	0,08	0,07				
$d, \text{ мм}$	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64				

У табл. 2.1 записуємо добутки збільшення функцій розподілу уламків на збільшення вхідної функції розподілу частинок,

$$P_{PP3} = \alpha_{P3} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{d_j}{d_{BK_i}}\right) \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{P3P3} = \alpha_{P3} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{d_j}{d_{BK_i}} \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{HP3} = (1 - \alpha_{P3}) \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{d_j}{r_{BK_i}}\right) \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{H3P3} = (1 - \alpha_{P3}) \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{d_j}{r_{BK_i}} \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{PH3} = \alpha_{H3} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{d_j}{d_{BKH3}}\right) \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{PЗНЗ} = \alpha_{НЗ} \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{d_j}{d_{ВКНЗ}} \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{ННЗ} = (1 - \alpha_{НЗ}) \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{d_j}{r_{ВКНЗ}}\right) \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q);$$

$$P_{НЗНЗ} = (1 - \alpha_{НЗ}) \cdot \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{d_j}{r_{ВКНЗ}} \cdot \Delta F_i(d_j^\circ) \cdot \Delta F_i(d_q).$$

У табл. 2.2 запишемо проміжні дані.

Останній рядок табл. 2.2 включає суми елементів стовбців.

Надалі складаємо таблиці, де записуємо ймовірності появи відкритих зерен або зростків і відповідні їм виходи продуктів, частинки яких можуть містити ці фази.

Таблиця 2.2. – Проміжні дані до розрахунків розкриття у другій стадії подрібнення

d	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64
Добутки $\Delta F_i \Delta F_{BX} = G_{ij}$, i – номер рядка j - номер стовпця	0,12						
	0,084	0,196					
	0,044	0,066	0,11				
	0,037	0,038	0,038	0,038			
	0,024	0,016	0,016	0,016	0,016		
	0,016	0,02	0,016	0,016	0,012	0,0	
	0,024	0,017	0,014	0,01	0,0035	0,0	0,0
Інтегральна функція розподілу всіх уламків	0,349	0,35	0,19	0,08	0,03	0,0	0,0

Складаємо різниці $V = 1 - d/d_{ВКРЗ}$ та значення заносимо в табл. 2.3 (перші елементи у клітинках). Другі елементи клітинок цієї таблиці – це добуток елементів табл. 2.2 на верхні елементи табл. 2.3, тобто вихід відповідної фази продукту, що відповідає ймовірності виходу відкритого рудного зерна з багатого зростка.

Таблиця 2.3. – Розрахунок кількості відкритих рудних зерен, що утворилися із багатих зростків

d		0						
0,01	V $V \cdot G_{i,j}$	0,42 0,035	0					
0,02	V $V \cdot G_{i,j}$	0,72 0,032	0,42 0,028	0				
0,04	V $V \cdot G_{i,j}$	0,86 0,032	0,72 0,027	0,42 0,016	0			
0,08	V $V \cdot G_{i,j}$	0,93 0,022	0,86 0,014	0,72 0,011	0,42 0,006	0		
0,16	V $V \cdot G_{i,j}$	0,963 0,015	0,93 0,018	0,86 0,014	0,72 0,011	0,42 0,005	0	
0,32	V $V \cdot G_{i,j}$	0,972 0,023	0,963 0,016	0,93 0,013	0,86 0,0086	0,72 0,002	0,42 0	0
Інтегральна функція розподілу		0,159	0,103	0,054	0,025	0,007		$\Sigma_{PP3}=$ 0,348

Складемо відношення крупностей до вкраплення d/d_{BKP3} , і значення записуємо в табл. 2.4 (перші елементи у клітинах), що відповідає утворенню багатого зростка з багатого зростка. Другі елементи є добуток елементів відповідних клітин на елементи табл. 2.3.

Усі наступні табл. 2.5–2.10 складаються за таким же правилом, як і табл. 2.3.

Складаємо різниці $1 - d/d_{BKH3}$ та їх значення і заносимо в табл. 2.5, що відповідає утворенню відкритого рудного зерна з бідного зростка.

Таблиця 2.4. – Розрахунок кількості багатих зростків, що утворилися із багатих зростків

1 0,12						
0,58 0,05	1 0,196					
0,29 0,013	0,58 0,038	1 0,11				
0,14 0,005	0,29 0,01	0,58 0,019	1 0,038			
0,07 0,0015	0,14 0,002	0,29 0,005	0,58 0,008	1 0,016		
0,037 0,0006	0,07 0,0014	0,14 0,002	0,29 0,005	0,58 0,006	1 0	
0,018 0,0004	0,037 0,0006	0,07 0,001	0,14 0,0014	0,29 0,001	0,58 0	1 0
0,19	0,25	0,137	0,05	0,023		$\Sigma_{P3P3} = 0,65$

Таблиця 2.5. – Розрахунок кількості відкритих рудних зерен, що утворилися із бідних зростків

0						
0	0					
0,5 0,022	0	0				
0,75 0,028	0,5 0,019	0	0			
0,875 0,021	0,75 0,012	0,5 0,008	0	0		
0,938 0,015	0,875 0,0175	0,75 0,012	0,5 0,008	0	0	
0,97 0,023	0,938 0,016	0,875 0,012	0,75 0,0075	0,5 0,0017	0	0
0,109	0,064	0,032	0,015	0,0017		$\Sigma_{PH3} = 0,1934$

Складаємо відношення $d/d_{\text{ВКНЗ}}$ та їх значення записуємо у табл. 2.6, що відповідає утворенню багатого зростка з бідного.

Таблиця 2.6. – Розрахунок кількості багатих зростків, що утворилися із бідних зростків

1 0,12						
	1 0,196					
0,5 0,022	1 0,066	1 0,11				
0,25 0,009	0,5 0,018	1 0,038	1 0,038			
0,125 0,003	0,25 0,004	0,5 0,008	1 0,016	10,016		
0,0625 0,001	0,125 0,0025	0,25 0,004	0,5 0,008	1 0,012	1 0	
0,031 0,0007	0,0625 0,001	0,125 0,0017	0,25 0,002	0,5 0,0017	1 0	1 0
0,24	0,287	0,16	0,06	0,03		$\Sigma_{P3H3} = 0,778$

Складаємо різниці $1 - d/r_{BKP3}$ та їх значення заносимо в табл. 2.7, що відповідає утворенню бідних зростків із багатих зростків.

Таблиця 2.7. – Розрахунок кількості відкритих нерудних зерен, що утворилися із багатих зростків

0						
0	0					
0	0	0				
0,1 0,0037	0	0	0			
0,57 0,0137	0,1 0,0016	0	0	0		
0,8 0,013	0,57 0,01	0,1 0,0016	0	0	0	
0,9 0,021	0,8 0,011	0,57 0,008	0,1 0,001	0	0	0
0,051	0,022	0,0096	0,001			$\Sigma_{HP3} = 0,0836$

Складаємо відношення d/r_{BKP3} та їх значення заносимо до табл. 2.8, що відповідає утворенню бідних зростків із багатих.

Таблиця 2.8. – Розрахунок кількості бідних зростків, що утворилися із багатих зростків

1 0,12						
1 0,084	1 0,196					
1 0,044	1 0,066	1 0,11				
0,9 0,033	1 0,038	1 0,038	1 0,038			
0,43 0,01	0,9 0,014	1 0,016	1 0,016	1 0,016		
0,2 0,003	0,43 0,008	0,9 0,014	1 0,016	1 0,012	1 0	
0,1 0,0024	0,2 0,003	0,43 0,0065	0,9 0,009	1 0,0035	1 0	1 0
0,257	0,32	0,18	0,08	0,03		$\Sigma_{H3P3} = 0,868$

Складаємо різниці $1 - d/r_{BKH3}$ та їх значення заносимо в табл. 2.9, що відповідає утворенню відкритих нерудних зерен із бідних зростків.

Таблиця 2.9. – Розрахунок кількості відкритих нерудних зерен, що утворилися із бідних зростків

0						
0	0					
0,5 0,022	0	0				
0,75 0,028	0,5 0,019	0	0			
0,875 0,02	0,75 0,012	0,5 0,008	0	0		
0,918 0,015	0,875 0,015	0,75 0,012	0,5 0,008	0	0	
0,97 0,023	0,918 0,016	0,875 0,015	0,75 0,0075	0,5 0,0017	0	0
0,108	0,062	0,035	0,015	0,0017		$\Sigma_{HH3} = 0,227$

Складаємо відношення $d/r_{BKHЗ}$ та їх значення записуємо у табл. 2.10, що відповідає утворенню бідних зростків із бідних зростків.

Таблиця 2.10. – Розрахунок кількості бідних зростків, що утворилися із бідних зростків.

0,12 1						
0,084 1	0,196 1					
0,022 0,5	0,066 1	0,11 1				
0,009 0,25	0,019 0,5	0,038 1	0,038 1			
0,003 0,125	0,004 0,25	0,008 0,5	0,016 1	0,016 1		
0,001 0,0625	0,0025 0,125	0,004 0,25	0,008 0,5	0,012 1	0 1	
0,0007 0,031	0,001 0,0625	0,0017 0,125	0,0025 0,25	0,001 7 0,5	0 1	0 1
0,24	0,29	0,16	0,065	0,03		$\Sigma_{HЗHЗ} = 0,785$

Записуємо остаточні співвідношення для отримання показників розкриття.

$$P_P = 0,3 \cdot 0,348 \cdot 0,15 + 0,1934 \cdot 0,45 \cdot 0,65 = 0,071;$$

$$P_H = 0,0836 \cdot 0,45 \cdot (1 - 0,15) + 0,227 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,65) = 0,056;$$

$$P_{HЗ} = 0,868 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,15) + 0,785 \cdot 0,45 \cdot (1 - 0,65) = 0,387;$$

$$P_{PЗ} = 0,776 \cdot 0,3 \cdot 0,15 + 0,45 \cdot 0,65 \cdot 0,65 = 0,218;$$

$$P_{ВОбр} = 0,071 + 0,056 + 0,387 + 0,218 = 0,74 \approx 0,75;$$

$$P_H = 0,071 + 0,15 = 0,22;$$

$$P_P = 0,056 + 0,1 = 0,156.$$

Похибка розрахунку становила 2%. Тому для наступних розрахунків можна виконати нормування з метою виключення накопичення похибок та уникнення суперечливих результатів.

2.6. Показник розкриття рудного мінералу

Переважає більшість хімічних елементів знаходиться в природі у вигляді сполук, які утворюють мінерали (фр. *minéral*, від, пізно-лат. *minera* – руда). Мінерали – це хімічні сполуки елементів один або декілька з яких є цінними. Вони зосереджуються у вигляді вкраплень різної крупності, що в збагаченні корисних копалин прийнято називати вкрапленістю. Вкрапленість характеризується функцією розподілу за крупністю $f(d_{BK})$. Об'єднання мінералів більш-менш постійного мінералогічного складу, що утворюють самостійне тіло в земній корі, складають гірські породи. Ті з гірських порід, хімічний склад і фізичні властивості яких, дозволяють їх ефективно використовувати у сфері матеріального виробництва, відносяться до корисних копалин.

Збагачення корисних копалин має предметом виділення мінералів з необхідним хімічним елементом, що входить у поняття – цінний мінерал, а продукт виділення – цільовий продукт (концентрат). Для вилучення цінного мінералу його попередньо необхідно відокремити від інших мінералів, що утворюють цю гірську породу. Це досягається дробленням і подрібненням. У результаті подрібнення утворюються частинки різного розміру які характеризуються функцією розподілу частинок за крупністю $f(d)$ (інтегральна функція $F(d_{BK})$). Оскільки руйнування гірської породи здійснюється як за границею вкраплення цінного мінералу так і за межами спаяності мінералів, то в результаті утворюються відкриті частинки цінного мінералу – відкриті рудні зерна (Р); відкриті частинки інших мінералів гірської породи – відкриті нерудні зерна (Н), а також частинки з поєднанням цінного мінералу та інших мінералів – зростки. У зростках може переважати цінний мінерал – багаті зростки (РЗ); або нецінні мінерали – бідні зростки (НЗ). Залежно від об'ємів відкритої фракції та зростків досягається певне розкриття цінного мінералу, яке в загальному випадку характеризується функцією

розподілу зростків за вмістом у них цінного мінералу α при деякій середній крупності подрібнення (диференціальна функція – $\bar{d} \rightarrow f(\alpha|d)$, або інтегральна $\bar{d} \rightarrow F(\alpha|d)$), рис. 2.7. Вигляд цієї функції залежить від збагачувальних властивостей сировини: вкрапленості d_{BK} , подрібнюваності (міцності), вмісту цінного мінералу α_n . Результати подрібнення – функції розподілу частинок за крупністю, параметри якої залежать від подрібнюваності, але в результаті подрібнення проявляються всі показники міцності корисних копалин. Перші показники – те, що закладено природою при створенні родовища і вони можуть бути змінними, тобто. є некерованими параметрами сировини. Останнім є розподіл частинок за крупністю, який є керованим чинником і один із основних показників підготовки сировини до розділення. Головним завданням операції розділення є отримання частинок лише двох видів – відкритих рудних та нерудних зерен. Зростків не має бути. Це буде ідеальним розділенням, яке може бути реалізовано за умови, що середня крупність частинок прагне до нуля ($d \rightarrow 0$). У великих кусках руди вміст цінного мінералу однаковий, тобто коли середня крупність частинок $\bar{d} \rightarrow \infty$, зростки мають вміст цінного мінералу, який рівний його початковому вмісту α_n . При зменшенні крупності частинок (кусків) завдяки дробленню чи подрібненню, з'являються такі частинки у яких вміст цінного мінералу більше, або менше від початкового. Це багаті (α_{P3}), або бідні (α_{H3}) зростки.

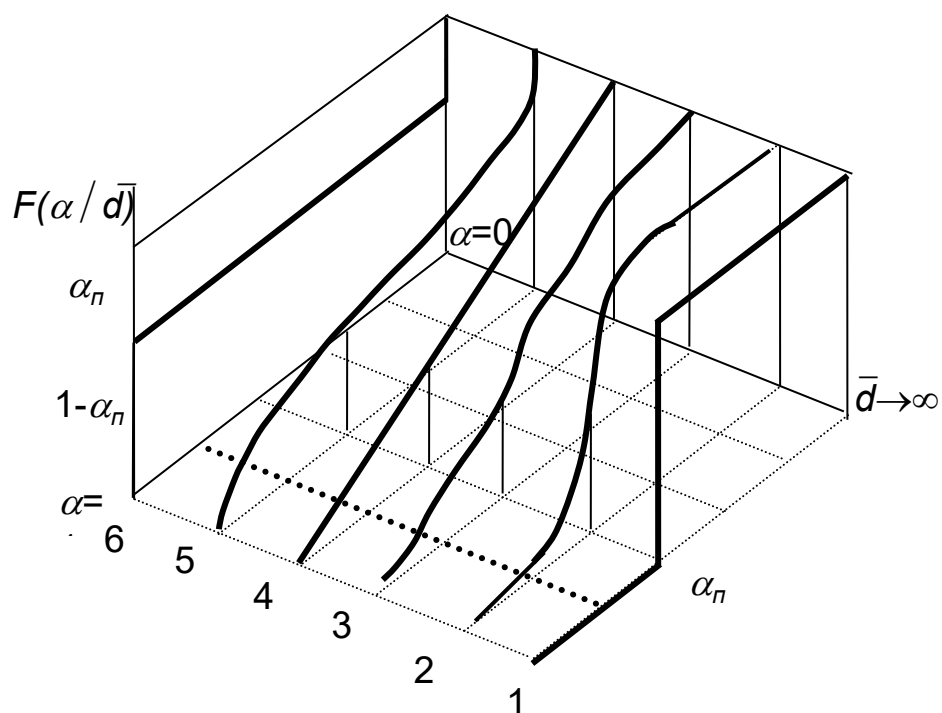
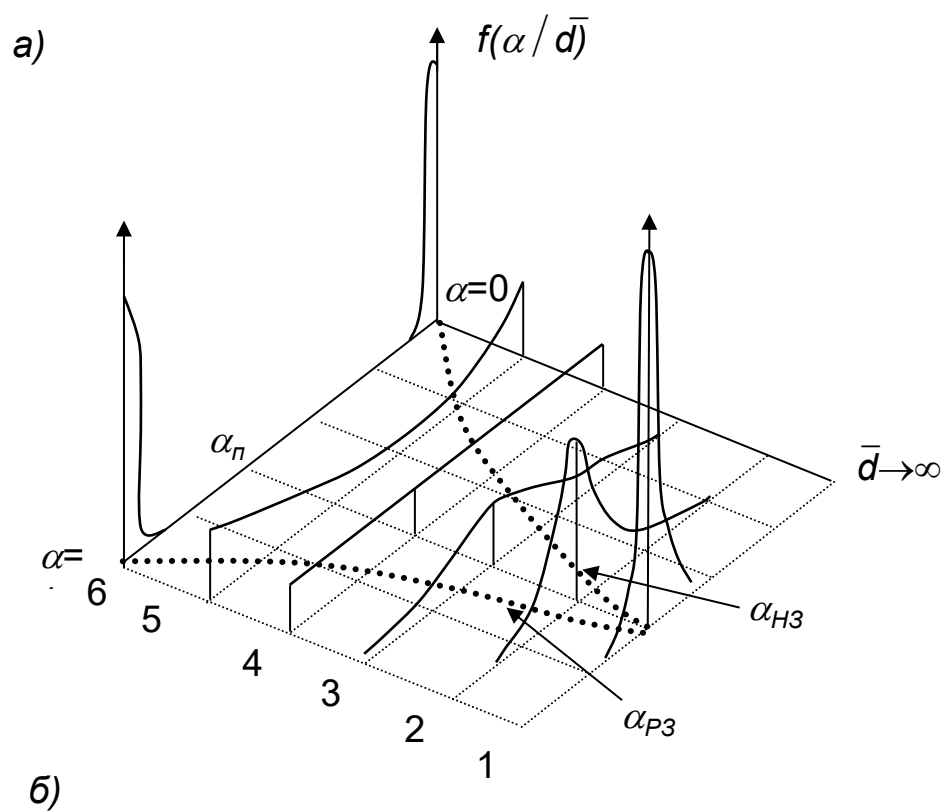


Рисунок 2.7. – Загальний вигляд функцій розподілу зростків при різних середніх розмірах частинок корисної копалини

а) – диференційної функції

б) – інтегральної функції

При подальшому зменшенні значення середньої крупності подрібнення вміст цінного мінералу в багатих і бідних зростках змінюється в залежності від розкриття і прагне, відповідно: $\alpha_{P3} \rightarrow 1$, а $\alpha_{H3} \rightarrow 0$; коли $\bar{d} \rightarrow 0$.

Для того, щоб виділити частинки із заданим вмістом цінного мінералу, необхідно функцію розподілу зростків певним чином «розрізати». Гіпотетично це досягається проведенням вертикалі на графіку функції $F(\alpha)$ в бажаній точці розділення. Тоді фракції, що розташовуються праворуч від вертикалі, утворюватимуть збагачену фракцію, а ті, що ліворуч від вертикалі - збіднену.

Завдання збагачення корисних копалин у тому, щоб збагачений продукт мав вміст цінного мінералу більший за вміст у початковому продукті $\beta > \alpha_n$, а збіднений продукт – $\alpha_n > v$. Тобто основним критерієм відмінності продуктів розділення є початковий вміст цінного мінералу.

У промисловості таке розділення здійснюється за допомогою апаратів, у яких розділові властивості характеризуються не вертикаллю, а похилою, складнішою кривою, що називається сепараційною характеристикою. Сепараційна характеристика відображає ймовірність переходу вузьких фракцій продукту в збагачений продукт. Чим більше сепараційна характеристика відрізняється від ступінчастої функції, тим гірші розділові властивості апарату. Збагачувачі називають ступінчасту функцію ідеальною сепараційною характеристикою.

З викладеного виходить, що оцінка якості розділення може бути виконана не враховуючи показників підготовки сировини. Отже, розглянемо загальні аспекти оцінки якості процесів розділення.

Технологічні критерії дозволяють незалежно від показників підготовки сировини за показниками розділення оцінити його якість. Чим вище значення критерію, тим краще поєднуються показники підготовленої сировини та розділові властивості сепараційного процесу.

При подрібненні розкриваються вкраплення цінного мінералу розмір яких d_{BK} . Нерудна фаза має розмір $r_{BK} = d_{BK} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} - 1 \right)$, якщо вміст цінного мінералу у матеріалі подрібнення $\alpha_n \leq 0,65$.

Збільшення крупності подрібнення може призвести до такої ситуації, коли відкритих фракцій нічого очікувати (рис. 2.7, 2.8, графік 3), а наступне збільшення крупності призведе до того, що функція розподілу прийме вид графіку 2 (рис. 2.7, 2.8) та графіку 1.

Граничні значення вмісту цінного мінералу в частинках залежно від їх крупності визначимо на підставі деякої моделі будови руди. Припустимо це буде матрична будова. Існують функції, що пов'язують розмір частинок d з граничним вмістом у них цінного мінералу, якщо відомі текстурно-структурні ознаки руди і вміст цінного мінералу. Ці залежності мають вигляд:

– для максимального значення:

$$\alpha_{MAX} = \left(\frac{n+1}{n \cdot \sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} + 1} \right);$$

– для мінімального значення:

$$\alpha_{MIN} = \left(\frac{n}{(n+1) \cdot \sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} - 1} \right);$$

$$n = \text{int} \left(\frac{d}{L_{BK}} \right),$$

де d_{BK} – розмір вкраплення цінного мінералу; α_n – вміст цінного мінералу в моноліті руди; n – ціла частина кількості вимірів L_{BK} , що укладаються в діаметрі частинки (2.1).

Розкриттям можна характеризувати підготовлений до розділення матеріал, для чого необхідно певним чином провести його аналіз. Спробуємо виконати такий аналіз на мінімальній кількості вихідної інформації.

Нехай функція розподілу зростків $F(\alpha)$ подрібненої мінеральної сировини має вигляд, що показано на рис. 2.8, а.

Таким чином, щоб характеризувати розкриття цінного мінералу необхідно використовувати всю функцію розподілу зростків, що одержана в результаті підготовки матеріалу до розділення. На цій базі отримуємо [9]:

$$R = \frac{P_P + P_{P3} \cdot \alpha_{P3}}{P_P + P_{P3}} - \frac{P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{P_H + P_{H3}}$$

Відповідно до гіпотез про ймовірний вид функції розподілу зростків можна записати такі співвідношення:

$$P_P + P_{P3} = \alpha_n; \quad P_H + P_{H3} = 1 - \alpha_n; \quad P_P = \alpha_n - P_{P3};$$

$$\alpha_{P3} = \frac{\alpha_n + \alpha_{MAX}}{2}; \quad \alpha_{H3} = \frac{\alpha_n + \alpha_{MIN}}{2}.$$

Коли розмір частинок, порівняльний із розміром вкраплення, а функція розподілу фракцій включає всі можливі фракції, тоді:

$$R = 1 - \frac{P_{P3}}{2 \cdot \alpha_n} \cdot (2 - (\alpha_n + \alpha_{MAX})) - \frac{P_{H3}}{2 \cdot (1 - \alpha_n)} \cdot (\alpha_n + \alpha_{MIN}).$$

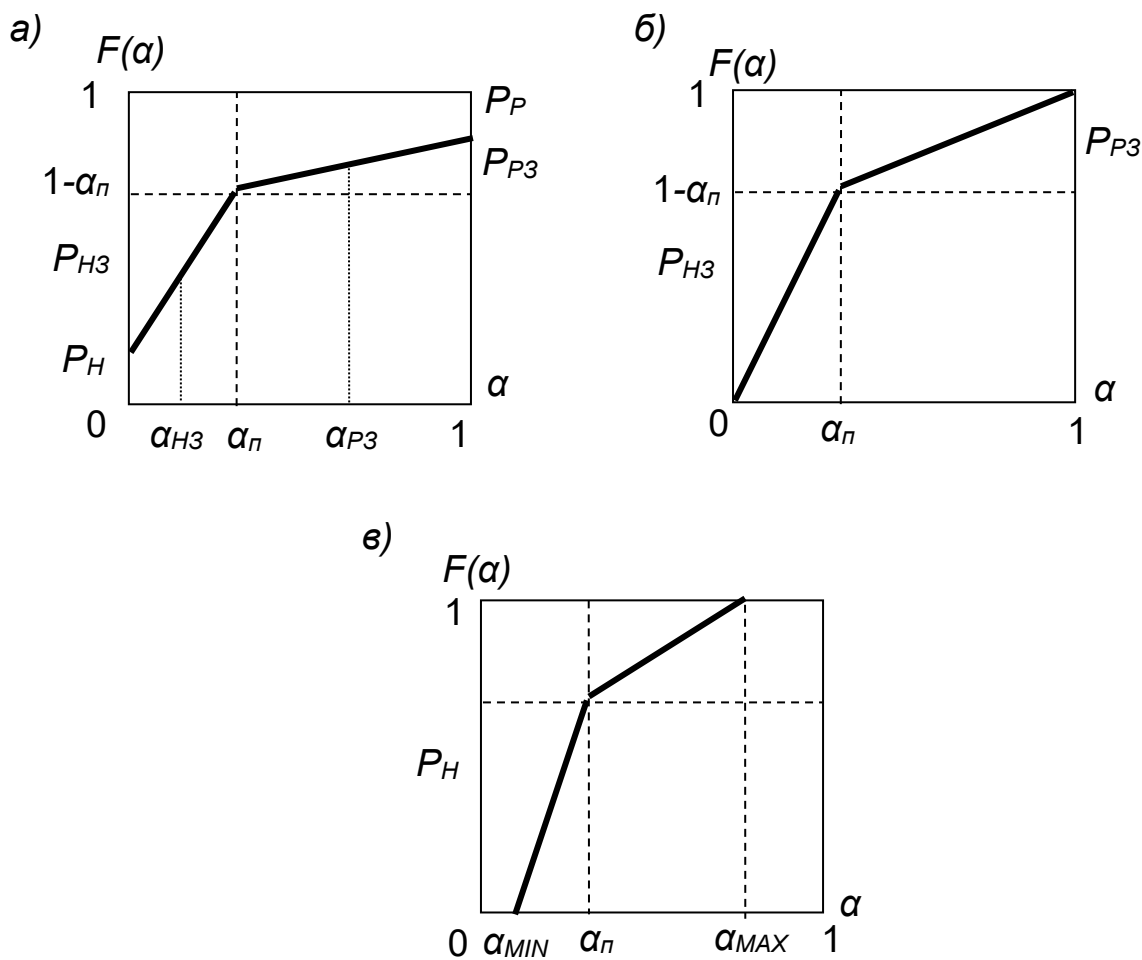


Рисунок 2.8. – Функції розподілу зростків у залежності від крупності подрібнення:

а) – $R > 0,5$

б) – $R = 0,5$

в) – $R < 0,5$

Отже, що більше зростків, то менше розкриття і якщо припустити, що відкритих фракцій немає, але вміст цінного мінералу в зростках коливається $0 \leq \alpha \leq 1$ (рис. 2.8, б), тоді:

$$P_{P3} = \alpha_п; \quad P_{H3} = 1 - \alpha_п; \quad \alpha_{MAX} = 1; \quad \alpha_{MIN} = 0;$$

$$R = 1 - \frac{1}{2} \cdot (2 - (\alpha_п + 1)) - \frac{1}{2} \cdot \alpha_п = 0,5$$

Якщо у функції розподілу фракцій немає зростків, а в наявності лише відкриті рудні та нерудні зерна, то розкриття відповідає 1 (одиниці).

Таким чином, при тонкому подрібненні та у відсутності відкритих фракцій розкриття становить $R = 0,5$.

Якщо $R < 0,5$, це означає, що немає відкритої фракції і сепарація продукту недоцільна: багатої фракції не отримаємо, а придатної у відходи немає (рис. 2.8, в).

Максимальне розкриття ($R = 1$) буде лише у тому випадку, якщо вміст будь-якого виду зростків буде нульовим. (рис. 2.7, поз.6).

При крупному подрібненні, коли зростки містять кілька елементарних циклів вкраплення L_{BK} і в наступному зростанні крупності (рис. 2.7, поз.1):

$$\alpha_{MAX} = \alpha_{MIN} = \alpha_n;$$

тоді, розкриття складає:

$$R = 1 - \frac{\alpha_n}{2 \cdot \alpha_n} \cdot (2 - (\alpha_n + \alpha_n)) - \frac{(1 - \alpha_n)}{2 \cdot (1 - \alpha_n)} \cdot (\alpha_n + \alpha_n) = 0.$$

Отже, критерій задовольняє основним принципам побудови критеріїв, позитивний, змінюється в межах $0 \leq R \leq 1$, чутливий до зміни будь-якої із збагачувальних ознак сировини.

2.7. Класифікація у спіральних класифікаторах

Для ідентифікації технологічних апаратів будь-якого типу достатньо зробити одиночне випробування в типовому режимі роботи:

взяти проби на вході та виходах, а потім, після їх обробки, провести математичні дії з отримання необхідних кривих.

Для розділення в гідроциклонах операція ідентифікації нічим не відрізняється від викладеного раніше алгоритму.

Якщо немає можливості експериментально отримати сепараційну характеристику, то її необхідно орієнтовно визначити за довідковими даними, що можна зробити, за наступним алгоритмом.

Згідно довідника зі збагачення руд знаходимо усереднені функції розподілу частинок за крупністю у початковому потоку класифікатора $F_{ПК}(d)$, та в його продуктах розділення: зливі $F_{ЗК}(d)$ і пісках $F_{ПСК}(d)$. Всі ці функції складаються у вигляді зростаючих кривих в інтервалі.

$$F_i(0) = 0; \quad 0 < F_i(d) \leq F_i(d_{MAX}); \quad F_i(d_{MAX}) = 1.$$

Розбиваємо весь діапазон зміни крупності $0 < d \leq d_{MAX}$ на інтервали Δd . Оскільки зміна крупності в збагаченні нерівномірна, а збільшується від нуля з коефіцієнтом $\sqrt{3}$, то шкалу крупностей приймаємо стандартну табл. 2.11.

Таблиця 2.11. – Стандартна шкала крупностей

d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
мм	0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	

При цих значеннях аргументу відмічаємо відповідні значення функції, та отримуємо (табл. 2.12).

Таблиця 2.12. – Значення аргументу за стандартною шкалою крупностей

d	0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0
$F_{ПК}(d)$	0	$F_{ПК1}$	$F_{ПК2}$	$F_{ПК3}$	$F_{ПК4}$	$F_{ПК5}$	$F_{ПК6}$	$F_{ПК7}$	$F_{ПК8}$
$F_{ЗК}(d)$	0	$F_{ЗК1}$	$F_{ЗК2}$	$F_{ЗК3}$	$F_{ЗК4}$	...	...	...	...
$F_{ПСК}(d)$	0	$F_{ПСК1}$	$F_{ПСК2}$	$F_{ПСК3}$	...	...	...	...	...

Розраховуємо збільшення $\Delta F_i = F_{i(j+1)} - F_{ij}$ кожної функції, та отримуємо таблицю збільшень (табл. 2.13).

Таблиця 2.13. – Таблиця збільшення

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8
d	0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0
$F_{ПК}$	0	$\Delta F_{ПК1}$	$\Delta F_{ПК2}$	$\Delta F_{ПК3}$	$\Delta F_{ПК4}$	...	...	$\Delta F_{ПК(n-1)}$	
$F_{ЗК}$	0	$\Delta F_{ЗК1}$	$\Delta F_{ЗК2}$	$\Delta F_{ЗК3}$	...	...	...	...	
$F_{ПСК}$	0	$\Delta F_{ПСК1}$	$\Delta F_{ПСК2}$	$\Delta F_{ПСК3}$	...	...	...	...	

Складаємо між собою, наприклад, п'ять перших значень кожної функції та маємо вміст класу, у даному разі: $p_{i(-0,2)} = \sum_{j=1}^5 \Delta F_i(d)$, тобто $p_{ПК(-0,2)}$, $p_{ЗК(-0,2)}$, $p_{ПСК(-0,2)}$, на підставі яких визначаємо вихід у злив:

$$\gamma_{ЗК} = \frac{p_{ПК(-0,2)} - p_{ПСК(-0,2)}}{p_{ЗК(-0,2)} - p_{ПСК(-0,2)}},$$

та визначаємо сепараційну характеристику:

$$P_{ЗК}(d_j) = \gamma_{ЗК} \frac{\Delta F_{ЗК}(d_j)}{\Delta F_{ПК}(d_j)}.$$

Аналогічні дії проводяться і для подрібнення, сепарації, розділення в будь-якому технологічному апараті.

2.8. Ідентифікація сепараційної характеристики у відповідності з параметрами сировини

Відомо, що при розробці технології збагачення корисної копалини не користуються типовими схемами: кожна сировина має свої особливості, від яких залежать технологічні рішення.

Модель структури рудного вкраплення можна розглядати як деяку просторову решітку, у вузлах якої перебувають зерна рудного мінералу. Руду розглянемо як двокомпонентну систему цінного мінералу і порожньої породи, співвідношення між якими визначається вмістом одного з них α_n . Характер розподілу цінного мінералу залежить від крупності вкраплення d_{BK} . Середня відстань між частинками рудного вкраплення за умови матричної будови руди, становить:

$$r_{BK} = d_{BK} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} - 1 \right).$$

Тут у чисельнику стоїть максимальний вміст цінного мінералу, при якому рудна фаза стає безперервною, а нерудна вкрапленою.

Найкраще розділення у сепараторі отримується в тому випадку, якщо між розкриттям цінного компоненту і сепараційною характеристикою спостерігається певна відповідність. Вона полягає в тому, що похідна від сепараційної характеристики $P'(\alpha)$ у точці її перегину α_n і показник розкриття R пов'язані співвідношенням:

$$P'(\alpha) = \frac{K}{R}.$$

Однак, це відношення при великих показниках розкриття обмежене і тому доцільно скористатися деякою корекцією його як:

$$P'(\alpha) = \frac{1}{R} - 1.$$

Тут перекривається весь діапазон зміни вмісту цінного компоненту.

Відповідно до графіків на рис. 2.9 можна побудувати сепараційну характеристику, яка буде відповідати заданим вимогам і передбачати найкраще розділення підготовленої руди з відомими параметрами.

Для цього графіки на рис.2.9 розташуємо вертикально і під ними підготуємо поле для побудови сепараційної характеристики.

З точок перетину графіків функцій α_{min} і α_{max} з горизонталями при вибраних значеннях класів крупності $d_i = 1, 1', 2, 2', 3, 3', \dots$ проводимо вертикалі на підготовлене поле для характеристики $P(\alpha)$.

Відправним пунктом побудови сепараційної характеристики є горизонталь $0 - 1$ для графіків α_{min} і α_{max} . Ця горизонталь характеризує крупність де розкриття цінного мінералу повне, тобто. $R = 1$.

Мінімальне значення вмісту цінного мінералу у цьому класі крупності становить 0 , а максимальне – 1 . Показник розкриття становить:

$$R_0 = \alpha_{max\ 0} - \alpha_{min\ 0} = 1 - 0 = 1.$$

Відповідно до цього показника, похідна сепараційної характеристики в цій точці складе:

$$P'(\alpha) = \frac{1}{R} - 1 = \frac{1}{1} - 1 = 0.$$

Похідна в цьому інтервалі нульова, отже, проводимо горизонтальний відрізок $0 - 11$ (рис. 2.9).

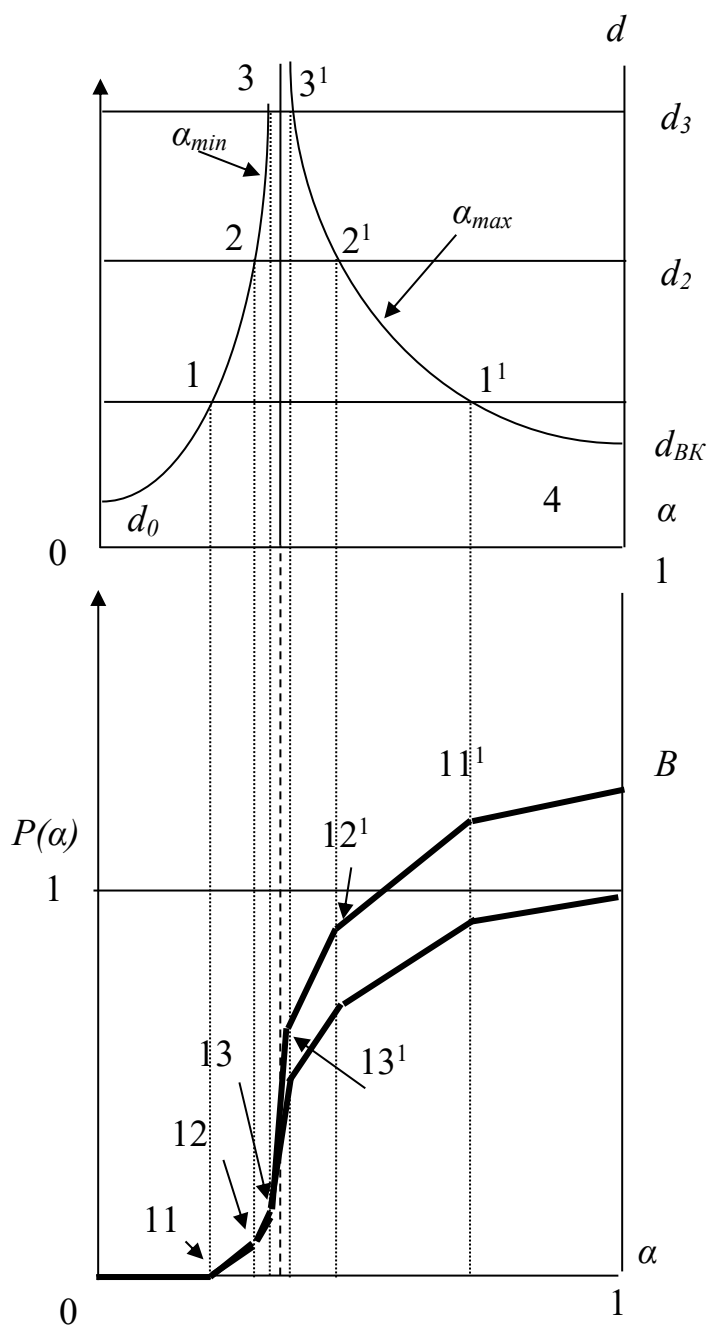


Рисунок 2.9. – Схема до побудови сепараційної характеристики

Переходимо до класу крупності d_1 на рис. 2.9. Точки 1 і 1¹ визначають значення, α_{min1} і α_{max1} на підставі яких знаходимо $R_1 = \alpha_{MAX} - \alpha_{MIN}$, а потім $P_1^1(\alpha) = \frac{1}{R_1} - 1 = tg\varphi$. Відповідно до значення похідної визначаємо кут нахилу дотичної φ_1 на цьому відрізку і проводимо відрізок 11-12 під кутом φ_1 .

Переходимо до класу крупності d_2 . Виконуємо всі дії з визначення кута нахилу дотичної і проводимо відрізок 12-13. Так чинимо до тих пір, поки ламана лінія досягне ділянки, що відповідає середньому вмісту цінного мінералу в продукті, що розділяється.

Наступну побудову ведемо виходячи з вже існуючих значень кутів нахилу дотичних. Так відрізок 13^1-12^1 проводиться під таким же кутом як відрізок 12-13; відрізок 12^1-11^1 – під кутом відрізка 11-12.

Останній відрізок 11^1-B проводиться під кутом, який обчислюють на підставі показників, які знаходять для класу d_{BK} крупності.

У результаті виходить ламана лінія з нульовими початковими умовами, а кінцеве значення відповідатиме деякому значенню $B \neq 1$. Тож після побудови нормуємо отриману характеристику, тобто. поділимо всі ординати ламаної лінії на кінцеве значення B . Отримуємо сепараційну характеристику, яка наближена до найкращих умов розділення.

3. ПРИНЦИПИ ПОГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АПАРАТІВ

3.1. Погодження параметрів сировини та подрібнення

Послідовна установка технологічних апаратів, що виконують єдине завдання, насамперед передбачає узгодження продуктивності. Так, розділовий апарат зменшує витрату продуктів за своїми виходами, тому наступні апарати повинні бути з меншою продуктивністю. Крім того, номінальна продуктивність апарату передбачає, що показники якості вихідних потоків не виходять за допустимі межі. Звідси випливає, що узгодження апаратів означає в математичному плані узгодження їх операторів перетворення, найбільш зручними є системні характеристики. Вони містять мінімальну кількість параметрів і тому їхня ідентифікація є найменше громіздкою. Також вони включають параметри, які повністю характеризують об'єкт, тобто це імовірність подій, пов'язаних з переробкою сировини. Розглянемо основні процеси, що застосовуються в збагаченні корисних копалин.

Основний процес – підготовчий. Це дроблення та подрібнення. Вони роз'єднують цінний мінерал і породу, які містять гірничу масу. Основною характеристикою цих процесів є гранулометричний склад. Це функція розподілу частинок за крупністю $F(d)$. Для того щоб ідентифікувати подрібнення, необхідно порівнювати початкову (вхідну) $F_{BX}(d)$ та вихідну $F_{ВИХ}(d)$ функції. Позитивно зарекомендував себе спосіб відношення цих величин: $A(d) = \frac{F_{ВИХ}(d)}{F_{BX}(d)}$, що є подрібнювальною характеристикою, типовий вигляд якої зображений на рис. 3.1.

Вона має характерні точки. Вміст класів крупності $d > d_2$ зменшується, а крупності на виході млина $d < d_2$ збільшуються. Частинок, розміром $d < d_3$ на виході млина немає. Точка d_1 відповідає

найбільшому вмісту даного класу крупності. За цими трьома точками має сенс узгоджувати подрібнення з параметрами корисної копалини, яке буде перероблятися даним апаратом.

Корисну копалину, яка може механічно збагачуватися, характеризують текстурно-структурними ознаками. Текстура може бути скарною або прошарковою. У будь-якому випадку вона повністю характеризується розміром, потужністю, зосередженням цінного мінералу l_P , яке описується функцією розподілу $F(l_P)$. У цих зосередженнях вміст цінного мінералу позначимо як α_P . Порода, що вміщує цінний мінерал або нерудні прошарки також характеризуються вмістом цінного мінералу α_H та його розміром l_H .

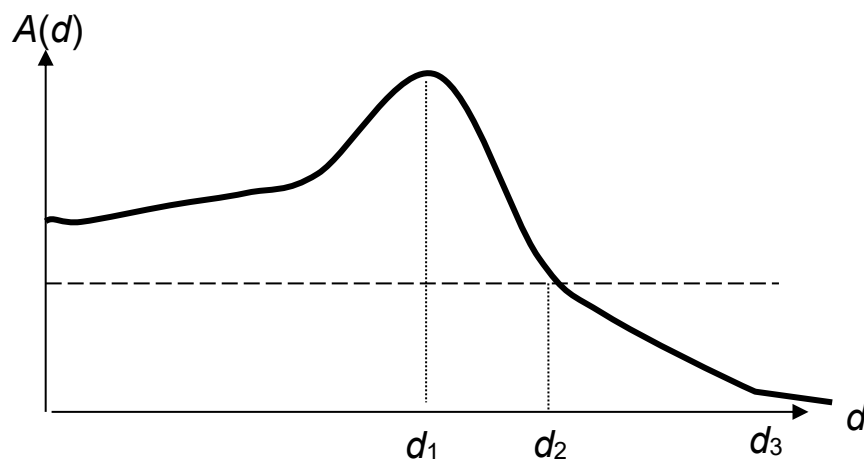


Рисунок 3.1. – Типова характеристика подрібнення

Середній вміст цінного мінералу визначиться як:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_{l_P} \cdot l_P + \alpha_{l_H} \cdot l_H}{l_P + l_H}.$$

Ці концентрації цінного мінералу розкриваються дробленням.

Структура зосередження цінного мінералу характеризується вкрапленням d_{BK} , яке описується функцією розподілу $F(d_{BK})$. Вкраплення

значно менше розміру прошарків і тому його розкриття здійснюється подрібненням. Розкриття буде відчутним, якщо величина d_1 буде меншою за текстурні l_p (для дроблення) або структурні d_{BK} (для подрібнення) ознак. Такі умови і будуть представляти узгодження параметрів підготовки з параметрами корисних копалин, якщо подальша переробка корисних копалин полягає у збільшенні його якісних показників.

Проведені міркування стосуються вибору параметрів, що забезпечують найкраще використання вже вибраного способу підготовки. Розглянемо далі розділення за крупністю. Воно носить найчастіше допоміжний характер, тому його відносять до підготовчих операцій. Тим паче, що розділення за крупністю пов'язані з подрібненням. Оскільки існує послідовне з'єднання, то і апарати також необхідно узгоджувати.

Припустимо, що маємо сепараційну характеристику класифікатору і подрібнювальну характеристику млина. Класифікатор повинен виділяти готовий клас. Це такий клас, у якому можуть бути відкриті рудні зерна, тобто. клас крупності $d < d_{BK}$. Отже, сепараційна характеристика повинна своєю точкою перегину узгоджуватися з вкрапленням.

Розкритий певною мірою цінний мінерал характеризується функцією розподілу частинок $F(\alpha)$ за вмістом цінного компонента. Ця функція також має точку перегину з абсцисою. Частинки із $\alpha > \alpha_n$ складають багату фракцію, а ті у яких $\alpha < \alpha_n$ – бідну. Таким чином, точка α_n є дуже характерною і умови узгодження повинні бути пов'язані із нею.

Загальний принцип узгодження технологічних процесів полягає у визначенні характерних точок функцій розподілу, а потім на основі мети, яку буде виконувати технологія розташовувати їх (процеси) один щодо одного певним чином. Конкретні рекомендації можуть бути дані у разі, якщо чисельно сформульовані вимоги до процесів.

3.2. Узгодження характеристики підготовки та розділення при збагаченні сировини

Наскільки унікальне кожне родовище корисної копалини, настільки унікальними повинні бути і технологічні апарати для збагачення сировини з цього родовища, особливо розділові. Ця ідея важлива у збагаченні слабomagнітних мінералів, які недостатньо характеризувати одним (середнім) значенням розділової ознаки.

Потік частинок цінного мінералу, що йде на розділення, характеризується функцією розподілу розділової ознаки $f(x)$ із широким діапазоном зміни величини. Тому сепаратор повинен бути досить чутливим до всіх значень x від x_{min} до x_{max} і узгоджувати слід не число, а цілу функцію. Звичайно, їй повинна відповідати інша функція, яка властива апарату. Такими функціями є: функція розкриття $F(\alpha)$ (крива збагачуваності, функція розподілу зростків) і функція, що відображає закономірності розділення (сепараційна характеристика $P(\alpha)$) (рис. 3.2).

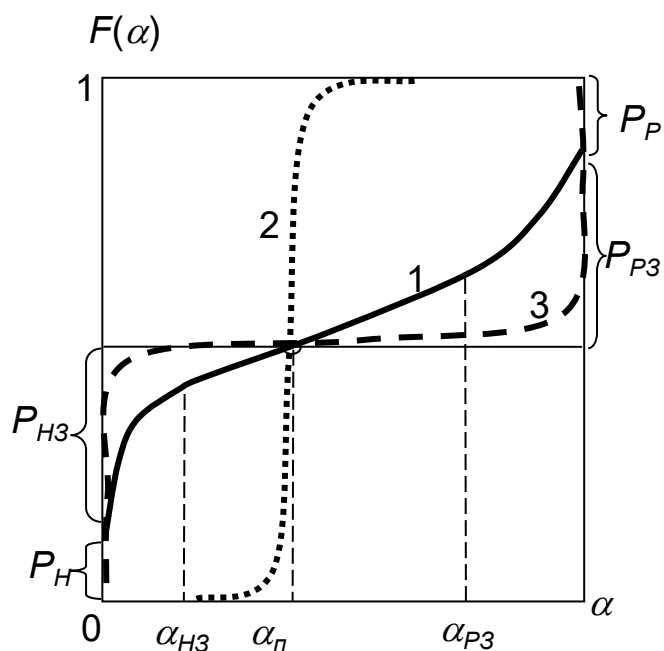


Рисунок 3.2. – Інтегральна функція розподілу зростків

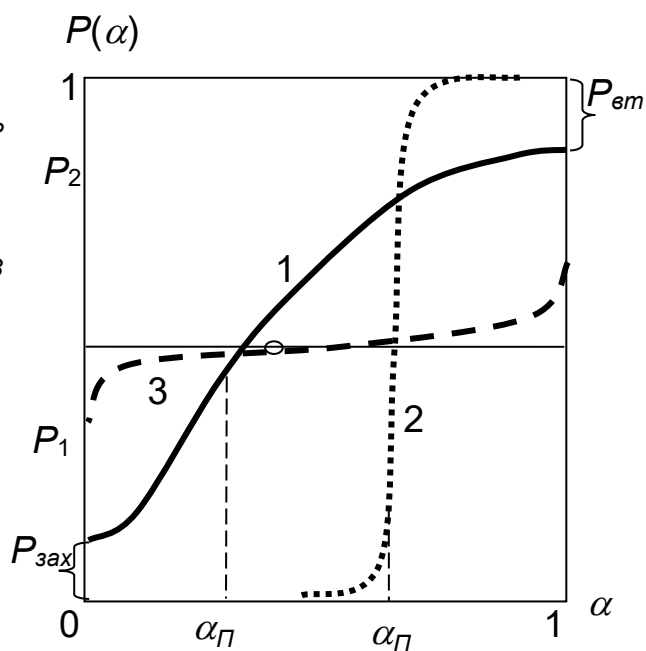


Рисунок 3.3. – Загальний вигляд сепараційної характеристики

Функція розкриття найчастіше має вигляд, як наведено на рис. 3.2, графік 1 (диференційна функція від неї $f(\alpha) = dF(\alpha)/d\alpha$, і вона достатньо ідентифікується такими показниками розкриття, як:

- вміст відкритих фракцій рудних P_P та нерудних P_H частинок;
- вміст фракцій зростків багатих P_{P3} , та бідних P_{H3} .

Залежно від рівня розкриття R функція змінює своє становище і навіть структуру. Так, коли $R \rightarrow 0$ сировина повністю не розкрита, то функція $F(\alpha)$ перетворюється на ступінчасту зі стрибком у точці α_{Π} (рис. 3.2, графік 2), а коли $R \rightarrow 1$ сировина повністю розкрита, то зростків немає, і функція $F(\alpha)$ має два стрибки у точці $\alpha = 0$ ($F(\alpha) = P_H + P_{H3}$) та у точці $\alpha = 1$ ($\Delta F(\alpha) = P_P + P_{P3}$). Сепараційна характеристика $P(\alpha)$ виду 1 (рис. 3.3) також має одну точку перегину α_{Π} , положення якої заздалегідь не визначено. Функція $P(\alpha)$ має характерні точки розриву першого роду: у точці $\alpha = 0$ величина $P_{зах}$ дає характеристику захоплення нерудних частинок в збагачений продукт, а точці $\alpha = 1$ величина $P_{вт}$ дає характеристику втрат цінного відкритого компонента в збідненому продукті. Залежно від конструкції апарату характеристика $P(\alpha)$ змінює своє положення та структуру. Так, якщо вона має вигляд графіку 2 (рис. 3.3), то це означає, що сепаратор ідеально відокремлює частинки з $\alpha > \alpha_{\Pi}$ від частинок з $\alpha < \alpha_{\Pi}$. У випадку, коли $P(\alpha)$ має вигляд графіку 3 (рис. 3.3), то структура функції $P(\alpha)$ змінена, поділ відбувається не за роздільною ознакою, а механічно на два потоки щодо $P_1: P_2$.

Таким чином, основними числовими характеристиками сепараційної функції $P(\alpha)$ є: $P_{зах}$, $P_{вт}$, та похідна у точці перегину α_{Π} . Використовувати сепаратор з характеристикою $P(\alpha)$, близькою до виду графіку 3, не має сенсу, і його не розглядаємо. Зазначимо, якщо співвідношення між $F(\alpha)$ та $P(\alpha)$ таке як на рис. 3.2 (графік 2) та 3.3 (графік 2), то збагаченого продукту не буде. Цей факт наводить на

думку, що абсциси точок перегину функцій $F(\alpha)$ і $P(\alpha)$ повинні збігатися, тобто. $\alpha_{\Pi} = \alpha_{\Pi}$.

Для теорії збагачення корисних копалин ці дві характеристики дозволяють визначати будь-які показники розділення, наприклад:

– вихід збагаченого продукту:

$$\gamma_{\beta} = \int_0^1 P(\alpha) \cdot f(\alpha) d(\alpha);$$

– вихід збідненого продукту:

$$\gamma_v = \int_0^1 (1 - P(\alpha)) \cdot f(\alpha) d(\alpha);$$

– вміст цінного мінералу в збагаченому продукті:

$$\beta = \frac{1}{\gamma_{\beta}} \int_0^1 \alpha \cdot P(\alpha) \cdot f(\alpha) d(\alpha);$$

– вміст цінного мінералу в збідненому продукті:

$$v = \frac{1}{\gamma_v} \int_0^1 \alpha \cdot (1 - P(\alpha)) \cdot f(\alpha) d(\alpha).$$

Розглянемо зв'язок між $P(\alpha)$ та $F(\alpha)$. Змінюватимемо $F(\alpha)$ і підбиратимемо для неї відповідну функцію $P(\alpha)$ залежно від вихідних показників.

Припустимо, $F(\alpha)$ має вигляд графіку 3 (рис. 3.2), а це означає, що розкриття близько до одиниці, функція майже на всьому діапазоні зміни α нульова, і тому добуток $P(\alpha) \cdot f(\alpha)$ також дорівнює нулю. І лише у точках $\alpha = 0$ та $\alpha = 1$ будуть ненульові значення добутків $P(\alpha) \cdot f(\alpha)$. Отже, коли $R \rightarrow 1$ вид характеристики $P(\alpha)$ не має значення і важливі лише $P(0)$ та

$P(1)$. Коли розкриття $R \neq 0$, то $F(\alpha)$ має похідну $f(\alpha_n)$ і існують частинки із вмістом цінного компонента $\alpha_{P3} > \alpha_n$ та $\alpha_{H3} < \alpha_n$, тому збагачення стає можливим. Для цього необхідно, щоб похідні від функції розподілу зростків і від сепараційної характеристики мали співвідношення $f(\alpha_n) > F'(\alpha_n)$. І тут вже менш істотними стають значення P_{em} і $P_{зах}$. Отже, що гірше розкриття, краще повинна бути функція $P(\alpha)$, тобто. тим більше має бути похідна $P'(\alpha_n)$ і за $R \rightarrow 1$ $P'(\alpha_n) \rightarrow \infty$.

Крім того, для помітного розділення необхідно також, щоб $\alpha_n = \alpha_n$.

Отже, головним для узгодження характеристики підготовки та розділення має бути умова:

$$P'(\alpha_n = \alpha_n) = \frac{1}{R}.$$

3.3. Оцінка досконалості технології розділення

Збагачення корисних копалин передбачає покращення якісних характеристик сировини, головною з яких є вміст цінного компонента α_n . Якщо у початковій сировині вміст цінного мінералу α_n , то, після збагачення, очікуваний вміст буде становити:

$$\beta = \alpha_n + K_C \cdot R \cdot (1 - \alpha_n), \quad (3.1)$$

де R – показник розкриття цінного компонента; K_C – коефіцієнт досконалості технології розділення. Тепер залишається ідентифікувати ці два показники та можна прогнозувати показники збагачення, які очікуються.

Показник K_C має бути пов'язаний із характеристиками сепараторів. З цією метою можна його визначити через інтегральні показники

розділення β і ν , але тоді буде потрібен ще розрахунок розкриття, тому спробуємо визначитися за допомогою сепараційних характеристик.

Досконале розділення буде в тому випадку, якщо сепараційна характеристика має ступінчастий вигляд. Ніякого розділення не буде, якщо сепараційна характеристика набуває горизонтального положення. Причому відрізок на осі ординат відповідає частині потоку, яку утворює збіднений продукт. Якщо ж конструкція апарату така, що у разі відсутності розділення і потоку немає, то сепараційна характеристика співпадатиме з віссю абсцис або ж відстояти від неї на одиницю. У магнітному сепараторі, наприклад, якщо магнітна фракція не витягується, то весь початковий потік йде в хвості, тобто. $P(\alpha) = 0$. Зазвичай сепараційна характеристика займає проміжне положення.

Поняття «досконалість технології» має виражатися числом. Бажано, щоб у разі досконалого розділення це число дорівнювало одиниці, а у разі не розділення – нулю.

Вся площа простору координат $P(\alpha) \sim \alpha$ (рис. 3.4, а) $S = 1$. Коли реальна сепараційна характеристика збігається з ідеальною, то площа між ними дорівнює нулю. Це говорить про те, що поняття «досконалість технології» може бути виражене через площу, яка є частиною простору, розміщеного між ідеальною $P(\alpha)$ і реальною $P_P(\alpha)$ сепараційними характеристиками (заштриховано) (рис. 3.4, б).

Положення функції $P(\alpha)$ щодо осі абсцис визначається умовами узгодження апарату та сировини, тобто. її стрибок збігається зі значенням вмісту цінного компонента у початковій сировині α_n . Тоді:

$$S = \int_0^{\alpha_n} (P_P(\alpha) - P(\alpha)) d(\alpha) + \int_{\alpha_n}^1 (P(\alpha) - P_P(\alpha)) d(\alpha).$$

Так як: $P(\alpha < \alpha_n) = 0$, та $P(\alpha > \alpha_n) = 1$.

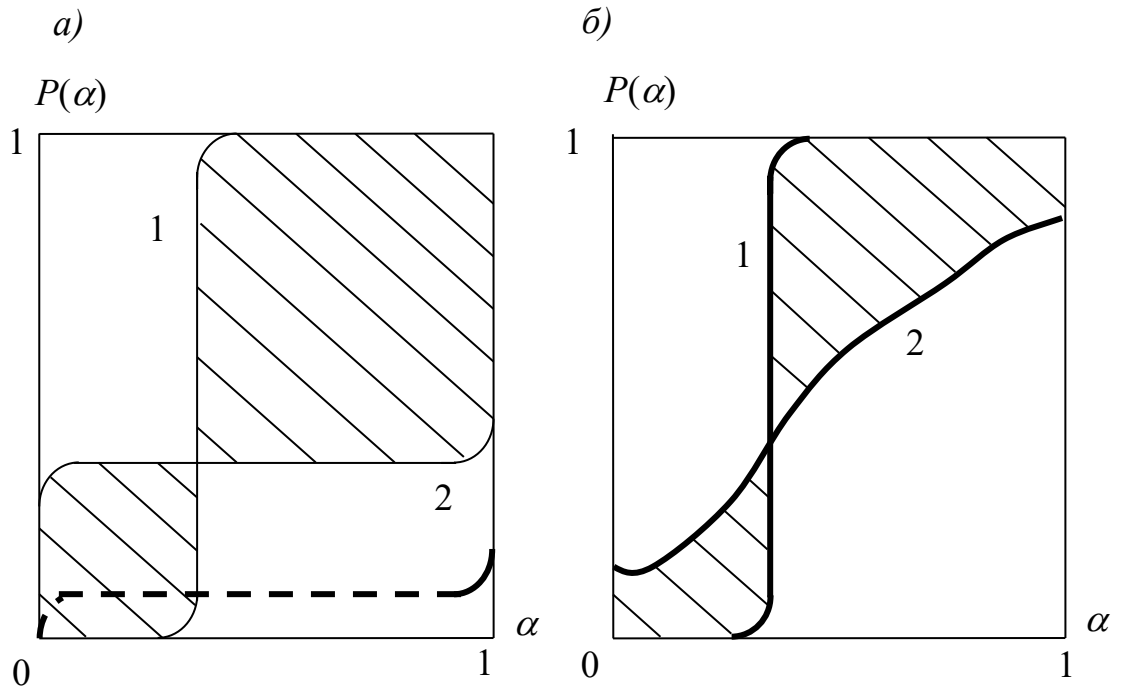


Рисунок 3.4. – Можливі види сепараційних характеристик

1. – ідеальна характеристика;
2. – реальна характеристика

То маємо:

$$S = \int_0^{\alpha_n} P_P(\alpha) d(\alpha) + \int_{\alpha_n}^1 (1 - P_P(\alpha)) d(\alpha),$$

а максимальне значення площини:

$$S \int_{\alpha_n}^1 (1 - P_P(\alpha)) d(\alpha)_{\Pi_{max}}.$$

На цій підставі можна записати вираз для коефіцієнта досконалості технології:

$$K_C = 1 - \frac{S}{S_{max}} = 1 - \frac{S}{1 - \alpha_n}.$$

Якщо апарат не виконує розділення, то він має сепараційну характеристику $P(\alpha_n) = 1$, що означає:

$$S_{max} = \int_0^{\alpha_n} P_P(\alpha) d\alpha = \alpha_n < 1,$$

а
$$S = \int_0^{\alpha_n} (1 - P(\alpha)) d(\alpha) + \int_{\alpha_n}^1 P_P(\alpha) d(\alpha),$$

тоді:
$$K_C = 1 - \frac{S}{S_{max}} = 1 - \frac{S}{\alpha_n}.$$

У виразі (3.1) у явному вигляді немає показників збідненого продукту. Однак два коефіцієнти K_C та R є інтегральними показниками властивостей розділення та розкриття. Отже, у виразі (3.1) є всі необхідні відомості для несуперечливої оцінки якості концентрату, що очікується. Вирішуючи його щодо K_C , отримаємо:

$$K_C = \frac{\beta - \alpha_n}{(1 - \alpha_n) \cdot R}.$$

Величина β оцінюється експериментально, або попередньо розраховується.

Оцінимо тепер K_C з виразу (3.1), а потім на підставі експериментальних даних при відомому розкритті розрахуємо коефіцієнт досконалості технології розділення.

Задаємося функцією розкриття $F(\alpha)$ та сепараційною характеристикою $P(\alpha)$ (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. – Функції розкриття $F(\alpha)$ та сепараційна характеристика $P(\alpha)$

α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1.0
$P(\alpha)$	0,06	0,14	0,6	0,9	0,95	0,98
$\Delta F(\alpha)$	0,2	0,27	0,15	0,09	0,09	0,2
$F(\alpha)$	0,2	0,47	0,62	0,71	0,8	1,0

На площині побудуємо криві сепараційної характеристики та ламану функцією розкриття, а також виконаємо чисельне інтегрування (методом трапецій). При цьому отримаємо площу між сепараційними характеристиками:

$$S = \frac{0,06 + 0,14}{2} \cdot 0,125 + \frac{0,14 + 0,4}{2} \cdot 0,125 + \frac{0,4 + 0,6}{2} \cdot 0,125 + \\ + \frac{0,4 + 0,25}{2} \cdot 0,125 + \frac{0,25 + 0,08}{2} \cdot 0,25 + \frac{0,08 + 0,02}{2} \cdot 0,25 = 0,19;$$

розкриття: $R = \alpha_P - \alpha_H = 0,826 - 0,125 = 0,7;$

коефіцієнт досконалості технології: $K_C = 1 - \frac{0,19}{1-0,375} = 0,7;$

якість концентрату, що очікуємо:

$$\beta = 0,375 + 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,625 = 0,68.$$

Розрахуємо якість концентрату, що очікується, класичним способом (табл. 3.2).

І згідно отриманим даним маємо якість концентрату:

$$\beta = \frac{0,353}{0,502} = 0,7.$$

Таблиця 3.2. – Розрахунки показників сепарації

α	$P(\alpha)$	$\Delta F(\alpha)$	$\Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha)$	$\Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha) \cdot \alpha$
1	2	3	4	5
0,0	0,06	0,2	0,012	0
0,125	0,14	0,27	0,0378	0,0047
0,375	0,6	0,15	0,09	0,0337
0,625	0,9	0,09	0,081	0,05
0,875	0,95	0,09	0,0855	0,075
1,0	0,98	0,2	0,196	0,196
Сума			0,502	0,353

А коефіцієнт досконалості технології складе:

$$K_C = \frac{0,7 - 0,375}{0,7 \cdot (1 - 0,375)} = 0,74.$$

Розбіжність між коефіцієнтами, які визначалися за двома різними методиками, несуттєва, тому методика розрахунку за допомогою сепараційних характеристик є прийнятною.

Ступінь досконалості технології приймемо наступними:

- технологія досконала, коли $1 < K_C > 0,7$;
- середнього рівня, якщо $0,75 < K_C > 0,5$
- недосконала: $K_C < 0,5$.

Нині критеріїв ефективності розділення, які відповідають усім переліченим вимогам, немає серед великої кількості, що запропоновані. Тільки для збагачення корисних копалин їх кілька десятків зокрема, особливо багато їх застосовується з метою оцінки збагачуваності вугілля. Є кілька узагальнюючих оглядів, що критично розглядають старі та пропонують нові критерії на основі найрізноманітніших технологічних, економічних та інших міркувань. Очевидно, що найбільші вимоги задовольняють економічні критерії, хоча в багатьох випадках немає достатніх даних для їх розрахунку, оскільки неможливо встановити ціни

на всі проміжні продукти, що одержуються в тій чи іншій виробничій операції.

У збагаченні корисних копалин залежності вихідних показників від вхідних мають монотонний характер, і тому підготовка сировини до розділення або розділення не може бути оцінено з оптимального боку. Більшість критеріїв пов'язують показники розділення та вихідної сировини за результатами підготовки та самого розділення. Це критерії ефективності збагачувального процесу, який, як відомо, включає, що мінімум, два процеси: підготовку (подрібнення) та розділення (сепарацію). Окремо оцінити ефективність подрібнення або сепарації неможливо. Разом з тим, коли ведеться синтез технологічної схеми збагачення, така оцінка необхідна для того, щоб послідовно оцінювати прийняті рішення. Хоча, оптимізація на кожному кроці завжди призводить до оптимізації всього процесу вибору технологічних зв'язків загалом (принцип Беллмана). Все рівно необхідно оцінювати оптимальність усіх прийнятих рішень до кроку, у якому ведеться дослідження.

Найбільш широке поширення набув критерій Ханкока-Луйкена, який оцінює розділення цінного мінералу в збагаченому (β) та в збідненому (γ) продукті, і порівнює його вміст з початковим (α_n), тобто, все-таки вилучення. Так ефективність збагачувального процесу визначається як різницю вилучення цінного мінералу в збагачений продукт та вилученням у збіднений продукт:

$$E = \frac{\beta \cdot \gamma}{\alpha_n} - \frac{\gamma \cdot (1 - \beta)}{1 - \alpha_n} = \frac{\gamma \cdot (\beta - \alpha_n)}{\alpha_n \cdot (1 - \alpha_n)}.$$

Задавшись деякою функцією розподілу зростків та сепараційними характеристиками, отримаємо тоді максимум критерію, коли абсциса точки перегину сепараційної характеристики, буде збігатися з абсцисою

вмісту цінного мінералу у початковій сировині. Якщо сепараційна характеристика буде переміщена праворуч, або ліворуч, значення критерію зменшиться.

Якщо ж сепараційна характеристика набуде вигляду ступінчастої функції, при її зміщенні буде спостерігатися таке ж явища, при цьому максимумами критерію ефективності дещо збільшиться. Однак, граничного значення $E = 1$ не буде отримано доти, доки у початковому продукті будуть зростки. Граничне значення критерію ефективності збагачення Ханкока-Луйкена ($E = 1$) отримується за умови, що початковий продукт розкритий, а сепараційна характеристика відповідає ідеальній сепарації.

Це істотно тому, що цей критерій включає відношення рівня сепарації, яке досягнуто в даному сепараторі ($\beta - \alpha_n$), та теоретичне значення ($1 - \alpha_n$).

Якщо ж оцінювати ефективність тільки сепарації, то при будь-якій підготовці початкового продукту та при ідеальній сепарації теоретично граничне значення якості збагаченого продукту буде досить далеким від 1 ($\beta \ll 1$), та й теоретичне значення виходу та якості не співпадатиме з дійсним розділенням.

Отже, якщо оцінювати ефективність сепараційного процесу і не плутати сепарацію зі збагаченням, необхідно мати функцію розподілу зростків $F(\alpha)$, сепараційну характеристику ідеального розділення і сепараційну характеристику реального сепаратора, ефективність якого оцінюється. Причому для сепаратора зі ступінчастою сепараційною характеристикою немає сенсу включати в критерій ні початковий вміст цінного мінералу, ні його вміст в збідненому продукті, ні виходів, оскільки положення сепараційної характеристики щодо осі абсцис задається дослідником.

Допустимо задана характеристика розподілу зростків $F(\alpha)$, ідеальна сепараційна характеристика $P(\alpha)$, сепараційна характеристика

деякого сепаратора $P_1(\alpha)$, причому остання має абсцису точки перегину відповідну стрибку характеристики $P(\alpha)$ (табл. 3.3).

Таблиця 3.3. – Розрахунок показників розділення

α	$P(\alpha)$	$P_1(\alpha)$	$F(\alpha)$	$\Delta F(\alpha)$	$P(\alpha) \cdot \Delta F(\alpha)$	$P_1(\alpha) \cdot \Delta F(\alpha)$	$P(\alpha) \cdot \Delta F(\alpha) \alpha$	$P_1(\alpha) \cdot \Delta F(\alpha) \alpha$	$\alpha_n = \alpha \cdot \Delta F(\alpha)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0,05	0,15	0,15	0	0,0075	0	0	0
0,125	0	0,1	0,3	0,15	0	0,015	0	0,002	0,0187
0,375	0	0,4	0,6	0,3	0	0,12	0	0,045	0,112
0,625	1	0,7	0,75	0,15	0,15	0,105	0,094	0,065	0,094
0,875	1	0,9	0,9	0,15	0,15	0,135	0,131	0,12	0,13
1,0	1	0,95	1	0,1	0,1	0,095	0,1	0,095	0,12
Сума					0,4	0,447	0,325	0,327	0,456

Визначаємо вміст корисного компонента в збагаченому продукті при використанні ідеальної сепараційної характеристики:

$$\beta_2 = \frac{\sum \Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha) \cdot \alpha}{\sum \Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha)} = \frac{0,325}{0,4} = 0,838.$$

Визначаємо вміст корисного компонента в збагаченому продукті при використанні реальної сепараційної характеристики:

$$\beta_1 = \frac{\sum \Delta F(\alpha) \cdot P_1(\alpha) \cdot \alpha}{\sum \Delta F(\alpha) \cdot P_1(\alpha)} = \frac{0,327}{0,477} = 0,685.$$

Тоді ефективність операції сепарації визначимо, як відношення вмісту корисного компонента:

$$E = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{0,685}{0,838} = 0,817.$$

Тоді ефективність операції сепарації визначимо, як відношення вмісту корисного компонента:

$$E = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{0,685}{0,838} = 0,817.$$

Таким чином, якщо взяти відношення якості збагаченого продукту до теоретично можливого, то отримаємо показник ефективності процесу розділення.

Методика оцінки ефективності процесу розділення наступна.

1. Маємо характеристику розподілу зростків у початковому продукті $F(\alpha)$.

2. Беремо сепараційну характеристику сепаратора, яким передбачається вести розділення у промисловості, та оцінюємо показники розділення – β_1 .

3. Беремо ступінчасту сепараційну характеристику та оцінюємо показники розділення – β_2 .

4. Оцінюємо ефективність сепарації.

Діапазон зміни критерію має бути поділений на інтервали, що характеризують: низьку ефективність, середню та високу. Такими інтервалами можуть бути:

$0 < E < 0,3$ – низька ефективність;

$0,3 < E < 0,8$ – середня;

$E > 0,8$ – висока.

Як це застосовано у кореляційному аналізі.

У разі, коли сепаратор призначений для виділення хвостів, то найкраще значення якісного показника $v = 0$. Відношення показників якості неможливе. Тоді слід брати до розгляду збагачений продукт, теоретичне значення якості якого становитиме величину:

$$\beta = \frac{P_P + P_{P3} \cdot \alpha_{P3} + P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{P_P + P_{P3} + P_{H3}}.$$

Розрахунки оцінки критерію ефективності наведені в табл.3.4.

Таблиця 3.4. – Розрахунок показників при виділенні хвостів.

α	$P(\alpha)$	$P_1(\alpha)$	$F(\alpha)$	$\Delta F(\alpha)$	$\Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha)$	$\Delta F(\alpha) \cdot P_1(\alpha)$	$\Delta F(\alpha) \cdot P(\alpha) \cdot \alpha$	$\Delta F(\alpha) \cdot P_1(\alpha) \cdot \alpha$	α_n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0,15	0,15	0,15	0	0,022	0	0	0
0,125	1	0,3	0,3	0,15	0,15	0,045	0,1875	0,006	0,019
0,375	1	0,7	0,6	0,3	0,3	0,21	0,1125	0,079	0,112
0,625	1	0,95	0,75	0,15	0,15	0,142	0,0937	0,058	0,094
0,875	1	0,98	0,9	0,15	0,15	0,147	0,1312	0,128	0,13
1,0	1	0,99	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,12
Сума					0,85	0,667	0,456	0,371	0,456

$$\beta_2 = 0,456 / 0,85 = 0,536.$$

$$\beta_1 = 0,371 / 0,667 = 0,556.$$

$$E_2 = 0,536 / 0,556 = 0,96.$$

Загальна ефективність технології розділення складе:

$$E = E_1 E_2 = 0,817 \cdot 0,96 = 0,784.$$

Спеціальні види технологій слід оцінювати запропонованим критерієм, а існуючі схеми за допомогою критерію Ханкока-Луйкена.

3.4. Синтез технології збагачення залізної руди

Першим завданням синтезу є визначення необхідної крупності подрібнення руди для досягнення заданої якості концентрату.

Вихідні дані:

- розмір вкращення – $d_{BK} = 0,2$ мм;
- подрібнюваність – середня;
- вміст цінного мінералу – $\alpha_n = 0,4$;
- задана якість концентрату $\beta_{K3} = 0,95$ ($Fe = 0,684$);

– втрати цінного мінералу в хвостах $v_{\text{ДОП}} = 0,05$ ($Fe = 0,035$).

У першому розділі запропонована методика, що дозволяє прогнозувати якість концентрату β , якщо відомо вміст цінного мінералу у початковій руді α_n , показник розкриття R і показник досконалості технології розділення K_C тобто:

$$\beta_K = \alpha_n + K_C \cdot R \cdot (1 - \alpha_n).$$

Коефіцієнти K_C і R залежать від технології переробки корисної копалини і спільно визначають труднощі збагачення корисної копалини. Коефіцієнт K_C визначає досконалість розділення, тому пов'язаний з видом сепараційних характеристик апаратів, що застосовуються в технології. На базі вимог до якості концентрату та втрат цінного мінералу у хвостах можна записати

$$\gamma_T = \frac{\alpha_n - v_{\text{ХДОП}}}{\beta_{K3} - v_{\text{ХДОП}}}.$$

Показник розкриття може бути виражений через параметри розкриття: відкриті рудні P_P і нерудні зерна P_H , багаті P_{P3} і бідні P_{H3} зростки [2]:

$$R = \frac{P_P + P_{P3} \cdot \alpha_{P3}}{P_P + P_{P3}} - \frac{P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{P_H + P_{H3}} = \alpha_P - \alpha_H \quad (3.2)$$

де α_{H3} – вміст корисного компонента в бідних зростках ($\alpha_{H3} = \frac{\alpha_n}{2}$); α_{P3} – вміст корисного компонента в багатих зростках ($\alpha_{P3} = \frac{1 + \alpha_n}{2}$); α_P – вміст корисного компонента в рудній частині, що складається із багатих зростків та розкритих рудних частинок; α_H – вміст корисного компонента

в нерудній частині, що складається із бідних зростків та розкритих породних частинок.

За сформульованих умов розділення можна припустити, що:

$$P_P + P_{PЗ} = \gamma_T; \text{ і } P_H + P_{HЗ} = 1 - \gamma_T. \quad (3.3)$$

а також, що

$$\alpha_P = \beta_{КЗ}; \quad \text{та} \quad \alpha_H = v_{ХДОП}. \quad (3.4)$$

Використовуючи співвідношення (3.2)...(3.4), отримаємо:

$$\frac{P_{HЗ} \cdot \alpha_{HЗ}}{1 - \gamma_T} = v_{ХДОП};$$

звідки:

$$P_{HЗ} = \frac{(1 - \gamma_T) \cdot v_{ХДОП}}{\alpha_{HЗ}}. \quad (3.5)$$

На підставі вимог до якості концентрату маємо:

$$\beta_{КЗ} = \frac{P_P + P_{PЗ} \cdot \alpha_{PЗ}}{\gamma_T},$$

звідки:

$$P_P = \frac{2 \cdot \gamma_T \cdot (1 - \beta_{КЗ})}{1 + \alpha_P}. \quad (3.6)$$

Вміст відкритих фракцій становить:

$$P_P = \alpha_P - P_{PЗ}; \quad P_H = 1 - \alpha_P - P_{HЗ}.$$

Виконаємо чисельну оцінку показників розкриття цінного мінералу якщо: $\alpha_P = 0,4$; $\beta_{КЗ} = 0,95$; $v_{ХДОП} = 0,05$; $\alpha_{HЗ} = 0,2$; $\alpha_{PЗ} = 0,7$.

Показники розкриття виявилися наступними:

$$R_T = \frac{0,95-0,4}{1-0,4} = 0,917; \quad \gamma_T = \frac{0,4-0,05}{0,95-0,05} = 0,389;$$

$$P_{H3} = \frac{(1-0,389) \cdot 0,05}{0,2} = 0,153; \quad P_H = 1 - 0,389 - 0,153 = 0,458;$$

$$P_{P3} = \frac{1-0,458-0,153-0,95 \cdot 0,389}{0,3} = 0,065; \quad P_P = 0,4 - 0,065 = 0,335.$$

Розраховане за цими показниками розкриття має значення $R_T = 0,902$.

Для визначення необхідної крупності подрібнення виберемо одне з рівнянь для аналітичного розрахунку параметрів розкриття, наприклад:

$$P_P = \frac{\alpha_n}{d} \cdot \int_0^d \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{d}{d}\right) \partial d;$$

і за його допомогою визначимо середню крупність подрібнення $\bar{d}$. Для цього представимо інтегральний вираз кінцевою сумою:

$$P_P = \alpha_n \cdot \sum_{i=1}^k \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{d_{i+1}}{d}\right) - \exp\left(-\frac{d_i}{d}\right)\right);$$

$$\text{де } k = \frac{d}{d_{i+1} - d_i}.$$

Задаємося значенням середньої крупності подрібнення і розраховуємо кількість відкритих рудних зерен. Порівнюємо кількість відкритих рудних зерен з необхідним значенням, яке розраховане раніше та визначаємо необхідну крупність подрібнення руди.

Наприклад. Прийmemo значення середньої крупності вкраплення $d_{BK} = 0,2$ мм, задаємося значенням середньої крупності подрібнення і розраховуємо кількість відкритих рудних зерен.

Для середньої крупності подрібнення $\bar{d} = 0,2$ мм кількість відкритих рудних зерен становить $P_P = 0,13$;

Для $\bar{d} = 0,1$ мм – $P_P = 0,27$;

Для $\bar{d} = 0,03$ мм – $P_P = 0,33$.

Останнє значення кількості відкритих рудних зерен відповідає розв'язанню задачі.

Таким чином, необхідна крупність подрібнення руди становить 0,03 мм. При цьому вміст класу – 0,07 мм.

$$P_{-0,07} = 1 - \exp\left(-\frac{0,07}{0,03}\right) = 0,903.$$

Отже, для отримання необхідних показників якості концентрату необхідно подрібнювати руду, яка вміщує 40% цінного компонента із вкрапленням 0,2 мм до 90% класу – 0,07 мм, що відповідає показникам подрібнення для залізняку середньої збагачуваності.

3.5. Визначення структури технології

3.5.1. Синтез технологій збагачення руд зі стадіальним виділенням відкритих фракцій

Зазвичай промислові сепаратори розділяють підготовлений продукт таким чином, що вихідні показники змінюють вміст цінного мінералу в одному напрямку. Ця теза дає змогу зробити висновок, що у разі бінарного розділення в одному апараті неможливо отримати одночасно багатий збагачений продукт та бідні хвости. Для такої

суперечливої вимоги необхідне технологічне рішення чи зміна розкриття. Таким технологічним рішенням може бути схема, що зображена на рис. 3.5, у якій апарати виділення концентрату мають сепараційну характеристику вигляду 2 (рис 3.6), а виділення хвостів – вигляду 1 (рис.3.6).

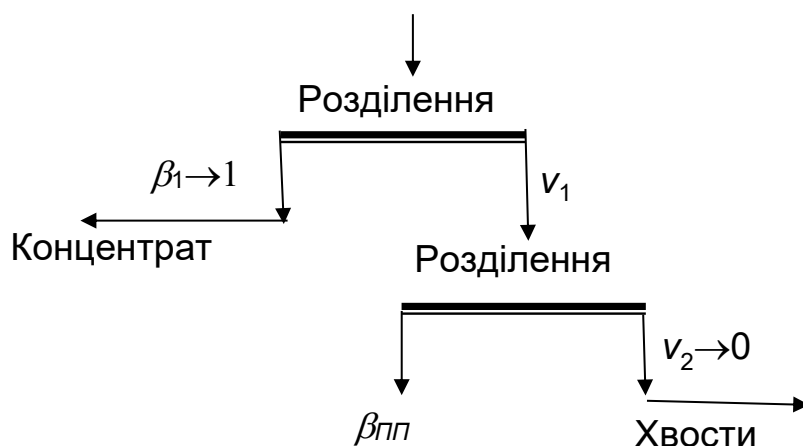


Рисунок 3.5. – Схема одночасного виділення концентрату і хвостів

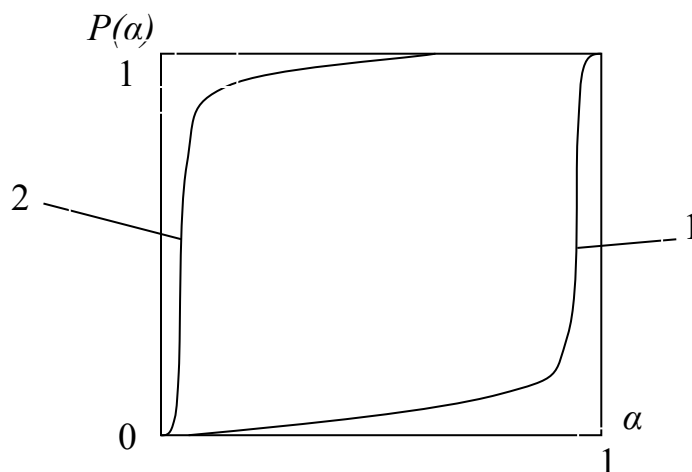


Рисунок 3.6. – Сепараційні характеристики для виділення відкритих фракцій: 1 – концентрату, 2 – хвостів

Представимо показники розкриття через один аргумент $0 \leq R \leq 1$, що називається розкриттям рудного мінералу, або просто розкриттям. З його допомогою вміст фракцій у підготовленому продукті можна виразити як:

- відкриті рудні зерна $P_P = \alpha_n \cdot R$;
- багаті зростки $P_{PЗ} = \alpha_n \cdot (1 - R)$;
- бідні зростки $P_{НЗ} = (1 - \alpha_n) \cdot (1 - R)$.

Якщо мінерал повністю розкритий ($R = 1$), то будуть тільки відкриті зерна якщо ж мінерал не розкритий ($R = 0$), то будуть зростки у кількості $P_{НЗ} = 1 - \alpha_n$ та $P_{PЗ} = \alpha_n$, що відповідає уявленню про розкриття рудного мінералу.

Підставимо показники розкриття у формулу, що дозволяє визначити якість проміжного продукту, і матимемо:

$$\beta_{ПП} = \frac{P_{PЗ} \cdot \alpha_{PЗ} + P_{НЗ} \cdot \alpha_{НЗ}}{P_{PЗ} + P_{НЗ}} = \frac{\alpha_n \cdot (1-R) \cdot \frac{1+\alpha_n}{2} + (1-\alpha_n) \cdot (1-R) \cdot \frac{\alpha_n}{2}}{\alpha_n \cdot (1-R) + (1-\alpha_n) \cdot (1-R)} = \alpha_n.$$

Таким чином, при стадіальному виділенні розкритого мінералу вихідний вміст цінного компонента за стадіями підготовки незмінний і дорівнює первинному початковому вмісту, тобто. у зростках завжди міститься така кількість цінного мінералу, скільки його було у початковому продукті.

Таке розділення можливе тільки, коли сепараційні характеристики мають ступінчастий вигляд. Такий вид недосяжний і тому деяка частина зростків переходить в концентрат і хвости.

Визначимо, які граничні значення вмісту цінного мінералу можуть бути в зростках, що можуть бути вилучені в концентрат і які втрати допустимі в хвостах.

Для цього приймемо деяку характеристику розкриття (рис.3.7) та приймемо також ідеальне виділення граничних частинок. Частинки, у

яких $\alpha \geq \alpha_{ГРХ}$, потрапляють у концентрат, а з $\alpha \leq \alpha_{ГРХ}$ – у хвости. З метою визначення граничних значень вмісту цінного мінералу в частинках, що витягуються в цільовий продукт (концентрат), знайдемо рівняння відрізків прямих функції розподілу зростків.

Для бідних зростків рівняння має вигляд (рис. 3.7):

$$\frac{P_{H3}}{\alpha_n} = \frac{P_{H3y} - P_H}{\alpha} .$$

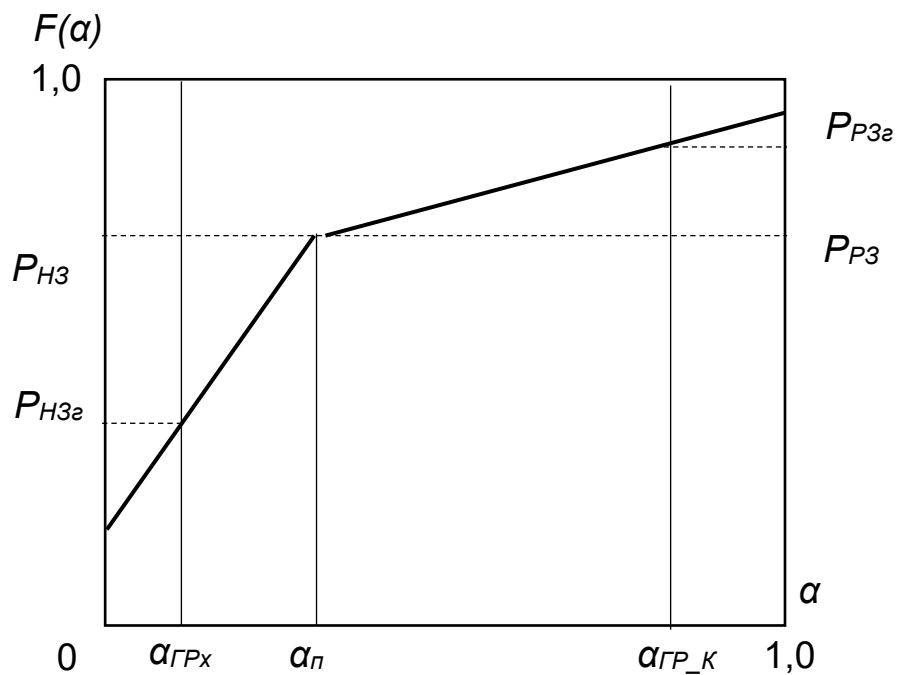


Рисунок 3.7. – Функція розподілу зростків

Вирішуємо рівняння щодо P_{H3y} та отримуємо вираз:

$$P_{H3y} = P_H + \frac{P_{H3}}{\alpha_n} \cdot \alpha.$$

Допустиме значення вмісту цінного мінералу на основі відомого виразу про середньозважене значення становитиме:

$$\nu_{\text{ДОП}} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{\alpha_{\text{ГРХ}}} \Delta P_{\text{НЗУ}} \cdot \alpha}{P_{\text{H}} + \sum_{\alpha=0}^{\alpha_{\text{ГРХ}}} \Delta P_{\text{НЗУ}} \cdot \alpha}.$$

При значенні вмісту цінного мінералу, що дорівнює допустимому значення втрат, воно буде граничним.

Аналогічно визначається граничне значення і для концентрату:

$$\beta_{\text{КЗ}} = \frac{P_{\text{P}} + P_{\text{РЗдоп}} \cdot \alpha_{\text{ЗР}}}{P_{\text{P}} + P_{\text{РЗдоп}}},$$

де граничні значення допустимої кількості зростків та вмісту цінного мінералу, не менше граничного.

Тоді, допустима кількість зростків становитиме:

$$\beta_{\text{РЗдоп}} = P_{\text{РЗ}} + \frac{1 - \beta_{\text{КЗ}}}{\beta_{\text{КЗ}} + \alpha_{\text{ГРК}}}.$$

З іншого боку (рис. 3.7):

$$P_{\text{РЗГ}} = P_{\text{РЗ}} \cdot \frac{\alpha_{\text{ГРК}} - \alpha_{\text{П}}}{1 - \alpha_{\text{П}}};$$

або
$$P_{\text{РЗдоп}} = P_{\text{РЗ}} - P_{\text{РЗГ}} = P_{\text{РЗ}} - P_{\text{РЗ}} \cdot \frac{\alpha_{\text{ГРК}} - \alpha_{\text{П}}}{1 - \alpha_{\text{П}}}.$$

Тоді:

$$P_{\text{РЗ}} \cdot \frac{1 - \beta_{\text{КЗ}}}{\beta_{\text{КЗ}} - \alpha_{\text{П}}} = P_{\text{РЗ}} - P_{\text{РЗ}} \cdot \frac{\alpha_{\text{ГРК}} - \alpha_{\text{П}}}{1 - \alpha_{\text{П}}}.$$

Після перетворень щодо граничного значення вмісту цінного мінералу отримуємо:

$$\frac{P_P}{P_{P3}} \cdot (1 - \beta_{K3}) \cdot (1 - \alpha_n) = (1 - \alpha_{ГРК}) \cdot (\beta_{K3} - \alpha_{ер}).$$

Позначимо: $\frac{P_P}{P_{P3}} \cdot (1 - \beta_{K3}) \cdot (1 - \alpha_n) = A.$

Тоді:

$$(1 - \alpha_{ер}) \cdot (\beta_{K3} - \alpha_{ер}) = \beta_{K3} - \alpha_{ер} \cdot (1 + \beta_{K3}) + \alpha_{ер}^2 = A;$$

та:

$$\alpha_{ГРК}^2 - \alpha_{ГРК} \cdot (1 + \beta_{K3}) + (\beta_{K3} - A) = 0.$$

Рішення даного рівняння відоме:

$$\alpha_{ГРК} = \frac{(1 + \beta_{K3}) \pm \sqrt{(1 + \beta_{K3})^2 - 4 \cdot (\beta_{K3} - A)}}{2}.$$

Оскільки $\alpha_{ГР} \geq 0$, то:

$$\alpha_{ГРК} = \frac{(1 + \beta_{K3}) - \sqrt{(1 + \beta_{K3})^2 - 4 \cdot (\beta_{K3} - A)}}{2}.$$

Для втрат у хвостах початкове рівняння має вигляд:

$$\frac{P_H \cdot v_{доп}}{\alpha_{Г-} \cdot v_{доп}} = P_H + (P_{H3} - P_H) \cdot \frac{\alpha_{Г-}}{\alpha_n}.$$

Яке після тотожних перетворень набуває вигляду:

$$(P_{H3} - P_H) \cdot \frac{\alpha_F^2}{\alpha_n} - \left((P_{H3} - P_H) \cdot \frac{v_{ДОП}}{\alpha_n} - P_H \right) \cdot \alpha_F - 2 \cdot P_H \cdot v_{ДОП} = 0.$$

І рішення якого тривіальне:

$$\alpha_F = \frac{\left((P_{H3} - P_H) \cdot \frac{v_{ДОП}}{\alpha_n} - P_H \right) \pm \sqrt{\left((P_{H3} - P_H) \cdot \frac{v_{ДОП}}{\alpha_n} - P_H \right)^2 + 8 \cdot P_H \cdot v_{ДОП} \cdot \frac{(P_{H3} - P_H)}{\alpha_n}}}{2 \cdot \frac{(P_{H3} - P_H)}{\alpha_n}}.$$

Для наступних вихідних даних: $P_H = 0,2$; $\alpha_n = 0,35$; $v_{ДОП} = 0,05$; $P_{H3} = 0,45$; $P_{P3} = 0,2$; $P_P = 0,15$; $\beta_{K3} = 0,9$; маємо допустимі відхилення показників розділення $\alpha_{ГР_К} = 0,87$; $\alpha_F = 0,082$.

Ці абсциси вказують на точки перегину сепараційних характеристик при виділенні концентрату та хвостів.

Оскільки вміст цінного мінералу в промпродукті буде незмінним, то приймемо, що рудна фаза буде виражена через середню крупність як:

$$d_{BKi} = d_i \cdot \sqrt[3]{\alpha_n}.$$

І далі всі розрахунки з розкриття здійснюємо за формулами для первісного розкриття. При цьому нерудна фаза в частинках складає:

$$r_{BKi} = d_i - d_{BKi} = d_i \cdot (1 - \sqrt[3]{\alpha_n}).$$

При визначенні числових характеристик результатів підготовки та розділення в блоці (рис. 3.8) необхідно враховувати виходи промпродуктів на попередньому етапі:

$$P_{Pi} = \alpha_n \cdot \int_0^{d_{BKi}} \left(1 - \frac{d}{d_{BKi}} \right) \cdot f_i(d) \partial d;$$

$$P_{Hi} = (1 - \alpha_n) \cdot \int_0^{r_{BKi}} \left(1 - \frac{d}{r_{BKi}}\right) \cdot f_i(d) \partial d;$$

$$f_i(d) = \frac{1}{\bar{d}_i} \cdot \exp\left(-\frac{d}{\bar{d}_i}\right);$$

де $\bar{d}_i$ – середнє значення крупності частинок у відповідному блоці.

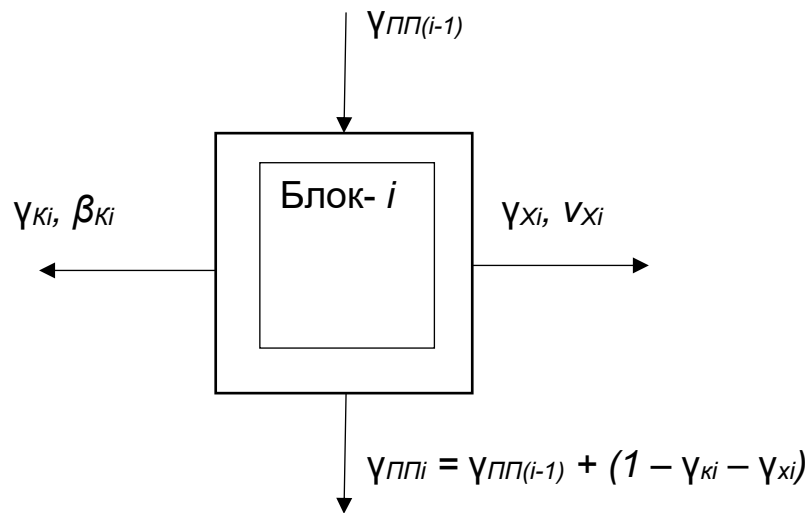


Рисунок 3.8. – Схема технологічного блоку

$\gamma_{пп(i-1)}$ – частковий вихід промпродукту попередньої стадії;

γ_{ki}, β_{ki} – вихід концентрату даної стадії та вміст цінного мінералу в ньому;

γ_{xi}, v_{xi} – вихід хвостів даної стадії та вміст цінного мінералу в них;

$\gamma_{ппi} = \gamma_{пп(i-1)} \cdot (1 - \gamma_{ki} - \gamma_{xi})$ – частковий вихід промпродукту даної стадії розділення

$$\gamma_{пп0} = 1; \quad \gamma_{ппi} = \gamma_{пп(i-1)} \cdot (1 - \gamma_{ki} - \gamma_{xi}).$$

Сумарний вміст цінного мінералу в концентраті становитиме:

$$\beta_i = \frac{\sum_{i=1}^j \beta_i \cdot \gamma_{ппі}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{кі} \cdot \gamma_{ппі}}$$

Сумарний вміст цінного мінералу в хвостах складе:

$$\nu_i = \frac{\sum_{i=1}^j \nu_i \cdot \gamma_{ппі}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{кі} \cdot \gamma_{ппі}}$$

Сумарний вміст цінного мінералу в кінцевому концентраті складе:

$$\beta_K = \frac{(\sum_{i=1}^j \beta_i \cdot \gamma_{ппі}) + \alpha_{пі} \cdot \gamma_{ппк}}{\sum_{i=1}^j \gamma_{кі} \cdot \gamma_{ппі} + \gamma_{ппк}} > \beta_{кз}$$

Якщо ця умова виконується, то подальший пошук структури ТЛЗ (технологічної лінії збагачення) припиняємо.

Алгоритм формування структури ТЛЗ наступний.

1. Моделювання подрібнення – функція розподілу частинок за крупністю в зливні класифікатора .
2. Моделювання розкриття – отримання функції розподілу зростків.
3. Моделювання сепарації – виділення відкритих фракцій та отримання проміжного продукту.
4. Оцінка виходу проміжного продукту та досягнення заданої якості концентрату.

3.5.2. Формування розділового технологічного блоку

Дії за першим пунктом можуть бути прийняті з довідкової літератури класифікатора або розраховані за подрібнювальною характеристикою з класифікацією. Таким чином, технологічний блок збагачення знаходять у вигляді схеми, що представлена на рис. 3.9.

На рис.3.10 наведена технологічна схема, що реалізує цей блок стадіального видалення відкритих фракцій.

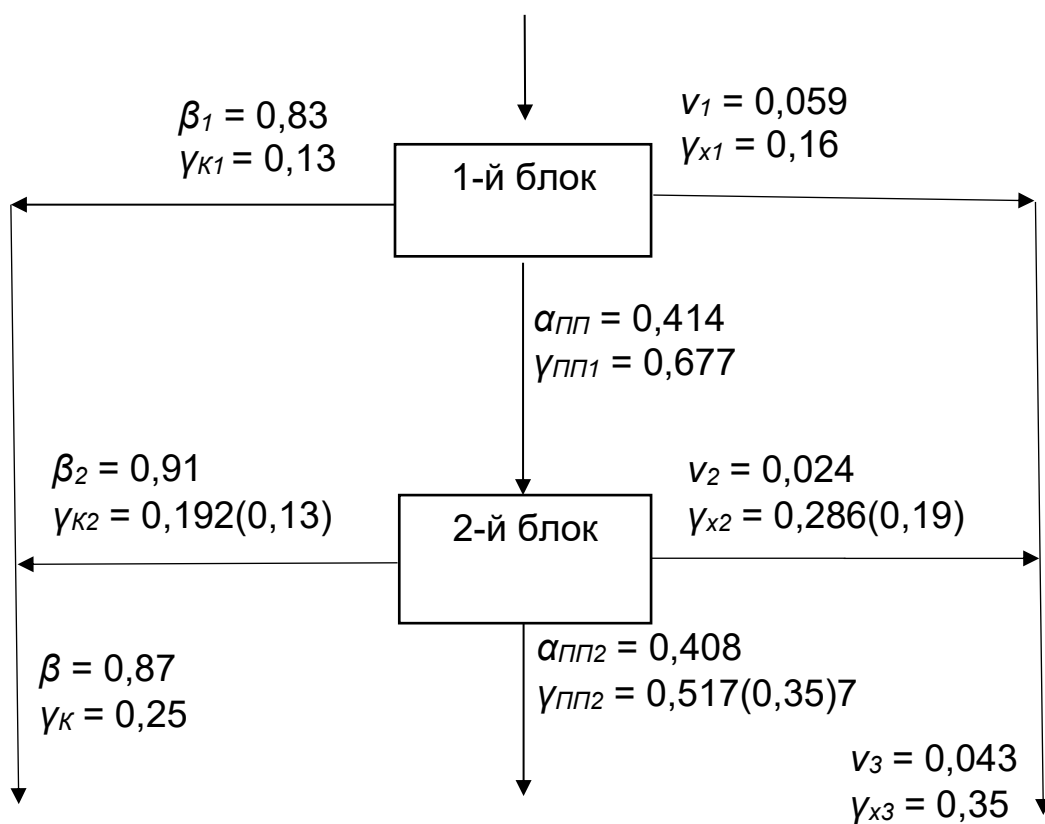


Рисунок 3.9. – Вихідні показники технології збагачення з видаленням відкритих фракцій.

Різниця в алгоритмах розрахунку для першої та для наступних стадій відрізняється тим, що оператор замкнутого циклу для наступних стадій у чисельнику не містить оператора подрібнення.

Дані для розрахунку наведеного блоку представлені в табл. 3.5.

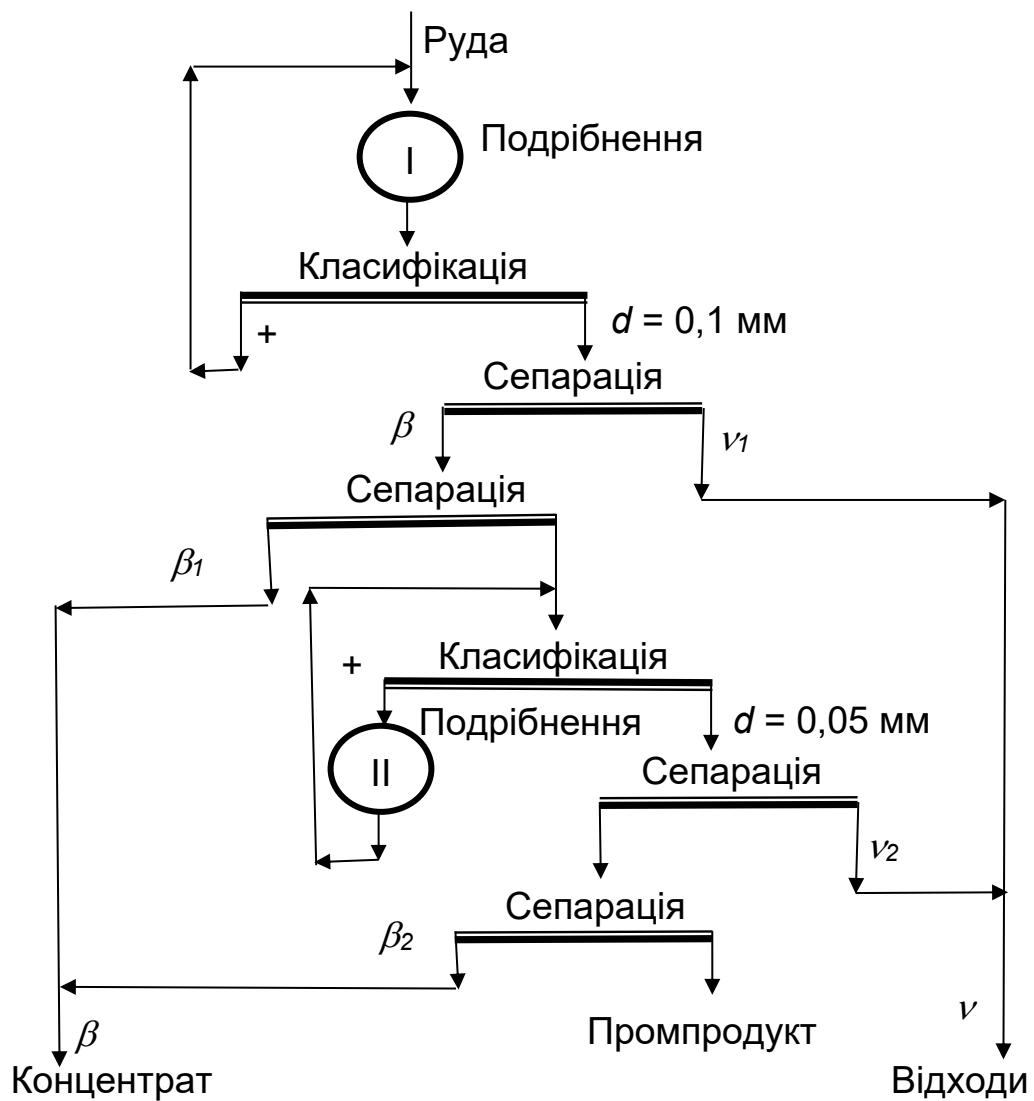


Рисунок 3.10. – Технологічна схема збагачення з видаленням відкритих фракцій

Розрахунки показників розкриття у першій стадії подрібнення наведені в табл. 3.6, 3.7.

Таблиця 3.5. – Дані для розрахунків показників подрібнення першої стадії

Клас крупності, мм	d	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,3	2,5	5	10	20
Кількість на вході	ΔF_{BX}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,1	0,3	0,25	0,25
Кількість на виході.	F	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,72	1	1
Приріст кількості на виході	$\Delta F_{ВЫХ}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,22	0,28	0
Характеристика подрібнення	A	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,42	2,36	2,22	0
Сепараційна класифікатора	P	0,96	0,95	0,92	0,87	0,85	0,6	0,3	0,01	0	0	0	0
Сепараційна характеристика класифікатора за хвостами	$1-P_{кл}$	0,04	0,05	0,08	0,13	0,15	0,4	0,7	0,99	1	1	1	1
Добуток знаменника оператора ЗЦП	$A(1-P)$	0,0504	0,063	0,101	0,1638	0,189	0,504	0,882	1,247	1,42	2,36	2,22	0
Чисельник оператора	AP	1,21	1,2	1,16	1,1	1,07	0,75	0,38	0,126	0	0	0	0
Знаменник оператора ЗЦП		1,71	1,198	0,9	0,83	0,81	0,5	0,12	-0,247	-0,42	-1,06	-1,02	0
Виправлений оператор ЗЦП		1,71	1,198	0,9	0,83	0,81	0,5	0,12	2,24	2,42	3,36	3,22	0
оператор		1,27	1,27	1,29	1,3	1,32	1,52	3,2	0,05	0	0	0	0
Вміст класу		0,025	0,025	0,026	0,026	0,026	0,03	0,064	0,0011	0	0	0	0
Нормований вміст	$\Delta F(d_i)$	0,113	0,113	0,113	0,116	0,118	0,135	0,284	0,008	0	0	0	0

$$\bar{d} = \sum_{d=0,01}^{1,3} d_i \cdot \Delta F(d_i) = 0,2598, \text{ мм}$$

Таблиця 3.6. – Розрахунок вмісту відкритих рудних зерен

d	d / d_{BK}	$1 - d / d_{BK}$	$\frac{d}{d}$	$\exp\left(-\frac{d}{d}\right)$	Δexp	3·6
1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	0	1	0,0377	0,0377
0,01	0,1	0,9	0,0384	0,9625	0,0364	0,0276
0,02	0,2	0,8	0,0769	0,9259	0,0686	0,05488
0,04	0,4	0,6	0,1538	0,8573	0,1222	0,07332
0,08	0,8	0,2	0,3076	0,7351	0,0279	0,00558
0,09	0,9	0,1	0,3461	0,7072		
						$\Sigma=0,204$

Примітка: знак "." символізує множення елементів відповідних стовпців

$$P_P = 0,204 \cdot 0,4 = 0,0816.$$

$$\text{Вміст багатих зростків: } P_{P3} = \alpha_n - P_P = 0,4 - 0,0816 = 0,3184.$$

Таблиця 3.7. – Функція розподілу зростків

α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1,0
$\Delta F(\alpha)$	0,1	0,3	0,25	0,10	0,17	0,08

Виконуємо розрахунок вмісту нерудної фази (табл. 3.8).

$$r_{BK} = d_{BK} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,65}{\alpha_n}} - 1 \right) = 0,1 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{0,65}{0,4}} - 1 \right) = 0,14 \text{ мм.}$$

Таблиця 3.8. – Розрахунок вмісту відкритих нерудних зерен

d	d / r_{BK}	$1 - d / r_{BK}$	$\frac{d}{d}$	$\exp\left(-\frac{d}{d}\right)$	Δexp	3·6
1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	0	1	0,0377	0,0377
0,003	0,2142	0,7858	0,0384	0,9623	0,0364	0,0286
0,006	0,4285	0,5715	0,0769	0,9259	0,0686	0,03945
0,009	0,6428	0,3572	0,1538	0,8573	0,1222	0,04357
0,012	0,8571	0,1429	0,3976	0,7351	0,0279	0,00398
0,013	0,9285	0,0715	0,3461	0,7072		
						$\Sigma=0,1533$

$$P_H = 0,6 \cdot 0,1533 = 0,09198 = 0,092.$$

$$\text{Вміст бідних зростків: } P_{H3} = 1 - \alpha_n - P_H = 1 - 0,4 - 0,092 = 0,508.$$

Технологію розділення шукаємо у вигляді, що зображена на рис. 3.5. Попередньо визначаємо сепараційні характеристики (табл. 3.9).

Таблиця 3.9. – Розрахунок сепараційних характеристик

α	P_v	P_β	$1-P_\beta$	$1-P_v$	$(1-P_\beta) \cdot (1-P_v)$	$(1-P_\beta) \cdot P_v$
0	0	0	1	1	1	0
0,125	0,8	0,02	0,98	0,2	0,184	0,784
0,375	0,97	0,05	0,95	0,03	0,0285	0,9215
0,625	1	0,1	0,9	0	0	0,9
0,875	1	0,3	0,7	0	0	0,7
1	1	0,97	0,03	0	0	0,03

Розрахунок показників розділення наведено в табл. 3.10.

Наступна стадія подрібнення.

Розрахунки з визначення середньої крупності не приводимо. Вони повністю аналогічні першій стадії. Однак схема подрібнення матиме вигляд , як на рис. 3.11.

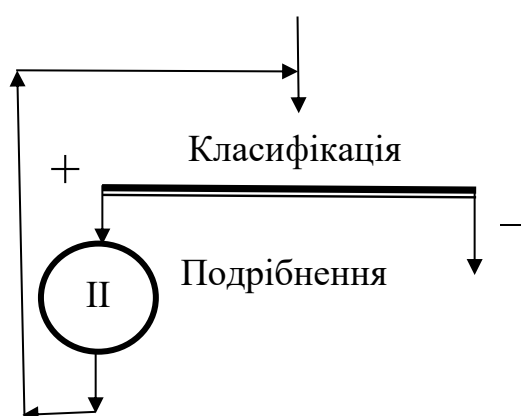


Рисунок 3.11. – Схема другої та наступних стадії подрібнення

Таблиця 3.10. – Розрахунок показників розділення у першій стадії

α	$\Delta F(\alpha)$	P_β	P_v	$(1-P_\beta) \cdot (1-P_v)$	$(1-P_\beta) \cdot P_v$	$\Delta F(\alpha) \cdot P_\beta$	$\Delta F(\alpha) \cdot P_v$	2·5	1·6	1·7	1·8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,1	0	0	1	0	0	0,1	0	0	0	0
0,125	0,3	0,02	0,8	0,184	0,784	0,006	0,055	0,235	0,0	0,007	0,029
0,375	0,25	0,05	0,97	0,0285	0,9215	0,0125	0,0071	0,23	0,0046	0,0026	0,086
0,625	0,1	0,1	1	0	0,9	0,01	0	0,09	0,0062	0	0,056
0,875	0,17	0,3	1	0	0,7	0,051	0	0,119	0,044	0	0,1
1,0	0,08	0,97	1	0	0,03	0,0776	0	0,0024	0,077	0	0,0024
						0,1571	0,1625	0,6769	0,134	0,0096	0,2785

Вміст цінного мінералу в вихідних продуктах збагачення становитиме:

– концентрат $\beta = \frac{0,1339}{0,1571} = 0,8523;$

– хвости $\nu = \frac{0,096}{0,01625} = 0,0589;$

– промпродукт $\alpha_{пп} = \frac{0,2785}{0,6769} = 0,4114.$

Оператор такого циклу подрібнення має вигляд:

$$P_{зцп2} = \frac{p_1}{p_0} = \frac{P}{1 - A \cdot (1 - P)}$$

Інші дані:

$$d_{BK} = 0,14 \cdot \sqrt[3]{0,41} = 0,01 \text{ мм}; \quad r_{BK} = 16 \text{ мкм}; \quad \bar{d} = 0,014 \text{ мм}.$$

Таблиця 3.11. – Дані для розрахунку вмісту відкритих рудних зерен

d	d / d_{BK}	$1 - d / d_{BK}$	$\frac{d}{\bar{d}}$	$\exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right)$	Δexp	$(1-d/d_{BK}) \cdot \Delta exp$
1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	0	1	0,07	0,07
0,001	0,1	0,9	0,0714	0,93	0,07	0,063
0,002	0,2	0,8	0,1428	0,86	0,11	0,088
0,004	0,4	0,6	0,2857	0,75	0,19	0,114
0,008	0,8	0,2	0,5714	0,56		
						$\Sigma = 0,335$

$$P_P = 0,335 \cdot 0,41 = 0,1375$$

$$\text{Вміст багатих зростків: } P_{P3} = \alpha_{ПП} - P_P = 0,41 - 0,1375 = 0,2725.$$

Розрахунок вмісту нерудної фази наведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12. – Розрахунок вмісту нерудних зерен

d	d / r_{BK}	$1 - d / r_{BK}$	$\frac{d}{\bar{d}}$	$\exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right)$	Δexp	3·6
1	2	3	4	5	6	7
0	0	1,0	0	1,0	0,07	0,07
0,001	0,0625	0,9375	0,0714	0,93	0,07	0,065
0,002	0,125	0,875	0,1428	0,86	0,11	0,09625
0,004	0,25	0,75	0,2857	0,75	0,19	0,1425
0,008	0,5	0,5	0,5714	0,56	0,22	0,11
0,015	0,9375	0,0625	1,0714	0,34		
						$\Sigma=0,41875$

$$P_H = 0,41875 \cdot 0,59 = 0,247$$

Вміст бідних зростків: $P_{H3} = 0,59 - 0,247 = 0,343$.

Таблиця 3.13. – Функція розподілу зростків у другій стадії збагачення

α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1,0
$\Delta F(\alpha)$	0,24	0,23	0,18	0,10	0,11	0,14

Таблиця 3.14. – Розрахунок показників розділення, що очікується, для другої стадії

P	$\Delta F(\alpha)$	P_β	P_v	$\frac{(1-P_\beta) \cdot (1-P_v)}{(1-P_v)}$	$\frac{(1-P_\beta) \cdot P_v}{P_v}$	2·3	2·4	2·5	1·6	1·7	1·8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,24	0	0	1	0	0	0,240	0	0	0	0
0,125	0,23	0,02	0,8	0,184	0,784	0,0046	0,041	0,18	0,00057	0,0051	0,022
0,375	0,18	0,05	0,97	0,0285	0,9215	0,009	0,005	0,166	0,00337	0,0019	0,062
0,625	0,1	0,1	1	0	0,9	0,01	0,0	0,09	0,00625	0	0,056
0,875	0,11	0,3	1	0	0,7	0,033	0	0,077	0,029	0	0,067
1	0,14	0,97	1	0	0,03	0,1358	0	0,0042	0,1358	0	0,0042
						0,1924	0,286	0,517	0,175	0,007	0,2112

Вихідні технологічні показники у другій стадії будуть наступними:

– концентрат $\beta = \frac{0,175}{0,1924} = 0,91;$

– хвости $\nu = \frac{0,007}{0,286} = 0,024;$

– промпродукт $\alpha_{\Pi\Pi} = \frac{0,2112}{0,517} = 0,408.$

3.5.3 Синтез технологій збагачення руд без виділенням промпродукту

Технологія збагачення корисних копалин – це взаємодія певних процесів, в результаті яких отримують продукт із заданими якісними показниками. Технологія збагачення вкrapлених корисних копалин

полягає у розділенні (сепарації) попередньо розкритих корисних та некорисних компонентів, із яких складається руда. На рис. 3.12 зображено зріз шматка залізного кварциту, де досить чітко видно шарувату текстуру руди: чергуються нерудні прошарки товщиною l_H і рудні прошарки – l_P .

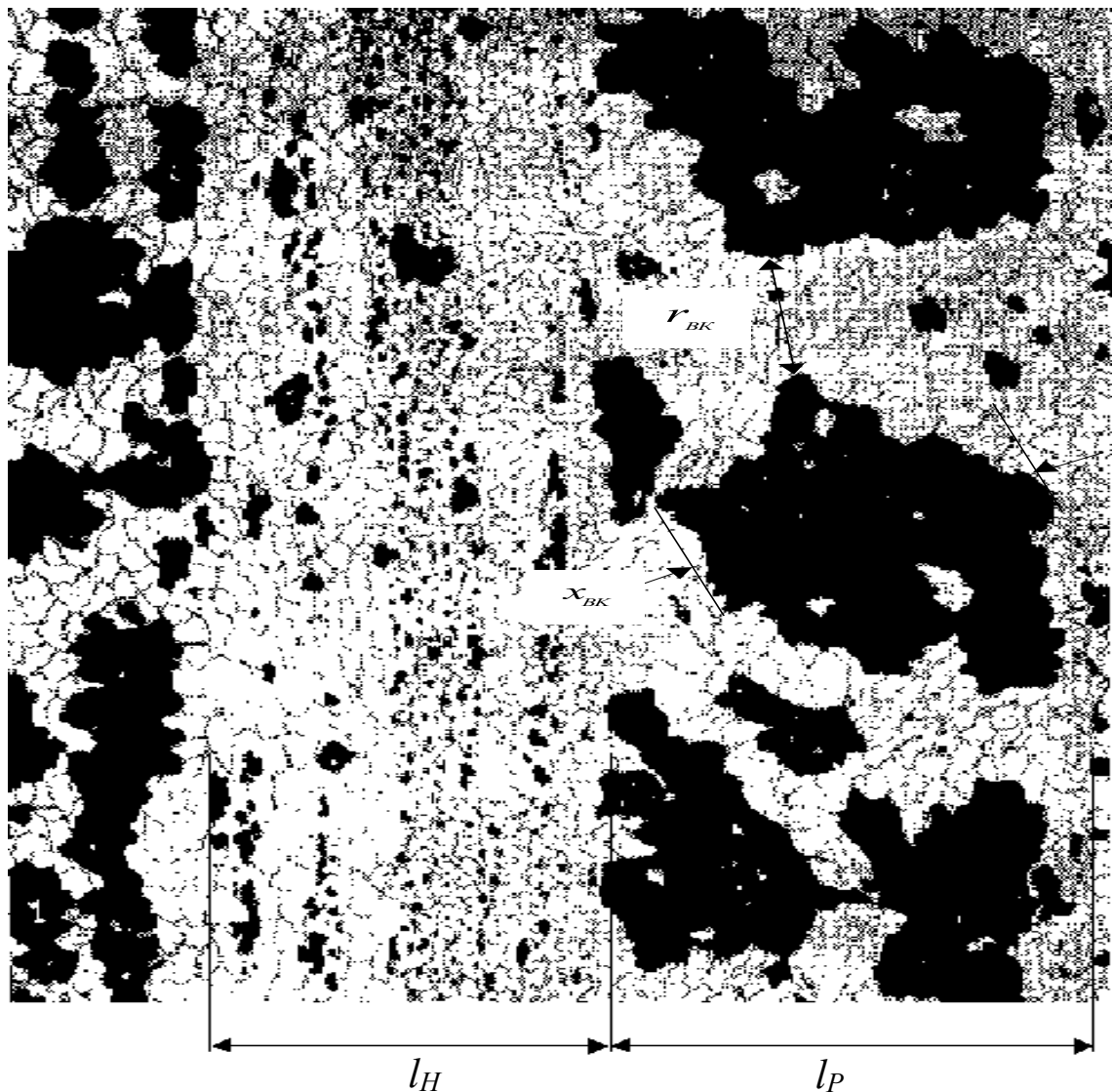


Рисунок 3.12 – Текстурна побудова залізної руди

У кожному прошарку є характерна крупність вкраплення d_{BK} та відстань між вкрапленнями r_{BK} , а також вміст цінного мінералу – α . Крім того, у рудних прошарках спостерігається вкраплення нерудного

мінералу. Всі ці параметри характеризуються функціями розподілу $F(I_P)$, $F(I_H)$, $F(d_{BK})$, $F(\alpha)$ або частково середніми значеннями величин I_P , I_H , d_{BK} , α_P . Вміст цінного мінералу в різних прошарках характеризуємо середніми значеннями: α_P – у рудних прошарках, α_H – у нерудних прошарках.

У цінному мінералі (магнетит) вміст заліза 72% (0,72), що становить 100 % мінералу магнетит. У промисловості вважається, що високий вміст заліза в концентраті має бути не менше 65%, що становитиме 90% магнетиту.

Відокремити (роз'єднати, розкрити) мінерал, що вкраплений в порожню породу можна подрібненням. Оскільки стан розкриття мінералу у руді характеризується функцією розподілу за розмірами, то мінерали можна сепарувати зі зменшенням крупності частинок руди, тобто. у міру її розкриття. Зменшення крупності руди здійснюється дробленням та подрібненням. Таким чином, технологія збагачення будується за принципом послідовного застосування розкриття та сепарації.

Реалізувати такий принцип у чистому вигляді зазвичай не вдається, оскільки сепараційні апарати ділять розкритий продукт далеко не ідеально. Це означає, що у всіх трьох продуктах будуть частинки з усього діапазону можливого вмісту цінного мінералу $0 \leq \alpha \leq 1$. Представити таку властивість сепаратора можна сепараційною характеристикою, яка відображає ймовірність переходу частинок вузької фракції за вмістом цінного мінералу (фракції якості) у збагачений продукт. Розкриття здійснюється подрібненням, яке має обмеження, тобто. є не ідеальним, що проявляється у нерівномірному розподілі частинок за крупністю. Максимальний розмір шматків початкової руди, яка транспортується із кар'єру на збагачувальну фабрику становить $d = 1200$ мм. Ясно, що ні про яке розкриття цінного мінералу не може бути й мови.

Одна стадія дроблення знижує крупність у 3...4 рази. Отже, після першої стадії дроблення максимальний розмір шматків буде становити $d_1 = 300...400$ мм. У цьому випадку розкриття також залишається нульовим. Після другого дроблення розмір шматків $d_2 = 80...100$ мм. Оскільки розмір дроблених шматків підпорядковується функції розподілу $F(d)$, то за таких максимальних розмірах можуть бути шматки, які можна порівняти з розмірами рудних і нерудних прошарків, тобто. $d < l_p$ та $d < l_H$.

Таким чином на першому етапі необхідно розглянути текстуру руди, визначити крупність матеріалу, коли з'являються розкриті, або досить бідні зростки та оцінити ймовірність їхнього виділення.

Ідентифікувати функцію розподілу частинок за розміром $f(d)$ на основі одного параметра – середнього розміру подрібнення (d_j) можливо, якщо припустити, що цей розподіл підпорядковується закону Пуассона

$$f(d) = \frac{1}{\bar{d}} \cdot \exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right),$$

де $\bar{d}$ – параметр розподілу (середня крупність частинок).

Показники розкриття та функція розподілу зростків на кожній стадії дроблення та подрібнення $F_1(\alpha)$ можуть бути визначені на основі матеріалу представленого в другому розділі.

А оскільки ми проектуємо, або ж синтезуємо схеми збагачення (переробки) із використанням відомого устаткування, то і їх сепараційна характеристика відома, або може бути визначена із результатів практики. Складається розділовий блок та визначається його сепараційна характеристика. Розглядається можливість застосування зворотних зв'язків (рециклів) для отримання необхідної сепараційної характеристики блоку розділення.

У результаті маємо функцію розподілу зростків у матеріалі та сепараційну характеристику блоку розділення, звідки неважко визначити якісно-кількісні показники розділення даного блоку збагачення, а саме: вихід проміжного продукту (збагаченого) $\gamma_{пп1}$ і вміст цінного мінералу в ньому $\beta_{пп1}$, а також втрати у відходах – v_1 .

Звідси й далі здійснюється пошук технологічної схеми покроково, тобто після реалізації кожного кроку результат буде осмислюватися і наступний крок проводиться з урахуванням можливих наступних дій.

3.6. Формування сепараційних характеристик

Сепараційна характеристика повинна якнайкраще узгоджуватися з характеристикою підготовки сировини тобто, бути гнучкою. Структуру блоків шукатимемо у вигляді каскадних схем.

Припустимо, що кожний розділовий апарат має сепараційну характеристику $P(\alpha)$, що покзана в табл. 3.15.

Таблиця 3.15. – Сепараційна характеристика окремого апарату

α	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$P(\alpha)$	0,008	0,11	0,58	0,75	1,0	1,0

Початкова схема виділення хвостів має вигляд, зображений на рис. 3.13.

Сепараційна характеристика схеми, що зображена на рис. 3.13 має вираз:

$$P_{cx} = P^2 + 2P^2R + 3P^2R^2 + 4P^2R^3 + 5P^2R^4 + 5P^2R^5,$$

а її значення наведені табл. 3.16.

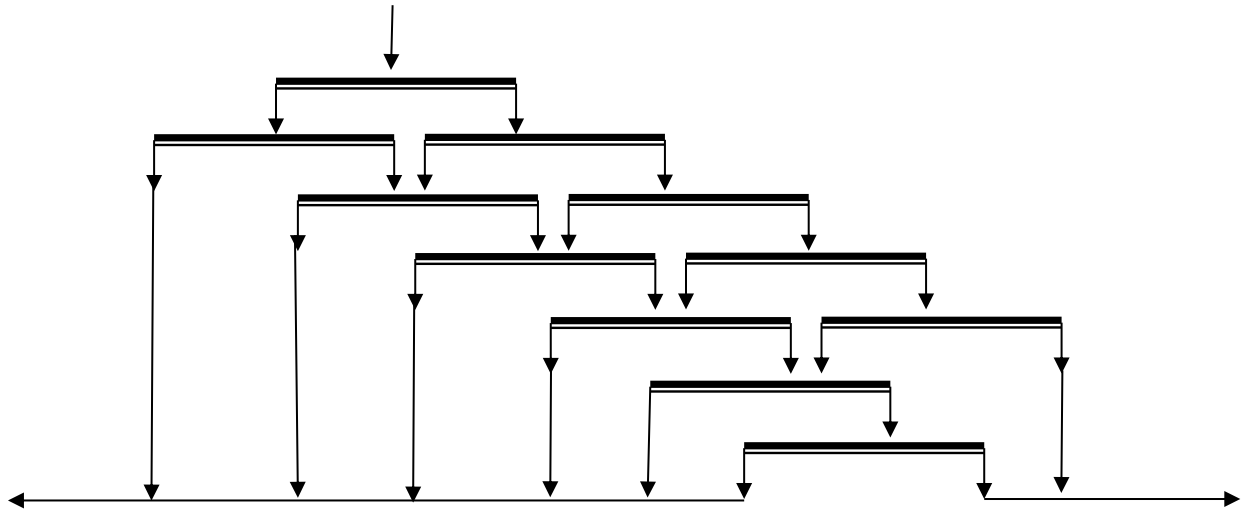


Рисунок 3.13. – Початкова технологічна схема виділення хвостів

Таблиця 3.16. – Сепараційна характеристика схеми

α	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$P(\alpha)$	0,001	0,168	0,971	0,998	1	1

Отримана сепараційна характеристика має недостатньо малі ймовірності вилучення бідних частинок, тому коригуємо схему до наступного виду, який зображено на рис. 3.14.

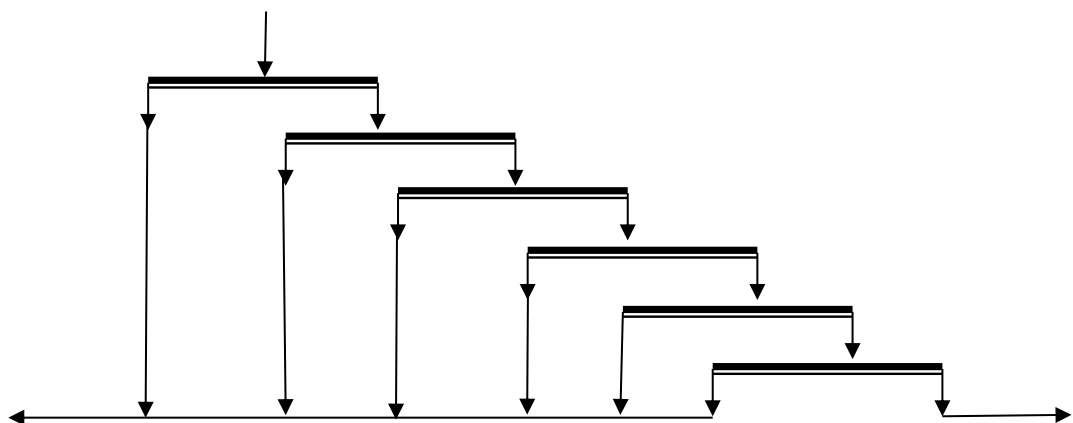


Рисунок 3.14. – Корегована технологічна схема розділення для виділення хвостів

Таблиця 3.17. – Сепараційна характеристика скоригованої схеми

α	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$P_{с4}$	0,047	0,503	0,995	1	1	1

Перевіримо результати розподілу, що очікуються. Розрахунок зведено у табл. 3.18.

Таблиця 3.18. – Розрахунок показників виділення хвостів, що очікуються, скоригованої схеми

α	F	ΔF	P	$1-P$	4·3	3·5	1·6	1·7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,4	0,4	0,047	0,953	0,019	0,381	0	0
0,125	0,5	0,1	0,503	0,497	0,05	0,05	0,006	0,0062
0,375	0,88	0,38	0,995	0,005	0,378	0,002	0,142	0,0008
0,625	1	0,12	1	0	0,12	0	0,075	0
0,875	1	0	1	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0
				$\Sigma=$		0,433		0,007

Примітка: знак "." символізує множення елементів відповідних стовпців

$$\nu = \frac{0,007}{0,433} = 0,016.$$

Втрати цінного компоненту не вище допустимих, тому технологія виділення хвостів приймається як схема, що зображена на рис. 3.14.

Приступаємо до формування технологічного блоку, який виділяє концентрат. На підставі пошуку сепараційного блоку, що виділяє хвости, за аналогією приймемо наступну схему (рис. 3.15).

Розрахунок показників розділення, що очікуються, зведено у табл. 3.19.

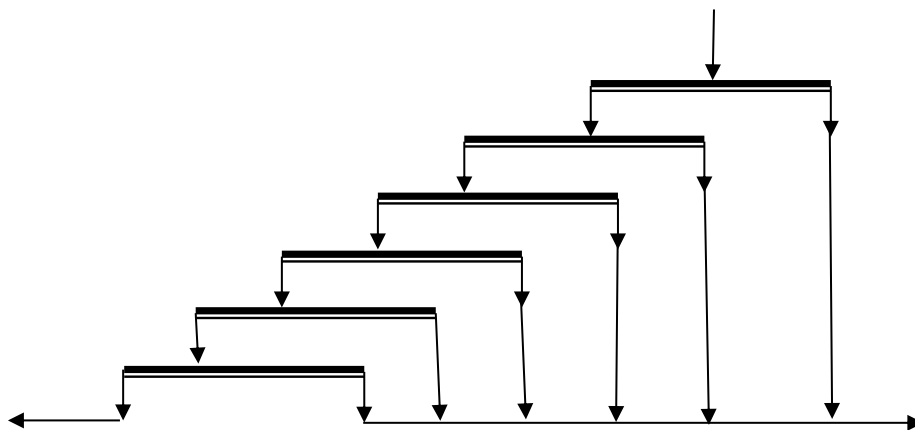


Рисунок 3.15. – Технологічна схема розділення для виділення концентрату

Таблиця 3.19. – Розрахунок показників розділення, що очікуються, для виділення концентрату

α	P_{cx3} три перечистки	P_{cx4} чотири перечистки	P_{cx5} п'ять перечисток	P_{cx6} шість перечисток	ΔF	5·6	1·7
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0,095	0	0
0,125	0,0013	0	0	0	0,305	0	0
0,375	0,1951	0,113	0,07	0,04	0,22	0,008	0,003
0,625	0,4219	0,316	0,24	0,18	0,05	0,009	0,006
0,875	1	1	1	1	0,03	0,03	0,026
1	1	1	1	1	0,3	0,3	0,3
						0,347	0,335

При трьох перечистках отримаємо концентрат $\beta = 0,9$; при чотирьох – $\beta = 0,93$; при п'яти – $\beta = 0,95$; при шести – $\beta = 0,965$.

При шести перечистках отримали концентрат задовільної якості.

Розрахунки показують, що втрати в хвостах і якість концентрату задовольняють поставленим умовам, в результаті технологічний блок першої стадії збагачення виглядатиме відповідно до рис. 3.16.

Таким чином, нами синтезовано технологічний блок першої стадії збагачення, наступні блоки можна синтезувати аналогічно.

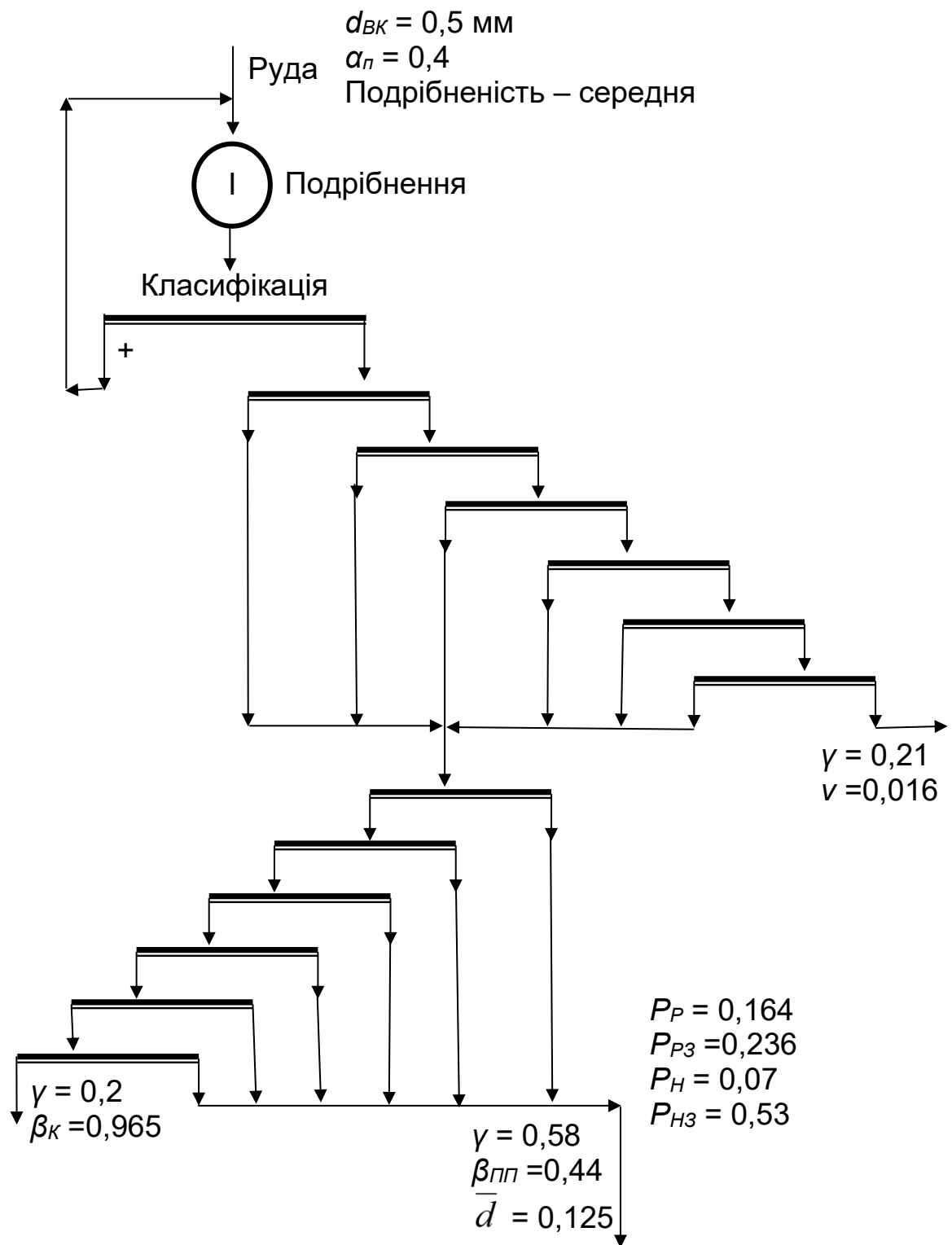


Рисунок 3.16. – Технологічна схема розділення для виділення концентрату та хвостів

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз дослідження сучасних технологічних схем збагачення та переробки корисних копалин показав, що використовуються системні характеристики процесів розділення та перетворення вхідної величини у вихідну. До таких характеристик належать для апаратів розділення та змішування сепараційні характеристики, які описують ймовірність переходу частинок певного розміру або класу до збагаченого продукту, а для подрібнювального устаткування використовуються подрібнювальні характеристики, які показують співвідношення вмісту однакових вузьких фракцій за крупністю на вході й виході з подрібнювального апарата, агрегату або технологічного блоку.

Наведені методики: практичного визначення сепараційної характеристики процесу розділення, аналітичного визначення сепараційної характеристики операції змішування, методика розрахунку вихідних показників замкнутого циклу подрібнення.

Отже аналіз технологічної схеми це визначення значення вихідних показників на базі відомих вхідних показників сировини, процесів розділення та складання такого алгоритму перетворення, який є відображенням технологічних зв'язків та математичних моделей технологічних апаратів.

Основа такого алгоритму є використання взаємного перетворення функцій гранулометричного складу на функцію фракційного складу та – навпаки. Таким чином, для моделювання технології збагачувальних процесів необхідно і достатньо мати три функції, що характеризують початковий (вхідний) потік на будь-який технологічний апарат. Це функції розподілу частинок за крупністю (гранулометричний склад) та вмісту цінного компонента (фракційний склад), а також функція зв'язку крупності частинок із вмістом цінного компоненту за класами крупності.

В результаті проведених досліджень встановлено, що основні шляхи підвищення ефективності розділових процесів полягають в наступному:

- розробці алгоритму математичного дослідження впливу зміни сепараційної характеристики окремого апарату розділення, переробки на загальні кінцеві показники технологій збагачення корисних копалин з урахуванням властивості сировини;

- розробці та формулюванні критерію вибору апаратів і їх параметрів залежно від типу сировини та способу її підготовки до розділення.

Результати роботи опубліковані:

1. Младецький І.К., Левченко К.А. (2024) Вплив узгодженості характеристики сировини та сепаратора при створенні блоків розділення мінеральної сировини. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки №2 С. 111-116.
<https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-17>

2. Младецький, І.К., Левченко К.А., & Кушнірук Н.В. (2025). Визначення необхідної похибки вимірювання показників збагачення. Збірник наукових праць НГУ, 80, 74–80.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.074>

3. Младецький І.К., Левченко К.А., Кушнірук Н.В., Чеберячко І.М., & Журавльов В.М. (2025). Критерій розділення сепараційних процесів. Збірник наукових праць НГУ, 81, 64–73.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.064>

4. Младецький І.К., Левченко К.А., Сахно С.В., Чеберячко І.М., & Суздаль В.О. (2025). Мінімальна маса проби під час покускового випробування рудного масиву. Науковий Журнал Метінвест

<https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-44>

5. Младецький І.К., Левченко К.А., Сахно С.В., Чеберячко І.М., & Михайлова Д.О. (2025). Визначення необхідної крупності подрібнення руди. Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки №4 329-332. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-45>

6. Олійник Т.А., Кушнірук Н.В., & Левченко К.А. (2025). Раціональне використання техногенних утворень Кривбасу в абразивному виробництві: фізичні параметри та технологічні підходи Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки №5 271-276. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-31>

7. Младецький І.К., Левченко К.А., Агудина А.Є. (2025) Погрішність при вимірюванні показників збагачення. 1st International Scientific and Practical Conference «Science and Information Technologies in the Modern World» (26-28.02.2025, Athens, Greece). С. 506-507.

8. Кушнірук Н.В., Олійник Т.А., Левченко К.А. (2025). Відходи гірничо-металургійного комплексу як резерв промислового виробництва: стан і перспективи. Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасний стан і перспективи розвитку геотехнічної інженерії" GEO-25 (4-5.05.2025, Київ, Україна). С. 62-64.

9. Младецький І.К., Михайлова Д.О., & Суздаль В.О. (2026). Оцінка досконалості технології розділення. 7th International Scientific and Practical Conference «Research in Science, Technology and Economics» (6-8.05.2026, Luxembourg, Luxembourg). С. 580-584. <https://isu-conference.com/en/archive/research-in-science-technology-and-economics-06-05-26/>

10. Стрельцова О.М. Дослідження впливу технологічних параметрів на ефективність сухої магнітної сепарації магнетитових кварцитів Інгuleцького ГЗК. Студентська науково-технічна конференція «Start in Science» (12.12.2025, Запоріжжя, Україна). С. 136-139.

11. Журавльов В.М. Удосконалення схеми рудопідготовки магнетитових кварцитів Кривбасу. Студентська науково-технічна конференція «Start in Science» (12.12.2025, Запоріжжя, Україна). С. 102-105.

12. Младецький І.К., Левченко К.А., Михайлова Д.О., & Пащенко Н.В. (2026). Методика визначення показників якості збагачення залізних руд уздовж технологічної лінії. 3 International Scientific and Practical Conference «Science and Technology: New Horizons of Development» (4-5.06.2026, Prague, Czech Republic). С. 920-922. <https://isu-conference.com/en/archive/science-and-technology-new-horizons-of-development-03-06-26/>

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Младецкий И.К., Мостыка Ю.С. Аналитическое определение показателей раскрытия руд. Днепропетровск: Системные технологии, 1999. 106 с.
2. Младецький І.К, Пілов П.І. Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин. Навч. посібник. Д.: НГУ, 2005. 156с.
3. Ахметшина И.В., Младецкий И.К. Идентификация функции вкрапленности руды. Збагачення корисних копалин. 2019. Вип. 72 (113). С. 7-13.
4. Младецкий И.К. Синтез технологий обогащения полезных ископаемых: монографія. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. 153 с.
5. Олійник Т.А., Ніколаєнко П.К. Використання математичного моделювання для визначення гранулометричного складу продукту дроблення руди в шарі під тиском. Збагачення корисних копалин. 2019. Вип. 72 (113). С. 44-48.
6. Младецкий И.К., Лысенко А.А., Пилов П.И. Определение требуемой точности измерения показателей технологических процессов на ВДГМК. Збагачення корисних копалин. 2013. Вип. 54(95). С. 167-175.
7. Олійник Т.А., Скляр Л.В., Кушнірук Н.В., Курило В.М. Обґрунтування та розробка технології збагачення відходів переробки магнетитових кварцитів АТ «ПівДГЗК». Збагачення корисних копалин. 2019. Вип. 75 (116). С. 23-30
8. Младецкий И.К., Левченко К.А. Синтез технологий обогащения руд. Збагачення корисних копалин. 2019. Вип. 75 (116). С. 3-11.
9. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд. Збагачення корисних копалин. 2018. Вип. 69 (110). С. 32-44

10. Младецкий И.К., Пилов П.И., Левченко К.А., Куваев Я.Г. Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин: Навч. посіб. Дніпро: Журфонд, 2019. 204с.
11. Пілов П.И. Гравітаційні методи збагачення корисних копалин: Навч. підручник. Дніпро: Пороги, 2021. 152 с.
12. Младецкий И.К., Павленко А.А. Определение требуемой крупности помола руды. Збагачення корисних копалин. 2008. Вип. 35 (76). С. 53–57.
13. Младецкий И.К., Куваев Я.Г. Преобразование функции распределения сростков в характеристику крупности. Збагачення корисних копалин. 2018. Вип. 67 (108). С. 13-25
14. Младецкий И.К., Левченко К.А. Показатель раскрытия рудного минерала. Збагачення корисних копалин. 2018. Вип. 67 (108). С. 42-49.
15. Білецький В.С., Смирнов В.О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. 304 с.