

Kazimierz SZTABA, Barbara TORA

Instytut Przeróbki i Wykorzystania  
Surowców Mineralnych  
Akademii Górniczo-Hutniczej

## ANALIZA SKUTECZNOŚCI ODWADNIANIA KONCENTRATU MIEDZIOWEGO

**Streszczenie:** Odwadnianie drobnouziarnionych koncentratów, np. flotacyjnych jest po rozdrabnianiu, najbardziej energochłonnym procesem przeróbki kopalin. Przedstawiono propozycje możliwości określenia skuteczności trójstadijalnego procesu odwadniania na przykładzie układu odwadniania koncentratu miedzi. Do oceny poszczególnych etapów zaproponowano oceny jakościowe (oparte na określeniu wilgotności) ilościowe (uzysk), ogólne (wskaźnik Hancocka) oraz oceny energetyczne. Oceny energetyczne mają szczególne znaczenie dla porównywania energochłonności różnych procesów, a w szczególności optymalizacji wielostadijalnego układu odwadniania.

### i. Wstęp

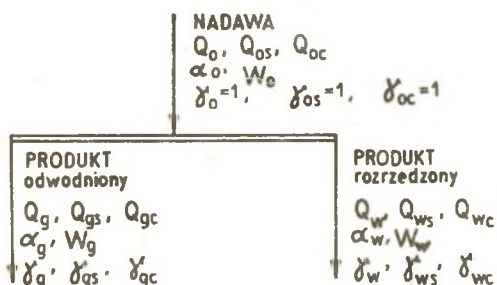
Procesy rozdziału faz: stałej i ciekłej, występują w przeróbce surowców mineralnych jako procesy przygotowawcze (np. zagęszczanie nadawy flotacyjnej), najczęściej jednak jako procesy uzupełniające, kończące każdy układ procesowy przeróbki prowadzonej na mokro, w postaci odwadniania jego produktów końcowych. Niezależnie od zadania nadawania tym produktom wygodnej dla odbiorców i zmniejszającej koszty transportu i składowania, postaci odwodnionej, procesy takie odgrywają istotną rolę w gospodarce wodno - mułowej zakładów, pozwalając odzyskiwać deficytową wodę w celu skierowania jej do obiegu technologicznego, lub oczyszczenia przed zrzuceniem do ogólnie dostępnej sieci wodnej. Są to więc procesy dwuproduktowe i odpowiadają wszelkim cechom procesów rozdzielczych, w których obowiązuje dbałość o wszystkie produkty rozdziału materiału wejściowego - nadawy. Wymaga to również traktowania oceny i analizy skuteczności tych procesów z uwzględnieniem efektu końcowego nie tylko w postaci jednostronnej oceny stopnia odwodnienia składnika stałego nadawy, lecz też określenia skuteczności procesu z punktu widzenia ilości, a także - często - jakości odzyskiwanej wody. Stawia to określone wymagania wobec metod przeprowadzania takiej oceny.

Niniejsze opracowanie przedstawia propozycje i możliwości określenia skuteczności procesów odwadniania, przy czym w charakterze przykładu ilustrującego stosowanie poszczególnych metod oceny, przyjęto procesy trójstadijalnego odwadniania drobno uziarnionego, flotacyjnego koncentratu miedziowego.

## 2. Określenie skuteczności odwadniania

Pod pojęciem skuteczności procesu technologicznego rozumie się powszechnie stosunek rzeczywistych wyników - określonych ilościowo - do wyników teoretycznie możliwych lub oczekiwanych. Spośród wielu metod określania skuteczności procesów rozdzielczych [1], do procesów odwadniania stosują się przede wszystkim metody z grupy technologicznych, jakie można z kolei podzielić na metody jakościowe, ilościowe i ogólne (rozpatruje się: jakość produktów, ilość produktów, obie charakterystyki równocześnie). Znaczna energochłonność procesów odwadniania uzasadnia dodatkowo stosowanie do ich oceny innej kategorii wskaźników - energetycznych, nie używanych zwykle do analizy innych procesów rozdzielczych, a mających bardzo bezpośredni związek m.in. z uniwersalnymi ocenami ekonomicznymi.

W dalszym ciągu będzie się rozpatrywać proces odwadniania według schematu z rys. 1.



Rys.1.

gdzie:

$Q$  - masa (ew. wydatek) strumienia materiału, [kg] lub [kg/s],

wskaźniki u dołu symboli głównych:

$o, g, w$  - nadawa, produkt odwodniony ("gęsty"), produkt rozrzedzony ("woda") - odpowiednio,

$s, c$  - faza stała, faza ciekła - odpowiednio (brak tych wskaźników oznacza sumę obu faz - materiał mokry)

$\rho$  - gęstość [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha$  - koncentracja masowa faz stałej w materiale mokrym:

$$\alpha = Q_s / Q$$

$W$  - koncentracja masowa wody (wilgotność):  $W = Q_c / Q$ ,

$$\alpha + W = 1,$$

$\gamma$  - wychód masowy (fazy stałej, wody lub ich mieszaniny) w stosunku do nadawy:

$$\gamma_g = Q_g / Q_0, \quad \gamma_w = Q_w / Q_0, \quad \gamma_{gs} = Q_{gs} / Q_{0s}, \quad \gamma_{gc} = Q_{gc} / Q_{0c} \quad \text{itd.}$$

Uwaga: koncentracje, wychody i wskaźniki technologiczne skuteczności rozdziału podaje się w niniejszym opracowaniu w postaci ułamków, w praktyce przemysłowej z reguły w procentach.

### 2.1. Oceny technologiczne

#### 2.1.1. Oceny jakościowe

Najprostszą, najpowszechniej stosowaną, lecz nie odpowiadającą wymaganiom wszechstronnej oceny procesu, omówionym we wstępie, wielkością pozwalającą na ocenę skuteczności odwadniania od strony jakościowej, jest wprost wilgotność produktu odwodnionego ( $E$  - skuteczność, oznaczenia dodatkowe kolejnych określić mają wyłącznie znaczenie porządkowe):

$$E_1 = W_g.$$

(1)

Wartość  $E_1$  powinna być jak najmniejsza, jeżeli nie wprowadza się ograniczeń. Te ostatnie występują często w postaci wilgotności żądanej (zakładanej), rozumianej jako maksymalna, dopuszczalna wilgotność produktu odwodnionego -  $W_g'$ . Jeżeli jest ona określona, to skuteczność odwadniania można wyrazić przez wilgotność zredukowaną produktu odwodnionego:

$$E_2 = W_g^* = W_g / W_g', \quad (2)$$

której wartość winna być utrzymywana na poziomie 1, lub

$$E_3 = \Delta W_g = W_g - W_g', \quad (3)$$

o wartości optymalnej = 0 (zero).

W systemie ocen jakościowych czystość (dokładność oczyszczenia produktu rozrzedzonego z fazy stałej), wyraża się:

$$E_4 = W_w = 1 - \alpha_w', \quad (4)$$

który to wskaźnik powinien przyjmować wartość jak najmniejszą, a gdy określa się maksymalną zawartość fazy stałej w tym produkcie -  $\alpha_w'$ , to

$$E_5 = \alpha_w / \alpha_w', \quad (5)$$

lub

$$E_6 = \Delta \alpha_w = \alpha_w - \alpha_w', \quad (6)$$

o wartościach optymalnych równych odpowiednio 1 i 0.

Skuteczność rozdziału w procesie odwadniania może być też określona za pomocą jednego z wskaźników selektywności, określających relacje pomiędzy wskaźnikami jakościowymi obu produktów [1], nie wydaje się jednak, aby ich zastosowanie było tu specjalnie celowe. Uwaga ta dotyczy tym bardziej innych, licznych wskaźników jakościowej oceny rozdziału.

### 2.1.2. Oceny ilościowe

Najważniejszą i praktycznie jedyną wielkością z grupy ocen ilościowych procesów rozdzielczych przeróbki kopalin, jest uzysk, określający stosunek ilości składnika nadawy, jaka została wydzielona we właściwym dla niego produkcie procesu, do ilości tego składnika w nadawie. W przypadku odwadniania, należy rozpatrywać uzysk ( $\epsilon$ ) fazy stałej w produkcie odwodnionym:

$$\epsilon_{gs} = \frac{Y_g \cdot \alpha_g}{\alpha_g} \quad (7)$$

oraz uzysk wody w produkcie rozrzedzonym

$$\epsilon_{wc} = \frac{Y_w \cdot W_w}{W_w} \quad (8)$$

charakteryzujące proces ze względu na stopień wydzielenia obu faz do odpowiednich produktów. Maksymalne uzyski obu składników (faz) w odpowiednich produktach wynoszą 1 (100%). W odróżnieniu od innych procesów przerobczych,

zwłaszcza wzbogacania, dla których zakłada się minimalne wartości uzysków składników użytecznych w koncentratkach, dla procesów odwadniania nie ustala się - jak dotychczas - analogicznych ograniczeń, co istotnie utrudnia ocenę procesów za pomocą tych bardzo użytecznych wskaźników.

Występujące w określeniach uzysku wartości wychodów nie są bezpośrednio dostępne dla pomiarów. Z reguły oblicza się je za pomocą wzorów wyprowadzonych z bilansu zawartości obu faz ( $\alpha$  i  $W$ ) w nadawie i produktach procesu:

$$\delta_g = \frac{\alpha_o - \alpha_w}{\alpha_g - \alpha_w} \quad \text{lub} \quad \delta_g = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_g} \quad (9)$$

oraz

$$\delta_w = \frac{\alpha_g - \alpha_o}{\alpha_g - \alpha_w} \quad \text{lub} \quad \delta_w = \frac{W_o - W_g}{W_w - W_g} \quad (10)$$

Oczywiście  $\delta_g + \delta_w = 1$ .

Wielkości występujące we wzorach (9) i (10) są dostępne dla bezpośrednich pomiarów w warunkach przemysłowych. Wprowadzone do wzorów (7) i (8) dają postacie, które mogą być wykorzystane również do bieżącego obliczania uzysków w systemie kontroli automatycznej.

Iloczyn uzysków fazy stałej w produkcie odwodnionym i fazy ciekłej w rozrzedzonym, daje możliwość ich jednoczesnego uwzględniania (unownie: uzysk skorygowany):

$$E_w = E_{wc} \cdot E_{gs} \quad (11)$$

który po odpowiednich podstawieniach, wyrażają wzory:

$$E_w = \frac{(\alpha_o - \alpha_w)(\alpha_g - \alpha_o)}{(\alpha_g - \alpha_w)^2} \cdot \frac{\alpha_g(1 - \alpha_w)}{\alpha_o(1 - \alpha_o)} = \frac{(W_o - W_g)(W_w - W_o)}{(W_w - W_g)^2} \cdot \frac{W_w(1 - W_g)}{W_o(1 - W_o)} \quad (12)$$

Maksymalna (optymalna) wartość tej wielkości, wynosi również 1, brakowi zróżnicowania jakości produktów (proces całkowicie nieefektywny) odpowiada jednak wartość  $> 0$ , co stwarza niedogodność pojęciową.

W przypadku założenia maksymalnej zawartości wody w produkcie odwodnionym -  $W'_g$ , można również określić minimalny uzysk wody w produkcie rozrzedzonym:

$$E_{wc}^* = 1 - \frac{(1 - \delta_w) W'_g}{W_o} \quad (13)$$

a stąd i uzysk zredukowany wody w tym produkcie:

$$E_w^* = E_{wc} / E_{wc}^* = \frac{\delta_w \cdot W_w}{W_o - (1 - \delta_w) W'_g} \quad (14)$$

o wartości optymalnej = 1. We wzorach (13) i (14) do użytku praktycznego, należy wprowadzić określenie wychodu  $w_g$  (10).

Wielkości (13) i (14) dają jednak tylko jednostronną ocenę procesu - ze względu na odzysk wody.



## 2.1.3. Oceny ogólne

Podobną rolę jak uzysk w grupie ocen ilościowych, spełnia w grupie ocen ogólnych, wskaźnik zaproponowany po raz pierwszy przez Hancocka, otrzymywany później wielokrotnie przez różnych autorów w tej samej postaci przy pozornie różnych założeniach wyjściowych. Jedną z wielu - najprostszą - definicją tego wskaźnika [2], jest:

$$E_H = E_{wc} - E_{ws} \quad (15)$$

Maksymalna wartość tego wskaźnika wynosi 1.

Po wprowadzeniu określeń (7) i (8) oraz (9) i (10), otrzymuje się wzory:

$$E_H = \frac{W_o - W_g}{W_w - W_g} \cdot \left( \frac{W_w}{W_o} - \frac{1 - W_w}{1 - W_o} \right) = \frac{\alpha_g - \alpha_o}{\alpha_g - \alpha_w} \cdot \left( \frac{1 - \alpha_w}{1 - \alpha_o} - \frac{\alpha_w}{\alpha_o} \right) \quad (16)$$

Mimo "uzyskowej" postaci określenia (15) można wykazać, że wskaźnik Hancocka uwzględnia zarówno ocenę jakościową, jak ilościową skuteczności procesu.

## 2.2. Oceny energetyczne

Autorzy niniejszego opracowania zaproponowali do oceny procesu odwadniania, wskaźniki określające zużycie energii na efektywne przeprowadzenie procesu odwadniania [3, 4]. Nie mają one charakteru bezwzględnych ocen skuteczności, ale pozwalają na ocenę porównawczą energochłonności różnych procesów odwadniania. Wskaźniki te nie mają jednolitej postaci. Dla każdego rodzaju procesu odwadniania konstruowane są odrębne wskaźniki zużycia energii z uwzględnieniem fizycznego charakteru procesu. Dla procesów występujących w odwadnianiu koncentratu flotacyjnego miedzi, są to: [3]:

- dla zagęszczania grawitacyjnego, praca siły ciężkości, wywołującej zmianę położenia środka ciężkości zawiesiny w wyniku jej rozwarstwienia:

$$E'_g = Q \cdot g \cdot \Delta s \cdot \frac{1}{q_{gs}} \quad [\text{J/kg}] \quad (17)$$

gdzie:  $Q$  - masa zawiesiny w zagęszczaczu  $[\text{kg}]$ ,

$g$  - przyspieszenie siły ciężkości  $[\text{m/s}^2]$ ,

$\Delta s$  - zmiana położenia środka ciężkości zawiesiny w zagęszczaczu w czasie sedymentacji  $[\text{m}]$ , wyznaczona z krzywej sedymentacji danej zawiesiny,

$q_{gs}$  - natężenie przepływu fazy stałej produktu odwodnionego  $[\text{kg/s}]$ ,

- dla filtracji podciśnieniowej: energia zużywana na wywołanie różnicy ciśnień po obu stronach przegrody filtracyjnej.

$$E'_f = A \cdot p \cdot \frac{V_N V_{p1}}{V_{ft}} \cdot \frac{1}{q_g} \quad [\text{J/kg}] \quad (18)$$

gdzie:  $A$  - powierzchnia filtracji [ $m^2$ ],

$p$  - podciśnienie [ $kPa$ ],

$V_N, V_{pl}, V_{ft}$  - natężenie przepływu odpowiednio nadawy, płacka filtracyjnego, filtratu [ $m^3/h^{-1}$ ].

- dla suszenia termicznego - zużycie energii cieplnej gazu do opalenia suszarki:

$$E_g' = \frac{1}{v_g} \cdot \frac{W_o - W_g}{T - W_o} \cdot q' \cdot \frac{1}{q_{gs}} \quad [J/kg] \quad (19)$$

gdzie:  $v_g$  - wartość opałowa gazu (dla opisywanego układu odwadniania 25100 [ $kJ/m^3$ ]),

$W_o, W_g$  - wilgotność nadawy i wysuszonego koncentratu,

$q'$  - współczynnik uwzględniający m.in. sprawność układu, temperaturę spalni, otoczenia, wody, koncentratu, (dla omawianej suszarki  $q' = 0.6242 \cdot 10^6$ ).

Aby uwzględnić również efekty technologiczne odwadniania, osiągnane w poszczególnych procesach, za wskaźniki skuteczności technologicznej przyjęto dla każdego procesu ilorazy tak otrzymanych wielkości przez stopień odwodnienia  $S = W_o/W_g$ , czyli

$$E = E'/S. \quad (20)$$

### 3. Oceny procesów odwadniania koncentratu miedziowego

Flotacyjny koncentrat miedziowy odwadnia się trójstadialnie, przy czym produkt odwodniony kolejnego stadium stanowi nadawę stadium następnego. Poszczególne stadia wykazują następujące wartości charakterystyk nadaw i produktów, przy odpowiednich wartościach założonych [4]:

stadium	proces	wartości założone		wartości rzeczywiste		
		$\frac{W_o}{}$	$\frac{W_g}{}$	$\frac{W_o}{}$	$\frac{W_g}{}$	$\frac{W_w}{}$
I	zagęszczanie grawitacyjne	-	0,53	0,808	0,578	0,996
II	filtracja podciśnieniowa	0,53	0,23	0,545	0,236	0,781
III	suszenie termiczne	0,23	0,07	0,236	0,641	-

Obliczenia przeprowadzone przykładowo przy użyciu podanych poprzednio wzorów (numery w nawiasach), dały następujące wyniki liczbowe:

stadium:	I	II	III
$E_2$ : (2)	1,09	1,03	0,91
$E_3$ : (3)	4,8	0,6	-0,59
$E_{wc}$ : (8)	0,679	0,813	0,794
$E_w$ : (12)	0,671	0,591	0,790
$E_w^*$ : (14)	0,962	0,994	1,046
$E_H$ : (16)	0,668	0,540	0,777
$E_g$ : (17), (20)	-862,668	-	-

$E_f$ : (18), (20)	-	• 118,107	-
$E_s$ : (19), (20)	-	-	302,97.10 <sup>6</sup>

Zagęszczanie grawitacyjne odbywa się bez dostarczania energii, stąd znak minus przy odpowiedniej wartości zużycia energii.

Analiza wartości współczynników oceny procesu odwadniania koncentratu miedziowego wykazuje m.in. poprawne wyniki poszczególnych stadiów odwadniania z punktu widzenia oddzielania w nich założonych ilości wody (wartości  $\epsilon_w^*$  bliskie jedności). Jeśli jednak traktować operacje odwadniania jako procesy, w których ważne jest również zachowanie się fazy stałej, to wynik oceny trudno uznać za zadowalający (wartości  $E_H$ ). Dotyczy to zwłaszcza II stadium odwadniania - filtracji podciśnieniowej, której produkt rozrzedzony - filtrat, zawiera nieuzasadnienie wysoką zawartość fazy stałej, tworząc w ten sposób zbędny, a z punktu widzenia energetycznego - niepożądany, znaczny obieg materiałów tej fazy w obrębie układu odwadniania (filtrat jest kierowany ponownie do zagęszczania).

Oceny energetyczne potwierdzają w ujęciu ilościowym - dotychczas nie spotykanym - prawidłowość preferencji tańszych - mniej energochłonnych operacji (zagęszczanie, filtracja) przed suszeniem, wykazującym energochłonność jednostkową o 6 rzędów wielkości wyższą, niż filtracja, a ok. 9 rzędów wyższą niż zagęszczanie grawitacyjne. Ta ostatnia ocena ulegnie pewnemu złagodzeniu po uwzględnieniu energetycznych "kosztów obsługi" procesu zagęszczania, a także filtracji pominiętych - jak już wspomniano - przy obliczaniu wartości przedstawionego wskaźnika. Będzie to przypuszczalnie zmniejszenie różnicy o 2 rzędy wielkości dla zęszczania, a o 1 rząd w przypadku filtracji, co i tak pozostawia olbrzymią różnicę.

Analiza wartości współczynników oceny skuteczności odwadniania daje więc możliwość wykrywania elementów układu, w których należy w pierwszym rzędzie poszukiwać rezerw technologicznych, a także ekonomicznych, w celu uzyskania poprawy działania procesu.

#### 4. Uwagi końcowe

- 4.1. Procesy odwadniania wymagają traktowania pod względem oceny ich skuteczności na równi z innymi procesami rozdzielczymi, występującymi w przeróbce surowców mineralnych.
- 4.2. Do oceny procesów odwadniania nadają się szczególnie niektóre - odpowiednio zmodyfikowane - sposoby oceny skuteczności technologicznej procesów rozdzielczych. Wyniki takich ocen mogą dać podstawę do formowania wniosków o kierunkach doskonalenia procesów.
- 4.3. Wnioski praktyczne istotne dla prowadzenia procesów wielostadialnych - z użyciem metod o zróżnicowanych podstawach fizycznych i energochłonności - daje analiza tych procesów (ich stadiów) przy użyciu specjalnie opracowanych kryteriów energetycznych.

Uwaga: Problemy oceny łącznej wielostadialnych układów odwadniania, również opracowywane przez autorów niniejszego doniesienia, nie mieszczą się w jego założonych ramach.

## Literatura

- [1] Barskij, L.A., Rubinstejn, Ju.B. - Kibernetičeskie metody v obogaščenii poleznych iskopaemych, Moskva, "Nedra" 1970.
- [2] Spravočnik po obogaščeniu rud. Podgotovitelnye processy. Moskva, "Nedra" 1982.
- [3] Tora, B., Sztaba, K. - Problemy oceny efektywności odwadniania koncentratów flotacyjnych na przykładzie koncentratu miedziowego. Materiały XVII Krakowskiej Konferencji Przeróbki Kopalini 1983.
- [4] Tora, B. - Model matematyczny i próba optymalizacji wielostadialnego układu odwadniania koncentratu miedzi na przykładzie ZWR "Rudna" praca doktorska, AGH, Kraków 1985.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Tadeusz PIECUCH

Wpłynęło do Redakcji 1987.02.28

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА

## Р е з ю м е

Обезвоживание мелкозернистых, например флотационных, концентратов является по энергоёмкости очередным после дробления процессом переработки минерального сырья. Авторы настоящего доклада предлагают методы оценки эффективности названного процесса, принимая в качестве примера трехстадийную систему обезвоживания медного, флотационного концентрата. Для оценки отдельных процессов предложены критерии: качественные базирующие на определении влажности продуктов, количественные извлечены, общие критерии Ханкока а также энергетические. Энергетические критерии имеют особенное значение для сравнения отдельных процессов, в частности в случае оптимизации многостадийной схемы обезвоживания.

## ANALYSIS OF EFFICIENCY OF COPPER CONCENTRATE DEWATERING

## S u m m a r y

Dewatering of fine-grained flotation concentrate is, beside comminution, the most energy consuming process of mineral processing. Proposals of method of efficiency of determination of the copper concentrate dewatering system are presented in the paper.

For evaluation of individual stages, the qualitate (based on determination of the moisture content), quantitative (yield), general (Hancock's index) and energetic criterions have been proposed. The energetic criterions are especially significant for comparison of the energy consumption of various processes especially in optimization of the multistadial dewatering system.