

© І.К. Младецький¹, К.А. Левченко¹, Н.В. Кушнірук²,
І.М. Чеберячко¹, В.М. Журавльов¹

¹ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна

²Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

КРИТЕРІЙ РОЗДІЛЕННЯ СЕПАРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

© I. Mladetskyi¹, K. Levchenko¹, N. Kushniruk², I. Cheberiachko¹, V. Zhuravlov¹

¹Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhzhia, Ukraine

²Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

CRITERIA FOR DIVISION OF SEPARATION PROCESSES

Мета. Обґрунтувати доцільність застосування нового критерію оцінки ефективності процесів розділення, що дозволяє незалежно від ступеня підготовки сировини об'єктивно оцінити роботу збагачувального устаткування.

Методика. При виконанні роботи застосовано метод узагальнення наукової інформації; аналітичний, ймовірно-статистичний методи дослідження; виконано математичне моделювання роботи сепаратора.

Результати. Показано обмеження традиційних критеріїв, таких як Ханкока-Луйкена, при оцінюванні саме розділового етапу. Розроблено підхід до побудови критерію ефективності на основі відношення фактичного вмісту цінного компонента до теоретично можливого за ідеального розділення. Запропоновано новий показник K_β , який у тестовому випадку набув значення 0,927, що свідчить про високу ефективність роботи сепаратора. Для виділення відходів визначено критерій $K_v = 0,944$. Запропоновано шкалу оцінки ефективності: низька (до 0,3), середня (0,3–0,8), висока (понад 0,8).

Наукова новизна. Уперше розроблено критерій ефективності, що базується виключно на параметрах сепарації, без врахування попередньої підготовки матеріалу. Запропонований підхід дозволяє зіставляти реальну та ідеальну сепараційну характеристику, враховуючи форму функції розподілу зростків. Встановлено математичну залежність між якістю концентрату і конфігурацією сепараційної кривої, що дає змогу коректно оцінювати ефективність навіть для складних функціональних форм.

Практична значимість. Запропонований критерій дозволяє оцінити ефективність роботи кожного конкретного сепаратора незалежно від ступеня подрібнення або природи вихідної сировини. Це забезпечує інженеру або оператору можливість виявляти вузькі місця в технологічному процесі, приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації обладнання, а також оптимізувати процеси без зміни всього технологічного ланцюга. Кількісне значення показника K_β дає змогу вводити систему моніторингу ефективності в режимі реального часу, що є важливим для автоматизованих систем керування.

Ключові слова: процеси розділення, критерій ефективності, сепарація, сепараційна характеристика, функція розподілу, якість концентрату, зростки.

Вступ. Освоєння природних ресурсів на пряму, чи опосередковано пов'язано із використанням процесів розділення, тому що в природі не існує корисних копалин в такій формі та з таким ступенем чистоти, щоб їх можна було використовувати без попереднього збагачення. В результаті збагачення

виділяють необхідні компоненти у вигляді мінералів, або найпростіших хімічних сполук. Незалежно від методу та об'єкту розділення будь-то руда, вугілля, мінеральна сировина – процеси розділення, що використовуються в промисловості, мають низку загальних закономірностей і характеристик, що дозволяє використовувати для їх опису одні і ті ж математичні методи. Тому безліч прийомів і методів, які були розроблені і використовувалися в одній із галузі промисловості зараз застосовуються в інших сферах.

Актуальним же являється питання ефективності тих чи інших технологічних процесів. Визначення оцінки технологічного процесу як правило, здійснюють за декількома критеріями. Інтерес до загального критерію, що однозначно виражає ефективність процесу та зручний у використанні, на першому етапі був пов'язаний із природним прагненням людини якось оцінити результати своєї діяльності.

Основна частина. Спільною рисою всіх процесів розділення є масовість, тобто велика кількість елементарних агрегатів (частинок), що підлягають розділенню. В більшості випадках процес розділення відбувається за однією фізичною розділовою ознакою (крупність, щільність, магнітна сприйнятливність, електропровідність, тощо). Але у зв'язку із масовістю процесу розділення, завжди існує певна ймовірність того, що навіть за чіткої відмінності властивостей частинок, що розділяються, певна їх частка потрапляє не у свій продукт, і, отже, з одного боку відбувається певне забруднення продуктів розділення, чужорідними частинками, а з іншого – недовилучення частинок із заданими властивостями в однойменний продукт. На ймовірнісний процес розділення, який характеризується якістю та вилученням, впливають також похибки, що по'язані із недосконалістю апаратів розділення та існуванням частинок із проміжними властивостями – зростків мінералів, різноманіття мінерального складу, тощо.

Таким чином, у результаті промислового застосування процесу розділення з початкової суміші отримують не чисті речовини (продукти), а тільки тією чи іншою мірою збагачені або збіднені продукти. Термін «збагачення» застосовується тільки для позначення сукупності двох процесів: підготовка продукту до розділення (утворення суміші розкритих частинок: рудних та породних) та сам процес розділення.

З усіх процесів розподілення відповідно до математичного опису найскладнішим є збагачення руд. Це пояснюється наступним чином.

По-перше, у збагачувальних процесах знаходиться найширший діапазон концентрацій цінних мінералів у початковій сировині та продуктах розділення.

По-друге, наявність зростків мінералів дає в процесі цілу гаму частинок із проміжними властивостями між цінним компонентом і порожньою породою, що змушує додатково вводити в рівняння функції розподілу постійні величини, які виконують оцінку детермінованих характеристик.

По-третє, у збагачувальних процесах бере участь цілий комплекс різnorідних мінералів, що мають до того ж різновиди і різні склади навіть у межах одного родовища. При цьому необхідно враховувати можливості комплексного збагачення з одержанням кількох концентратів або одержання концентрату різних за властивостями мінералів, але таких, що містять один і той самий цінний елемент.

При збагаченні корисних копалин наявні: комбіновані схеми, що включають декілька методів розділення; циркуляція проміжних продуктів розділення; допоміжні

операції, тощо, а тому математичний апарат, який придатний для опису збагачення руд, може з ще більшим успіхом використовуватися в інших процесах розділення.

Як уже зазначалося, у промислових процесах розділення неможливо досягти повного розділу, а отримують лише збагачений та збіднений за деяким компонентом продукти. Зі збільшенням повноти розділення витрати зростають, процес ускладнюється, а продуктивність апаратів різко знижується. Тому на якомусь етапі стає більш вигідним залучити в переробку додаткову кількість сировини, з метою отримання того ж виходу готової продукції, який може бути отриманий у разі повнішого вилучення корисного компонента із сировини із низьким його вмістом. У той же час, повнота вилучення в концентрат цінного компонента (або втрати його у відходах) являються однією з найважливіших характеристик процесів розділення.

Оскільки вилучення пов'язане із продуктивністю апаратів розділення, а зрештою потрібне лише одержання певного виходу готової продукції, то продуктивність за готовим продуктом – друга найважливіша характеристика процесу розділення. Вона економічно пов'язаний з першим через собівартість сировини і готової продукції, а технологічно ці дві характеристики перебувають в антагоністичному протиріччі: зі зростанням продуктивності падає вилучення і навпаки.

Третя характеристика процесу розділення – якість концентрату (вміст у ньому цінного компонента) стає особливо важливою в тих процесах (найчастіше проміжних), де допустимі широкі коливання цього параметру. Якість концентрату може бути тим вищою, чим нижчі продуктивність і вилучення. Якість і вилучення пов'язані один з одним функціонально і залежать від вмісту цінного компонента у початковій сировині, у процесах доведення, або наступної переробки концентрату.

Таким чином, усі три основні характеристики або критерії процесу розділення (вилучення, вихід і вміст цінного компонента) пов'язані між собою так, що зростання ефективності одного із них знижує в деякій мірі ефективність за двома іншими. Це визиває труднощі в оцінці ефективності процесу розділення, але дає можливість знайти компромісне рішення. Додаткові труднощі виникають під час оцінки розділення багатокомпонентних систем із отриманням кількох продуктів, цінність яких різна. Під час порівняння досліджень, або оптимізації процесу розділення комплексних продуктів доводиться враховувати одразу кілька показників, що перебувають один з одним у складних економічних і технологічних зв'язках. Керування процесами, або статистичне планування експериментів у таких умовах взагалі неможливе, якщо невідомі функціональні зв'язки між критеріями оптимізації.

Як бачимо вибір критерія оптимізації, або ефективності процесу розділення завдання зовсім не просте.

Вибору критерію ефективності присвячено значну кількість робіт, що стосуються не тільки процесів розділення, а й найрізноманітніших галузей – від економіки до системотехніки [1–6]. Спочатку ці дослідження мали суто пізнавальне значення і відповідали природній потребі людини якось оцінити результати своєї роботи. У міру розвитку математики, а потім і автоматизації вибір критерію оптимальності став технічною необхідністю, що зумовлює не тільки точність постановок конкретного завдання, а й швидкість його розв'язання.

Вимоги до критерію ефективності.

Критерій ефективності, призначений для дослідження технології, зокрема процесам розділення, має відповідати низці вимог [2].

1. Він має характеризувати ефективність процесу з погляду кінцевої мети даного виробництва.

2. Критерій має бути кількісним і однозначним, тобто виражатися одним числом. Числові значення критерію не обов'язково мають перебувати в пропорційній або іншій залежності одне від одного: у найпростішому випадку числа, що виражають ефективність, можуть позначати просто порядковий номер режиму процесу розділення за умови ранжування технологічних показників за кількома ознаками. Однак такий критерій мало зручний, оскільки статистичні операції з такими числами дуже обмежені. Найзручніше представляти значення критерію ефективності в інтервалі значень від 0 до 1 у частках одиниці, або у відсотках від 0 до 100%.

3. Повнота, або універсальність критерію ефективності одна із бажаних властивостей. Наприклад, економічні критерії (без відповідних поправок) не мають цією властивості, оскільки вони не дозволяють, або обмежують процеси нерентабельні, але необхідні з погляду технології, стратегічних міркувань і технічної політики. Навпаки, технологічні критерії часто не враховують важливих економічних міркувань.

4. Статистична оцінка критерія ефективності в деякій мірі є антагоністичною щодо вимоги чутливості до змін показників процесу. Фізичний сенс статистичної ефективності це нечутливість до незначних випадкових коливань, а її математична оцінка – дисперсія, середньоквадратичне відхилення значень критерію для однакових дослідів, що характеризує розкид відповідно до середнього значення. Наведемо наочний приклад.

Під час збагачення руд із досить низьким вмістом цінного компонента і малим виходом концентрату (наприклад, молібденових) вихід відходів близький до 100%, тобто майже дорівнює за вагою руді, що надійшла на збагачення. У цьому разі вилучення металу у відходи прямо пропорційне їхньому вмісту у відходах і, отже, аналіз відходів може бути таким самим критерієм розділення, як і вилучення в концентрат (рівне 100% мінус вилучення у відходи). Однак, вилучення у концентрат, який розраховують за більш точним аналізом багатших продуктів – концентрату та початкової руди, має значно меншу похибку (дисперсію), ніж аналіз показників відходів. З цього погляду вилучення в концентрат – критерій статистичний більш ефективний, ніж вміст металу у відходах.

5. Зручність критеріїв, що мають фізичний сенс, полягає в меншій імовірності грубих помилок під час їхнього застосування, а також у можливості їхнього нормування. Для такого критерію завжди можна знайти його значення за умов ідеального розділення, порівняти його з реальним і, таким чином, дізнатися, які наявні резерви для покращення роботи апаратів розділення. Нормування, що полягає в обчисленні відношення реального та ідеального розділення, і надає можливість позначити інтервал змін критерію від нуля, що відповідає відсутності розділення, до одиниці (або 100%), що відповідає ідеальному розділенню, та надає критерію більшої наочності.

6 Простота і наочність критерію завжди бажані там, де вони не суперечать повноті та однозначності.

Нині, серед великої кількості критеріїв ефективності розділення, які пропонуються та відповідають усім перерахованим вимогам не існує. Тільки для збагачення корисних копалин їх кілька десятків, зокрема, особливо багато їх застосовується для оцінки збагачуваності вугілля. Є кілька узагальнюючих описів, які критично розглядають старі та пропонують нові критерії на основі найрізноманітніших технологічних, економічних та інших міркувань. Очевидно, найбільшій кількості вимог задовольняють економічні критерії, хоча в багатьох випадках немає достатніх даних для їхнього розрахунку, тому що неможливо встановити ціни на всі проміжні продукти, які одержують в тій чи іншій виробничій операції.

Під час збагачення корисних копалин залежності кінцевих показників від початкових мають монотонний характер, і тому підготовка сировини до розділення, або саме розділення не може бути оцінено з оптимального боку. Більшість критеріїв пов'язують показники розділення і якість підготовки початкової сировини до розділення. Ці критерії ефективності збагачувального процесу охоплюють щонайменше два процеси: підготовку (подрібнення) і розділення (сепарацію). Окремо оцінити ефективність подрібнення або сепарацію не виявляється можливим. Водночас, коли ведеться синтез технологічної схеми збагачення, така оцінка необхідна для того, щоб послідовно оцінювати прийняті рішення. Хоча не завжди оптимізація на кожному кроці призводить до оптимізації всього процесу вибору технологічних зв'язків у цілому (принцип Беллмана). Необхідно оцінювати на оптимальність усі прийняті рішення до того кроку, на якому ведеться дослідження.

Найбільшого поширення набув критерій Ханкока-Луйкена, який оцінює вміст цінного мінералу в збагаченому (β) і в збідненому (ν) продуктах і порівнює його із вмістом у початковому (α_n) [7]. Так, ефективність збагачувального процесу визначається як різниця вилучення цінного (корисного) мінералу (ε_k) і породної частини (R) у збагачений продукт:

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

Якщо, задатися деякою функцією розподілу зростків і сепараційними характеристиками, то тоді можливо отримати максимум критерію, коли абсциса точки перегину сепараційної характеристики збігатиметься з абсцисою початкового вмісту цінного мінералу у початковій сировині. Якщо сепараційну характеристику буде переміщено праворуч або ліворуч, значення критерію зменшиться.

Якщо ж сепараційна характеристика набуде вигляду ступінчастої функції, у разі її зміщення остерігається таке саме явище, при цьому максимума 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 $E = 1$ буде отримано, коли початковий продукт повністю розкритий, а сепараційна характеристика відповідає

ідеальній сепарації. Це природно, тому що цей критерій включає відношення рівня сепарації, що досягнуто в даному сепараторі, до теоретичного значення.

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

Отже, якщо оцінювати ефективність сепараційного процесу і не плутати сепарацію зі збагаченням, то необхідно мати функцію розподілу зростків $F(\alpha)$, сепараційну характеристику ідеального розділення і сепараційну характеристику реального сепаратора, ефективність роботи якого оцінюється. Причому, для сепаратора зі ступінчастою сепараційною характеристикою не має сенсу включати до критерію ні початковий вміст цінного мінералу, ні його вміст у збідненому продукті, ні вихід, оскільки положення сепараційної характеристики відносно осі абсцис задається дослідником. Припустимо, задано характеристику розподілу зростків $F(\alpha)$ (рис. 1, а), ідеальну сепараційну характеристику $P_2(\alpha)$, реальну сепараційну характеристику деякого сепаратора $P_1(\alpha)$ (рис. 1, б), до того ж остання має абсцису точки перегину, що відповідає стрибку ідеальної характеристики (рис. 1).

Якість концентрату під час збагачення матеріалу із заданою функцією розподілу зростків (рис. 1, а) визначимо, як для випадку розділення реального сепаратора (β_1), так і ідеальною сепараційною характеристикою (β_2), користуючись виразами [3]:

$$\beta_1 = \frac{\int_0^1 \alpha F(\alpha) P_1(\alpha) d(\alpha)}{\int_0^1 F(\alpha) P_1(\alpha) d(\alpha)} = 0,848; \quad \beta_2 = \frac{\int_0^1 \alpha F(\alpha) P_2(\alpha) d(\alpha)}{\int_0^1 F(\alpha) P_2(\alpha) d(\alpha)} = 0,915. \quad (1)$$

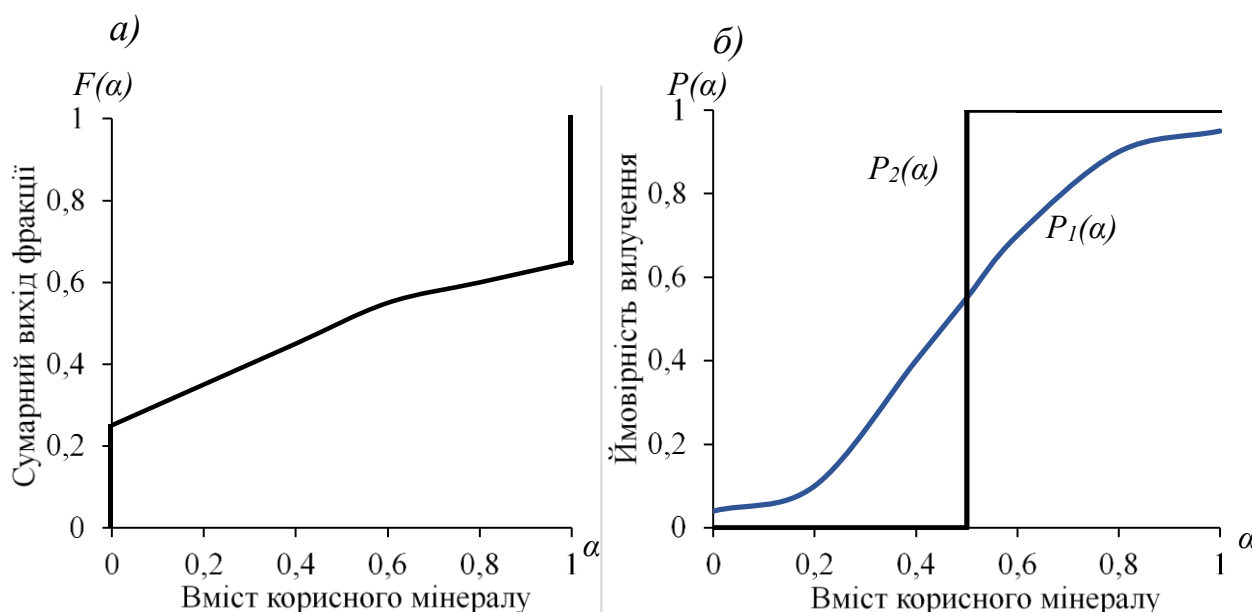


Рис. 1. Інтегральна функція розподілу зростків (а) та сепараційна характеристика (б): $P_1(\alpha)$ – деякого реального сепаратора; $P_2(\alpha)$ – ідеального

Таким чином, узявши відношення якості збагаченого продукту до теоретично можливого, отримаємо показник ефективності розділювального процесу (сепарації).

$$K_{\beta} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{0,848}{0,915} = 0,927.$$

Методика оцінки ефективності процесу розділення (сепарації) наступна.

1. Необхідно мати функцію розподілу зростків в інтегральному ($F(\alpha)$), або диференціальному вигляді ($f(\alpha)$) для матеріалу, який направляється на розділення (сепарацію).

2. Використовуємо сепараційну характеристику сепаратора, на якому відбувається розділення в промисловості, і визначаємо вміст цінного компонента в концентраті (β_1).

3. Використовуємо ідеальну сепараційну характеристику зі стрибком у точці перегину сепараційної характеристики реального сепаратора і визначаємо вміст цінного компонента в концентраті (β_2).

4. Оцінюємо ефективність сепарації K_{β} .

Діапазон зміни критерію має бути розділений на інтервали, які характеризують: низьку ефективність, середню і високу. Такими інтервалами можуть бути наступні межі зміни значення показника ефективності розділення (сепарації): $0 < K_{\beta} < 0,3$ – низька ефективність розділення; $0,3 < K_{\beta} < 0,8$ – середня; $K_{\beta} > 0,8$ – висока.

Дійсні межі визначаються в процесі використання нового критерія розділення.

У тому разі, коли сепаратор призначений для виділення хвостів, то найкраще значення якісного показника для відходів $v = 0$ і тому відношення показників якості відходів неможливе. Тоді слід брати до розгляду відношення якості збагачених продуктів.

Наприклад, нехай задано таку саму функцію розподілу зростків $F(\alpha)$ (див. рис. 1, а). Сепараційні характеристики для виділення відходів представлено на рис. 2: $P_1(\alpha)$ – деякого реального сепаратора, $P_2(\alpha)$ – ідеальна.

Користуючись виразами (1), визначимо якість концентрату для випадку розділення сепараційною характеристикою реального сепаратора (β_1), і ідеальною (β_2):

$$\beta_1 = 0,734; \quad \beta_2 = 0,693.$$

В цьому випадку, для того, щоб не отримати значення показника критерію розділення більше одиниці, що суперечить логіці, пропонується брати відношення якості концентрату, отримане за ідеальної сепараційної характеристики (β_2), до якості концентрату, отримане в реальному сепараторі (β_1). Тобто, при визначенні критерію розділення сепаратору, що призначений для виділення хвостів необхідно брати зворотнє відношення.

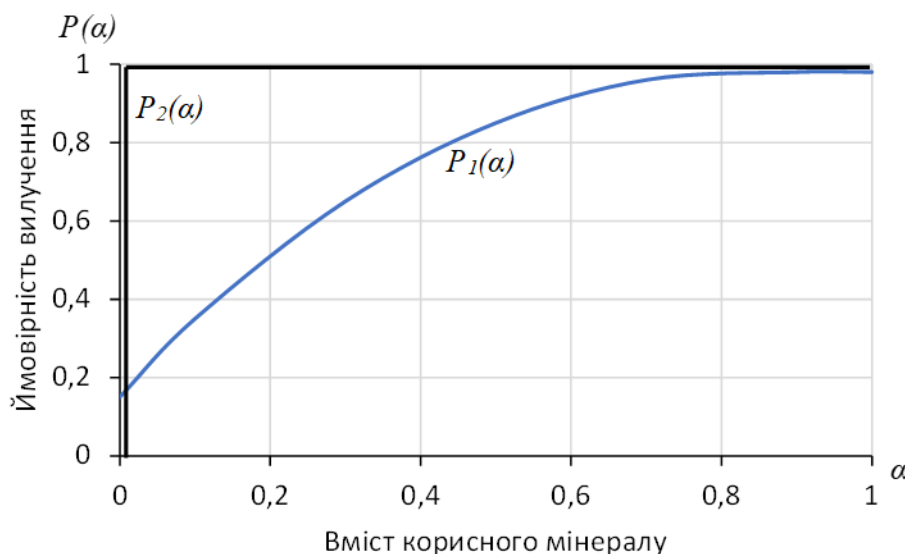


Рис. 2. Вигляд сепаратійної характеристики:
 $P_1(\alpha)$ – деякого реального сепаратора; $P_2(\alpha)$ – ідеальної

За цієї умови критерій розділення для розглянутого випадку становитиме:

$$K_v = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{0,693}{0,734} = 0,944.$$

Таким чином, під час оцінювання ефективності роботи сепаратора (розділювального процесу) коректніше користуватися не рівнянням Ханкока-Луйкена, який оцінює ефективність збагачення в цілому, тобто підготовку сировини до розділення та сам процес розділення, а показником, що дорівнює відношенню реально отриманої якості концентрату до якості концентрату, що буде отриманого при використанні ідеальної сепаратійної характеристики.

Висновки.

Процеси розділення є невід'ємною складовою освоєння природних ресурсів, оскільки корисні копалини у природі не трапляються в чистому вигляді, придатному до безпосереднього використання. Їх практичне застосування потребує попереднього збагачення, що передбачає підготовку сировини та подальше розділення на продукти з різним вмістом цінного компоненту.

Незважаючи на велику різноманітність сировини та методів розділення, всі ці процеси характеризуються спільними закономірностями та можуть бути описані єдиними математичними підходами. Це дозволяє узагальнювати досвід і застосовувати уніфіковані критерії для оцінювання ефективності збагачувальних технологій у різних галузях промисловості.

Технологічна ефективність процесів розділення визначається за трьома основними критеріями: вилученням, продуктивністю та якістю кінцевого продукту. Ці характеристики перебувають у взаємному протиріччі, тому досягнення оптимального балансу між ними є ключовим завданням інженерного проектування.

У разі багатокомпонентних систем або отримання кількох цінних продуктів складність оцінки ефективності розділення значно зростає, а оптимізація вимагає врахування складних технологічних і економічних взаємозв'язків. У таких умовах

звичайні технологічні показники втрачають однозначність і потребують переходу до узагальнених критеріїв, які враховують всі релевантні аспекти процесу.

Існуючі критерії ефективності розділення мають обмеження: жоден з них не відповідає в повній мірі усім вимогам – однозначності, повноти, універсальності, зручності та статистичної стійкості. Зокрема, економічні критерії потребують точних вихідних даних, які не завжди доступні, а технологічні – часто не враховують стратегічну доцільність або загальні втрати.

З-поміж відомих підходів найбільш узагальнений і поширений – критерій Ханкока-Луйкена, який дозволяє оцінити збагачення як сукупність процесів підготовки та розділення. Однак цей критерій є інтегрованим і залежить від ступеня підготовки сировини, що не дає змоги об'єктивно оцінити саме ефективність розділового обладнання.

Для ізольованої оцінки ефективності безпосередньо розділового процесу (сепарації) доцільно використовувати відношення реально досягнутої якості концентрату до максимально можливої якості, яка визначається на основі ідеальної сепараційної характеристики. Такий підхід дає змогу абстрагуватись від впливу зовнішніх факторів, таких як подрібнення чи зростки мінералів, та сконцентруватись на роботі конкретного сепаратора.

Запропонований показник ефективності K_β , є інформативним, простим для інтерпретації, не залежить від попереднього подрібнення і дозволяє нормувати ефективність у діапазоні від 0 до 1. Така уніфікація значень забезпечує зручність для практичного застосування, введення контролю якості, моніторингу у реальному часі та впровадження автоматизованих систем управління процесами.

Використання цього показника дає змогу проводити коректну оцінку роботи розділового апарату незалежно від ступеня підготовки сировини. Він також дозволяє проводити порівняльний аналіз між різними типами обладнання або умовами роботи, виявляти резерви підвищення ефективності, обґрунтовано обирати або коригувати технологічні схеми у процесі проєктування та експлуатації збагачувальних підприємств.

Перелік посилань

1. Білецький, В. С., Олійник, Т. А., Смирнов, В. О., & Скляр, Л. В. (2020). *Основи техніки та технології збагачення корисних копалин*. Київ: Ліра-К.
2. Грішин, М. В., & Беглов, К. В. (2021). Оцінка ефективності збагачення палива для зменшення ризику витрат ТЕС. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 32(71), 82–89. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/14>
3. Кравець, В. Г., Білецький, В. С., Смирнов, В. О., & Сергєєв, П. В. (2020). *Моделювання процесів збагачення корисних копалин*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
4. Младецький, І. К., & Пілов, П. І. (2005). *Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин*. Дніпропетровськ: НГУ.
5. Младецький, І. К., Пілов, П. І., Левченко, К. А., & Куваєв, Я. Г. (2019). *Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин*. Дніпро: Журфонд.
6. Алієв, Е.Б. (2018) Критерії оцінки якості процесу сепарації насінневої суміші. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 48, 170–175. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.135-142>

7. Hapich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., Rudakov, L., Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevych, V. (2022). Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10(116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>

ABSTRACT

Purpose. To justify the feasibility of applying a new criterion for evaluating the efficiency of separation processes, which enables an objective assessment of the performance of beneficiation equipment regardless of the degree of feed preparation.

The methods. The method of generalization of scientific information; analytical, probabilistic and statistical methods of research; mathematical modeling of the separator operation were used in the work.

Findings. The limitations of traditional criteria, such as the Hancock-Luiken index, in evaluating the separation stage were demonstrated. A new approach was developed to construct an efficiency criterion based on the ratio of the actual content of the valuable component to the theoretically achievable content under ideal separation conditions. A new indicator, K_β , was proposed, which reached a value of 0.927 in a test case, indicating high separator efficiency. For waste product separation, the criterion K_v was determined as 0.944. A performance scale was proposed: low (below 0.3), medium (0.3–0.8), and high (above 0.8).

The originality. A novel efficiency criterion based solely on separation parameters was developed for the first time, excluding the influence of feed preparation. The proposed approach enables comparison between actual and ideal separation curves, taking into account the form of the middlings distribution function. A mathematical relationship was established between concentrate quality and the shape of the separation curve, allowing reliable efficiency evaluation even for complex functional profiles.

Practical implementation. The proposed criterion enables the assessment of the performance of any individual separator regardless of grinding degree or raw material origin. It provides engineers and operators with the ability to identify bottlenecks in the technological flow, make informed decisions on equipment upgrades, and optimize processes without altering the entire technological chain. The quantitative value of the K_β indicator allows for the implementation of real-time efficiency monitoring, which is critical for automated control systems.

Keywords: separation processes, efficiency criterion, separation, separation curve, distribution function, concentrate quality, middlings.