

Kazimierz SZTABA^xAlioja NOWAK^xBohdan MAKARY^xROZWÓJ ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH I METOD MODELOWANIA
PROCESÓW KLASYFIKACJI PRZEPLYWOWEJ

Streszczenie. W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych, które stanowią syntezę wieloletnich prac autorów nad problematyką klasyfikacji przepływowej. Opiszano warianty rozwiązań technologicznych klasyfikacji bardzo drobno uziarnionych zawiesin, przy zastosowaniu wielostopniowych układów hydrocyklonów lub wirówki klasyfikującej. Podano różne sposoby modelowania procesów rozdziału w urządzeniach odśrodkowych, na sicie łukowym i w klasyfikatorze lamelowym. Pokazano przykłady występowania efektów wzbogacania w procesach klasyfikacji.

W przeróbce surowców mineralnych proces klasyfikacji przepływowej znajduje najczęściej zastosowanie jako operacja przygotowawcza lub uzupełniająca. Jednym z nielicznych przykładów występowania klasyfikacji jako operacji głównej jest przeróbka surowców skalnych, głównie ilastych, gdzie poprzez odpowiedni rozdział ziarn na klasy uzyskuje się efekt wzbogacania.

Fakt, że klasyfikacja jest na ogół procesem przygotowującym materiał do dalszej przeróbki, nie umniejsza znaczenia tej operacji w układach technologicznych. W zakładach przemysłowych coraz częściej można zaobserwować traktowanie klasyfikacji jako pełnowartościowego procesu, który może przebiegać poprawnie tylko w ściśle określonych warunkach. Prawidłowy dobór tych warunków pozwala w szczególności na osiągnięcie wyższej ostrości rozdziału, która, w przypadkach gdy klasyfikacja jest operacją przygotowawczą, decyduje o właściwym przebiegu procesu wzbogacania, natomiast w przypadku gdy klasyfikacja jest operacją główną, niejednokrotnie warunkuje przydatność gotowego produktu do założonych celów. Ustalenie parametrów zapewniających żadaną, wysoką ostrość rozdziału jest zazwyczaj wynikiem wielu pracochłonnych badań nad wpływem tych czynników na dokładność procesu klasyfikacji.

^xInstitut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych - Akademia Górniczo-Hutnicza - Kraków.

Badania takie od szeregu lat prowadzone są w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH w Krakowie. Wobec konieczności klasyfikowania coraz bardziej drobnych ziarn dotyczą one głównie rozpoznania i opisu (modelowania), a także możliwości zastosowań praktycznych klasyfikacji drobno uziarnionych zawieszin w urządzeniach odśrodkowych. Zwraca się ponadto uwagę na celowość wielostronnego wykorzystywania procesów klasyfikacji materiałów o niejednorodnym składzie w kierunku łączenia efektów klasyfikacji ziarnowej, wzbogacania i zagęszczania, uzyskiwanych w jednym i tym samym procesie, co może mieć znaczenie dla upraszczania złożonych układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych o skomplikowanym składzie.

1. WYBRANE ROZWIĄZANIA TECHNOLOGICZNE

Dobór odpowiednich rozwiązań technologicznych klasyfikacji drobno uziarnionych zawieszin różnych surowców (głównie skalnych) w znacznym stopniu ułatwiały uzyskiwane równolegle wyniki badań nad modelowaniem procesu rozdziału w urządzeniach odśrodkowych. W zależności od wymagań stawianych gotowym produktom, do ich otrzymywania stosowano jedno- lub wielostopniowe schematy klasyfikacji. Weryfikację praktyczną prowadzono w zainstalowanym w IPIWSM AGH stanowisku badawczym, które pozwala na prowadzenie doświadczeń półciągłych w skali technologicznej, a składa się przede wszystkim z hydrocyklonów (stosuje się hydrocyklony o średnicach 100 i 80 mm lub baterie multihydrocyklonów 30 i 20 mm) wirówki VS 150 x 300 firmy Mumboldt-Wedag, sit łukowych, pompy wirowej do zawieszin oraz zbiorników o łącznej pojemności 1,6 m³.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazywały niejednokrotnie, że właściwą pod względem uziarnienia jakość produktów finalnych można otrzymać, stosując prosty układ technologiczny, pod warunkiem dotrzymania podanych parametrów konstrukcyjno-ruchomych urządzeń klasyfikujących. Jako przykład, należy podać opracowanie dotyczące wzbogacania zawęglonych glin białe wypalających się ze złoża Bolko [1, 5], gdzie uściślono zalecenia technologiczne, przyjmując ostatecznie najprostszy możliwy układ jednostopniowej klasyfikacji w hydrocyklonach \varnothing 80 mm materiału wstępnie rozszlianowanego i odsianego na sicie o otworach 0,5 mm. Taki sam układ technologiczny zaproponowano również do wzbogacania gliny ze złoża Janina Zachód. Otrzymany produkt drobno uziarniony (przelew HC-80) okazał się przydatny do produkcji wyrobów porcelitowych, w warunkach ZPS Tułowice [5].

Bardziej złożony problem wystąpił podczas wykonywania prac nad klasyfikacją (wzbogacaniem) kaolinów z różnych złóż. Liczne zastosowania kaolinu w poszczególnych gałęziach przemysłu powodują bowiem, że wymagania stawiane produktom przeróbki surowca przez odbiorców są silnie zróżnicowane i zawierają się na ogół w wąskich granicach tolerancji cech charakteryzujących te produkty.

W celu otrzymania koncentratu kaolinowego, o zawartości ziarn $< 10 \mu\text{m}$ co najmniej 95%, zastosowano dwustopniowy układ klasyfikacji w hydrocyklonach o różnych średnicach części cylindrycznej (80 i 30 mm) - z zawrotem wylewu stopnia drugiego do nadawy hydrocyklonów [2, 5]. Podany schemat technologiczny stanowi podstawę do projektowania oddziału produkcji kaolinu papierniczego w KSM SURMIN w Nowogrodźcu.

Prace nad otrzymaniem kaolinu powłokowego, który winien zawierać m.in. nie mniej niż 80% ziarn $< 2 \mu\text{m}$, przy określonych ograniczeniach w stosunku do zawartości ziarn większych (nie więcej niż 0,01% ziarn $> 63 \mu\text{m}$ i nie więcej niż 1% ziarn $> 20 \mu\text{m}$) wykazały, że przeprowadzenie procesu klasyfikacji dla osiągnięcia produktu końcowego o założonych własnościach, z możliwie znacznym uzyskiem klas najdrobniejszych - przy odpowiedniej wydajności urządzeń i niezbyt wysokich kosztach - staje się zadaniem bardziej skomplikowanym. Wyniki tych prac potwierdziły konieczność zastosowania do wymienionego celu kilkustopniowego układu klasyfikacji w hydrocyklonach o małych średnicach (30 i 20 mm) lub użycia wirówki klasyfikująco zagęszczającej [3, 4, 5]. W przypadku zastosowania hydrocyklonów $\varnothing 30 \text{ mm}$ żądany produkt (86% ziarn $< 2 \mu\text{m}$) można otrzymać w trzecim stopniu rozdziału (po wcześniejszej, kilkustopniowej klasyfikacji wstępnej w klasyfikatorach spiralnych i hydrocyklonach $\varnothing 80 \text{ mm}$). Klasyfikacja podobnie przygotowanej zawiesiny w wirówce, pozwala na uzyskanie w jej przelewie około 90% zawartości klasy 0-2 μm przy znacznie wyższej, niż w przypadku hydrocyklonów, koncentracji fazy stałej w nadawie i obu produktach rozdziału. Wskazuje to na możliwość zastosowania wirówek równocześnie do klasyfikacji i zagęszczania kaolinów. W procesie klasyfikacji prowadzonym w optymalnych warunkach otrzymać można zagęszczony wylew, który pod względem uziarnienia jest normowym kaolinem ceramicznym, i przelew, który spełnia wymagania dla kaolinu do powlekania papieru [6].

Zagadnienie występowania efektu wzbogacania w procesie klasyfikacji uwydatniło się wyraźnie podczas opracowywania technologii przeróbki zwietrzeliwy bazaltowej, w celu uzyskania surowca do produkcji tlenku glinu [5, 7]. Dzięki zmiennej zawartości podstawowych składników chemicznych (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2) w poszczególnych klasach ziarnowych zwietrzeliwy ze złoża w Duninie, rozdrobnionej do uziarnienia 0-1 mm, udało się w procesie jednostopniowej klasyfikacji w hydrocyklonie $\varnothing 100 \text{ mm}$ otrzymać zgodne z wymaganiami produkty: - drobno uziarniony o zawartości Fe_2O_3 max. 7%, Al_2O_3 - 34% i grubo uziarniony o zawartości Fe_2O_3 - 30%, TiO_2 - 5%, Al_2O_3 - 22%.

Istotne zróżnicowanie zawartości składników różniących się gęstościami w wylewie i przelewie hydrocyklonów zaobserwowano także w procesie klasyfikacji rudy miedzi. Wielkość tego zróżnicowania uzasadnia możliwość uzyskania na tej drodze konkretnych efektów w zakresie produkcji koncentratów o założonych zawartościach składników o wybranych zakresach gęstości [8].

2. MODELOWANIE PROCESÓW KLASYFIKACJI PRZEPLYWOWEJ

W Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH od szeregu lat prowadzone są prace nad modelowaniem procesu rozdziału w różnego rodzaju urządzeniach klasyfikujących. W pracach tych przyjmowano rozmaite metody modelowania, oraz różne, odpowiadające im założenia wyjściowe. W szczególności można wymienić drogę heurystyczną i fenomenologiczną, które z biegiem czasu powinny doprowadzić - poprzez uzupełnienie opisów uzyskiwanych na kolejnych etapach tej pracy - do otrzymania jednolitych modeli zawierających zarówno "jądro" deterministyczne, możliwe ściśle odpowiadające zespołowi jednostkowych oddziaływań fizycznych i fizykochemicznych, decydujących o ogólnym przebiegu procesu i stanowiących jego podstawę, jak też zapis efektów oddziaływań stochastycznych, występujących zawsze w procesach rzezywistych i modyfikujących w określony sposób - którego ściśle opis jest również przedmiotem naszych badań - ich ostateczny wynik. Należy jednak podkreślić, że wielowymiarowość i stochastyczny charakter omawianych procesów, nie dają możliwości otrzymania w pojedynczym ujęciu na jakiegokolwiek drodze modeli w pełni adekwatnych, które miałyby poza walorami czysto utylitarnymi, formalną zgodnością z przebiegiem procesu, także walory poznawcze - ujawniające podstawowe mechanizmy procesów. Stąd też przyjęto, w większości naszych prac dotyczących opisu procesów, procedurę zakładającą sekwencyjne doskonalenie modeli, poczynsz od ich konstrukcji heurystycznej i formalnej. Dotychczasowe wyniki badań nad modelowaniem procesu klasyfikacji nie upoważniają do stwierdzenia, że proces ten jest już dokładnie poznany i można łatwo, a jednocześnie dokładnie, przewidywać jego wyniki, a także, iż został opanowany problem ustalania warunków konstrukcyjnych i ruchowych pracy urządzeń w takim stopniu, aby można było mówić o sterowaniu procesem. Ułatwiają one natomiast podejmowanie decyzji co do sposobu stosowania poszczególnych urządzeń w konkretnych rozwiązaniach praktycznych.

2.1. Proces rozdziału w hydrocyklonach

Przedmiotem badań była zależność wskaźników technologicznych procesu rozdziału, takich jak: wielkość ziarna podziałowego, dokładność rozdziału nadawy na produkty (ostrość), natężenie przepływu, ilościowy rozdział zawiesziny i ciała stałego - od parametrów konstrukcyjnych i warunków ruchowych pracy hydrocyklonów. Przebadano wpływ praktycznie wszystkich parametrów konstrukcyjnych, analizując nawet takie, które w dotychczasowych pracach były mało rozpoznawane, a więc na przykład kształt otworu wlotowego hydrocyklonu i wielkość zagłębienia dyszy przelewowej [9, 10]. Dysponując stosunkowo dużą liczbą (ponad 800) wyników doświadczeń, wykonanych na naszych stanowiskach badawczych, jak również znaczną liczbę doświadczeń przemysłowych zrealizowanych przez naszych pracowników lub inne jed-

nostki badawcze, wykonano szereg obliczeń numerycznych z wykorzystaniem różnego rodzaju regresyjnych programów komputerowych. Otrzymane modele regresyjne występujących zależności pozwoliły na weryfikację ogólnie znanych 7 wzorów na natężenie przepływu i wielkość ziarna podziałowego oraz sformułowanie nowych postaci tych wzorów [3, 9, 11]. Równocześnie, dla celów praktycznych, skonstruowano nomogramy wpływu podstawowych parametrów konstrukcyjnych i ruchowych (d_p , d_w , α , p) na wielkość ziarna podziałowego, przy możliwie maksymalnej ostrości rozdziału dla hydrocyklonów o średnicy części cylindrycznej $D = 30$ mm, 100 mm, 200 mm, 350 mm [3, 9, 12]. Najnowsze badania wykorzystują zgromadzoną bazę danych doświadczalnych do weryfikacji modeli powstających w wyniku zastosowania do ich budowy odpowiednich procedur analizy wymiarowej. Otrzymane zapisy funkcyjne wykazują stosunkowo dużą zgodność wyników doświadczalnych z prognozowanymi na ich podstawie wskaźnikami rozdziału [9].

2.2. Proces rozdziału w wirówce

Przystępując do opisu procesu rozdziału jednorodnych ziarn mineralnych w przestrzeni roboczej wirówki klasyfikująco zagęszczającej, wybrano drogę heurystyczną. W bilansie sił działających na ziarna w kierunku radialnym uwzględniono zarówno oddziaływania zdeterminowane, wyznaczające charakterystykę ruchu ziarn dla przypadku doskonałego, jaki miałyby miejsce przy idealnym przepływie swobodnym, jak i oddziaływania losowe, zakłócające rzeczywisty przebieg torów ziarn w opisywanym urządzeniu (siły gradientowa i pochodząca od uderzeń innych ziarn, niestabilność przepływu zawiesiny, jej lokalne zawirowania, ewentualny wpływ ślimaka wyprowadzającego wylew [4, 13]). Szczegółowa analiza czynników wpływających na proces klasyfikacji w wirówce doprowadziła również między innymi do zdefiniowania nowego współczynnika kształtu ziarn rzeczywistych o nieregularnych postaciach [4, 14]).

W dalszym etapie badań wykazano możliwość efektywnego uwzględniania i ilościowego oszacowania działania obu wymienionych grup czynników za pomocą znanych i nowo wprowadzonych (związanych głównie z oddziaływaniami losowymi) charakterystyk liczbowych procesu. Opracowano metody wyznaczania składów ziarnowych i koncentracji fazy stałej w strefie klasyfikacji wirówki w różnych odległościach od jej osi [13, 9]).

Do weryfikacji założonego modelu procesu klasyfikacji jednorodnych ziarn mineralnych wykorzystano wyniki wielu doświadczeń nad rozdziałem drobno uziarnionych zawiesin (głównie kaolinu) w wirówkach ślimakowych VS 150 x x 300 i Dynacone 612. Porównanie prowadzone opierając się na związkach korelacyjnych i regresyjnych pomiędzy warunkami prowadzenia procesu (zawartość klasy najdrobniejszej w nadawie, wydatek objętościowy i koncentracja fazy stałej w nadawie, długość strefy klasyfikacji, prędkość kątowna bębna, promień proggu przelewowego), charakterystykami liczbowymi rozdziału

(d_{50} , rozproszenie ziarn, odchylenie standardowe rozkładu, charakterystyka anomalii krzywych rozdziału, wielkość opisująca stopień deformacji torów ziarn) i wskaźnikami technologicznymi produktów wirowania (wychody produktów, wydatki objętościowe przepływu, zawartość fazy stałej).

2.3. Inne rodzaje procesów

Duże wydajności sit łukowych i otrzymywanie mało zanieczyszczonego produktu dolnego, w którym wielkość ziarn jest dodatkowo od góry ograniczona przez szerokość szczeliny sita uzasadniają dokładniejsze zajęcie się mechanizmem rozdziału w tym urządzeniu.

Opracowano metodę wyznaczania efektywnej wielkości otworu sita łukowego, określając warunki przepływu po jego powierzchni zawiesziny zawierającej materiał podlegający klasyfikacji. Korzystając z wyników wykonanych doświadczeń przeprowadzono ocenę skuteczności rozdziału na sicie łukowym [9].

Jednym ze sposobów zwiększenia wydajności urządzeń sedymentacyjnych jest wykorzystanie zjawisk zachodzących w przepływach cienkowarstwowych. Wynika stąd celowość opisu procesu rozdziału w takich urządzeniach. Opracowano więc formułę określającą kształt krzywej rozdziału w idealnym procesie klasyfikacji zachodzącym w ukośnym, elementarnym strumieniu klasyfikatora lamelowego. Obliczono teoretycznie i zweryfikowano doświadczalnie wartości niektórych wskaźników statystycznej oceny ostrości rozdziału [9].

W ostatnich dwu latach podjęto również próbę opisu procesu klasyfikacji w klasyfikatorach powietrznych w związku z koniecznością szerszego wprowadzania tych urządzeń do rozdziału ziarn drobnych. Przeprowadzono szereg badań nad ustaleniem wpływu parametrów konstrukcyjnych i ruchowych na wyniki rozdziału w klasyfikatorze poziomo-prądowym, formułując równocześnie regresyjne modele rozdziału [9].

Można uważać, że osiągnięto już znaczący postęp w kierunku pełnego opisu ważnego procesu technologicznego, jakim jest klasyfikacja przepływowa, przeprowadzonego w różnych urządzeniach i warunkach. Otrzymywane wyniki są bieżąco wykorzystywane przy opracowywaniu wspomnianych już, praktycznych zadań szczegółowych, dotyczących głównie rozdziału drobno uziarnionych surowców ilastych. Badania i formułowanie propozycji praktycznego stosowania ich wyników, są kontynuowane. Założonym celem końcowym jest pełne opracowanie podstaw i możliwości sterowania omawianym procesem przy całej różnorodności wariantów jego zastosowań i przebiegu.

LITERATURA

- [1] Opracowanie zasad gospodarowania zasobami glin biało wypalających się. Sprawozdanie z pracy w ramach CPBR 1.7.07b, 1987, 1988, 1989 r. Biblioteka IPiWSM AGH Kraków.
- [2] Makary B., Nowak A.: Propozycja technologii otrzymywania kaolinów papierniczych. Seminarium nt. "Fizykochemiczne problemy mineralurgii". Zeszyt nr 21, Wrocław 1989 r.
- [3] I Seminarium nt. "Klasyfikacja materiałów drobno uziarnionych. AGH Kraków, listopad 1981.
- [4] Makary B., Nowak A., Sztaba K.: Koncepcja wielostadialnego procesu klasyfikacji do uzyskania 80% ziarn o wielkości $< 2 \mu\text{m}$ z surowca kaolinowego Kalno. Górnictwo z. 90, Kraków 1978 r.
- [5] Nowak A., Makary B.: Rozdział drobno uziarnionych zawieszin surowców skalnych w polu siły odśrodkowej. Górnictwo z. 146, AGH, Kraków 1989 r.
- [6] Nowak A., Makary B.: Badania nad technologią przeróbki i uszlachtowania surowców ilastych, Etap III Opracowanie wariantów klasyfikacji i zagęszczania kaolinów uszlachtowanych 1983 r. Biblioteka IPiWSM AGH, Kraków.
- [7] Makary B.: Badania w skali półtechnicznej klasyfikacji surowca glinowego jako etap wstępny jego kompleksowego wykorzystania ZUT NOT w Tarnowie 1988, 1989 r.
- [8] Sztaba K., Nowak A., Makary B.: Występowanie efektów wzbogacania w procesach klasyfikacji przepływowej na przykładzie wybranych surowców mineralnych, Górnictwo z. 146, Kraków 1989 r.
- [9] Klasyfikacja zawieszin drobnoziarnistych w polu odśrodkowym PMBI I/A, Sprawozdania 1976-1980 r. Klasyfikacja przepływowa ze szczególnym uwzględnieniem klasyfikacji w polu odśrodkowym PMBP I/17 Sprawozdania 1981-1985 r. Badanie procesów przepływowych w przeróbce surowców mineralnych. Sprawozdania CPBP 03.07.05 1986-1989 r. Biblioteka IPiWSM AGH, Kraków.
- [10] Makary B., Sztaba K.: Zum einfluss der Gestaltung von einlauf und überlaufdüse auf die Trennschärfe von Hydrozyklonen mit kleinem nennndurchmesser. Freiberg 1984 r., DDR.
- [11] Makary B., Potępa A.: Statistische verifikation mancher formeln für Durchsatzes und Trennteilchengröße in Hydrozyklon mit einem Durchmesser von 20-100 mm Freiberg 1982 r., DDR.
- [12] Makary B., Ostrowicki B., Potępa A.: Über ein Verfahren zur Berechnung der Parameter von Hydrozyklonen zum klasieren feinkörniger Stoffe - 16 Diskussionstagung Mechanische Flüssigkeitsabtrennung. Magdeburg DDR, 1979 r.
- [13] Nowak A.: Charakterystyki rozdziału jednorodnych ziarn mineralnych w wirówkach klasyfikujących. PWN, Kraków 1981 r.
- [14] Nowak A., Sztaba K.: Zur Berücksichtigung der Kornform bei der Teilchenbewegung in einem Fluid, Materiały Konferencyjne, Freiberg, DDR, 1983 r.
- [15] Sztaba K.: Problemy technologiczne wzbogacania materiałów bardzo drobno uziarnionych. Seminarium "Fizykochemiczne problemy mineralurgii" z. 21, Wrocław 1989 r.
- [16] Badania nad efektami wzbogacania w procesach klasyfikacji przepływowej - Sprawozdania 1983-1985, Biblioteka IPiWSM, AGH w Krakowie.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУЙНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Р е з ю м е

В докладе представлено синтез различных результатов экспериментальных и теоретических исследований, полученных авторами во время многолетних работ в области струйной классификации.

Описаны варианты технологических решений классификации очень мелкозернистых материалов с использованием многоступенчатых схем включающих гидrocиклоны и седиментационные центрифуги.

Представлены различные методы моделирования процессов разделения в центробежных устройствах, на дуговых грохотах и в тонкоструйных, наклонных классификаторах.

Показаны примеры выступления эффектов обогащения в процессах классификации.

THE EVOLUTION OF THE TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AND METHODS OF MODELLING OF FLOW CLASSIFICATION PROCESSES

S u m m a r y

The paper presents the synthesis of numerous results both practical experiments and theoretical consideration, obtained by the authors over a longer time of studies on flow classification processes. The various variants of the technological solutions of the classification of very fine grained suspensions using systems of multistadial hydrocyclones or the solid bowl centrifuges are described. The different ways (methods) of modelling of distribution processes in centrifugal devices, on the bend sieves and in the lamela classifier are presented. The examples of beneficiation effects in the classification processes are shown.