

A3809 I

D2.12



# FIZYKOCHEMICZNE PROBLEMY MINERALURGII

ZESZYT Nr 26



PHYSICOCHEMICAL PROBLEMS  
OF MINERAL PROCESSING

WROCLAW 1992

**MINING COMMITTEE OF POLISH ACADEMY OF SCIENCES**  
Section of Mineral Processing

**TECHNICAL UNIVERSITY OF WROCLAW**  
Institute of Machine Design and Operation

**ACADEMY OF MINING AND METALLURGY, KRAKÓW**  
Institute of Mineral Processing and Utilization

**CENTRAL INSTITUTE OF MINING, KATOWICE**

**SILESIAN TECHNICAL UNIVERSITY OF GLIWICE**  
The Department of Mineral Processing and Waste Treatment

**INSTITUTE OF NON-FERROUS METALS, GLIWICE**

# **PHYSICOCHEMICAL PROBLEMS OF MINERAL PROCESSING**

**No. 26, 1992**

**Address of the Editorial Board:**

**Technical University of Wrocław**  
Institute of Mining Engineering  
Laboratory of Mineral Processing  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław, Poland  
Phone: (4871) 20-24-76,  
telex: 0712254 pwr pl, fax: (4871) 22-36-64  
E-mail (bitnet): drzymala@plwrtu11

**WROCLAW 1992**

**KOMITET GÓRNICTWA POLSKIEJ AKADEMII NAUK**  
**Sekcja Wykorzystania Surowców Mineralnych**

**POLITECHNIKA WROCLAWSKA**  
**Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KRAKÓW**  
**Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych**

**GLÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA, KATOWICE**

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA, GLIWICE**  
**Katedra Przeróbki i Utylizacji Odpadów Mineralnych**

**INSTYTUT METALI NIEŻELAZNYCH, GLIWICE**

# **FIZYKOCHEMICZNE PROBLEMY MINERALURGII**

**ZESZYT 26, 1992**

**IV Seminarium**  
**Materiały bardzo drobno uziarnione**



**Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej**  
**Wrocław 1992**

## KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor Zeszytu Nr 26:

Dr inż. Janusz GOGAŁA

Rada redakcyjna:

Dr inż. Zofia BLASCHKE

Prof. dr hab. inż. Witold CHAREWICZ

Dr Jan CZARNECKI

Doc. dr hab. inż. Janusz GIRCZYS

Doc. dr inż. Jerzy ISKRA

Prof. dr hab. inż. Janusz LASKOWSKI

Dr inż. Janusz LEKKI

Dr inż. Andrzej ŁUSZCZKIEWICZ

Prof. dr hab. Andrzej POMIANOWSKI, przewodniczący

Dr inż. Sławomir SOBIERAJ

Prof. dr hab. Jerzy SZCZYPA

Prof. dr hab. inż. Kazimierz SZTABA

Redakcja techniczna:

Ewa GOŁUCH

Czytelników prosi się o zwrócenie uwagi na fakt, że począwszy od zeszytu nr 11 nazwa naszego czasopisma FIZYKOCHEMICZNE PROBLEMY PRZERÓBKI KOPALIN uległa zmianie na FIZYKOCHEMICZNE PROBLEMY MINERALURGII

Artykuły przyjęte od Autorów bez wprowadzania zmian zakwalifikował do druku na podstawie recenzji Komitet Redakcyjny

The papers, included in this book are printed without modification on responsibility of the authors

### Adres Redakcji:

Zakład Przeróbki Kopalini i Odpadów, Instytut Górnictwa  
Politechniki Wrocławskiej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Tel.: 202-476, fax: 223-664, telex: 0712254 pwr pi,

E-mail (bitnet): drzymala@plwrtu11

ISSN 0137-1282

Oddano do druku w sierpniu 1992 r. Druk ukończono we wrześniu 1992 r.

Papier offset. kl. III, 70 g, B1. Ark. wyd. 5. Ark. druk. 4 <sup>1</sup>/<sub>2</sub>.

Zakład Graficzny Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 525/92.

## SPIS RZECZY

Od redaktora .....	5
Sztaba K., Warunki i możliwości rozbudowy i ujednoczenia opisów modelowych procesów klasyfikacji przepływowej .....	7
Nowak A., Makary B., Sztaba K., Badanie dokładności rozdziału w poziomoprądowym klasyfikatorze powietrznym .....	17
Grzelak E., Klasyfikacja hydrauliczna drobnych cząstek i zawiesin..	25
Gogała J., Wpływ zastosowania wirnika w klasyfikatorze wirowym WK-400 na efekty klasyfikacji .....	33
Modzel P., Zastosowanie metody fotografii plamkowej do badania pola prędkości chwilowej przepływów dwufazowych .....	41
Heim A., Monodispersyjność układów mielonych w młynach perełkowych	49
Sidor J., Wstępne badania prototypowego, przemysłowego młyna obrotowo-wibracyjnego do bardzo drobnego mielenia tlenku glinu ....	57
Pawluk T., Paprotny Wł., Czachor G., Ocena uziarnienia pyłów na podstawie ich obrazów dyfrakcyjnych - Komunikat .....	65
Pawluk T., Czachor G., Paprotny Wł., Dobór struktury modelu cechowania w dyfrakcyjnej metodzie pomiaru składu ziarnowego .....	69

## CONTENTS

Foreword .....	5
Sztaba K., Conditions and Possibilities of Extension and Unification of Model Descriptions of Processes of the Flow Classification .....	7
Nowak A., Makary B., Sztaba K., The Investigation of Separation Sharpness in the Horizontal Air Classifier .....	17
Grzelak E., Hydroclassification of Small Particles and Suspensions .....	25
Gogała J., Influence of a Rotor Applied in a Pneumatic Classifier upon the Separation Results .....	33
Modzel P., Application of Speckle Photography in an Investigation of Two-Phase Flow Field Velocity .....	41
Heim A., Monodispersiveness of Substances Ground in Perl Mills ...	49
Sidor J., Preliminary Tests of a Prototype of the Industrial Rotary-Vibration Mill for Fine Milling of Aluminium Oxide .....	57
Pawluk I., Paprotny Wł., Czachor G., Estimation of the Particle Size Distribution of Dust Using its Diffraction Patterns .....	65
Pawluk I., Czachor G., Paprotny Wł., Choice of Calibration Model Structure for the Diffraction Method Measurement of Particle Size Distribution .....	69

## OD REDAKTORA

"Celem konferencji jest stworzenie platformy wymiany doświadczeń i dyskusji na temat dalszych przedsięwzięć badawczych, technologicznych, konstrukcyjnych i innych, jakie należy podjąć w kierunku pełnego opanowania omawianego procesu, którego zakres zastosowań będzie się rozszerzać w miarę np. powiększania stopnia wykorzystania surowców wtórnych i odpadowych, charakteryzujących się szczególnie wielkim rozdrobnieniem i rozproszeniem składników użytecznych". Tym cytatem z Wprowadzenia do I Seminarium można określić również cel obecnego seminarium. Począwszy od III Seminarium, które odbyło się w 1985 r., rozszerzono tematykę o pozyskiwanie oraz identyfikację materiałów drobnouziarnionych.

Pierwsze Seminarium odbyło się w 1981 r. i zostało zorganizowane przez Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH przy współudziale Oddziału Krakowskiego NOT. Następne Seminarium odbyły się w latach 1985 i 1988. Organizacji IV Seminarium podjął się Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej przy współpracy z Instytutem Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Utworzono Komitet Organizacyjny Seminarium w składzie: prof.zw.dr hab.inż. K. Sztaba - przewodniczący, doc.dr inż. J. Tešiorowski - wiceprzewodniczący, dr inż. I. Kuczyńska - członek Komitetu Organizacyjnego i niżej podpisany jako sekretarz naukowy Seminarium.

W Instytucie KiEM od 25 lat zajmowano się problematyką maszyn do rozdrabniania i klasyfikacji kopalin. Początkowo badano zagadnienia związane z przemiałem strumieniowym, a później zajmowano się maszynami do rozdrabniania i klasyfikacji w technologii suchej. W Instytucie KiEM prowadzone są zajęcia dydaktyczne związane z tą tematyką.

Obecne IV Seminarium odbywa się w ramach XXIX Seminarium pt.: Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, którego tematyka jest luźno związana z zagadnieniami pozyskiwania i klasyfikacji materiałów drobnouziarnionych. W tym miejscu chcę podziękować organizatorom XXIX Seminarium, pracownikom Wydziału Górniczego Politechniki Wrocławskiej, za pomoc w przygotowaniu IV Seminarium i cenne uwagi związane z edycją niniejszego zeszytu.

Redaktor

dr inż. Janusz Gogała

*Kazimierz SZTABA\**

## **WARUNKI I MOŻLIWOŚCI ROZBUDOWY I UJEDNOLICENIA OPISÓW MODELOWYCH PROCESÓW KLASYFIKACJI PRZEPIYWOWEJ**

Procesy klasyfikacji przepływowej odgrywają szczególną rolę w technologii materiałów drobno uziarnionych. Podstawowy zakres opisu tych procesów nie obejmuje licznych uzależnień od warunków ich rzeczywistego przebiegu. Wielka różnorodność praktycznych realizacji klasyfikacji przepływowej utrudnia ich wzajemne porównywanie, niezbędne przy wyborze rozwiązań najkorzystniejszych. Przedstawiono przegląd uwarunkowań takich procesów z próbą ich systematyzacji i określenia grup wielkości zmiennych, charakteryzujących różne realizacje. Może on być punktem wyjścia do stopniowego ujednocenia modeli procesów klasyfikacji.

### **1. WPROWADZENIE**

Procesy przepływowe (strumieniowe, hydro- i aerodynamiczne, grawitacyjne, odśrodkowe) występują w przeróbce materiałów uziarnionych w licznych zastosowaniach, z których podstawowe, to: klasyfikacja ziarnowa, wzbogacanie ("grawitacyjne") i odwadnianie. W niniejszym opracowaniu omawiane są wyłącznie na przykładzie operacji klasyfikacji ziarnowej, możliwej do przeprowadzenia w zakresie ziarn bardzo drobnych, praktycznie wyłącznie jako proces przepływowy. Założenia tego opracowania są jednak szersze - stanowi ono próbę przedstawienia perspektyw rozwijania opisów (modeli) takich procesów z ich stopniowym ujednoceniem dla rozlicznych, różnorodnych realizacji technicznych, aż do umożliwienia - w przyszłości - utworzenia w miarę ogólnego zapisu modelowego, obejmującego większość (wszystkie?) takich realizacji. W związku z takim zamierzeniem, w treści opracowania znajdują się odwołania do innych - niż klasyfikacja - zastosowań procesów przepływowych, włączając także przypadki charakterystyczne dla technologii materiałów o uziarnieniu nie kwalifikującym ich do grupy drobno uziarnionych.

### **2. PODSTAWOWE UWARUNKOWANIA PROCESÓW PRZEPIYWOWYCH**

Jak wiadomo [1 i in.], podstawę procesów przepływowych stanowi bilans sił działających na ziarno (dalej jako przykładowe powołuje się ziarna mineralne), znajdujące się w obszarze przestrzennym, wypełnionym ośrodkiem płynnym i poddane wyłącznie działaniu sił

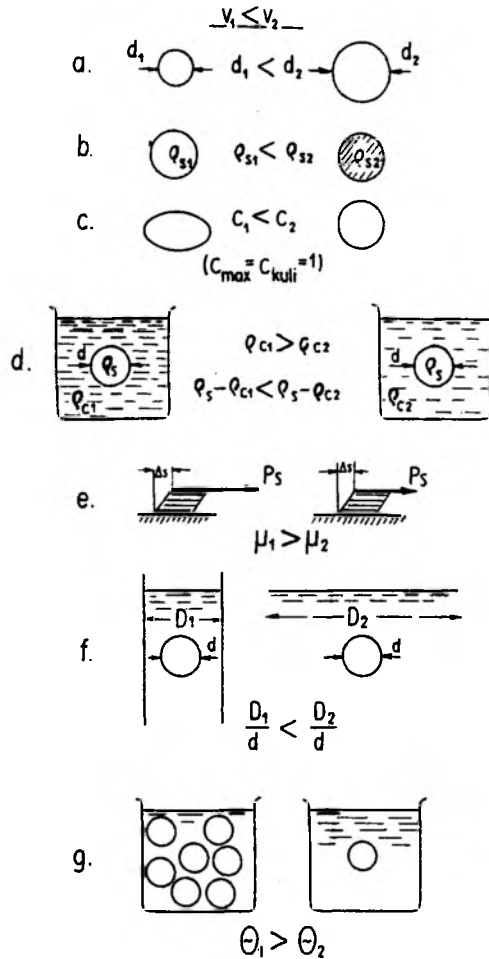
---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie - Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych, al. Mickiewicza 30, PL 30-065 Kraków



pochozących od pola zewnętrznego, obejmującego ziarno wraz z otaczającym je ośrodkiem - siły masowe ( $P_m$ ) oraz sił reakcji ośrodka na obecność i ruch ziarna - siły powierzchniowe ( $P_p$ ). (Uwaga: w całym opracowaniu przyjmuje się, że wszystkie wielkości są wyrażone w jednostkach podstawowych układu SI). Siły masowe wywołują ruch ziarna w kierunku i z przyspieszeniem, wyznaczonymi przez lokalną charakterystykę ich pola, a siły powierzchniowe przeciwdziałając temu ruchowi - lub modyfikując w inny sposób jego warunki - wchodzi do bilansu sił

( $P = P_m + P_p$ ), określającego ostateczną charakterystykę ruchu ziarna: tor ruchu, prędkość i przyspieszenia. Od początku tworzenia podstaw teoretycznych procesów przepływowych, zainteresowanie budził taki stan bilansu sił, w którym ich suma równa się zeru ( $P = 0$ ), co oznacza, że ziarno porusza się ze stałą prędkością, nazywaną prędkością graniczną ( $v_0$ ) ruchu ziarna w danych warunkach. Siłę masową działającą na ziarno wyraża iloczyn jego masy ( $m$ ) przez przyspieszenie siły masowej ( $a$ ). Wartość tej siły:  $P_m = a m = a V \rho_s$  ( $V$  - objętość ziarna, wyznaczona przez jego wielkość i kształt,  $\rho_s$  - gęstość ziarna), pomniejsza się o siłę wyporu ośrodka, równą  $a V \rho_c$  ( $\rho_c$  - gęstość ośrodka), co daje ostatecznie określenie zredukowanej siły masowej:  $P_m = a V (\rho_s - \rho_c)$ . W zastosowaniach technicznych występowały początkowo wyłącznie rozwiązania wykorzystujące siłę ciężkości ( $a = g$  - przyspieszenie siły ciężkości), skąd nazwa - "grawitacyjne" - używana nadal tradycyjnie dla wielu spośród takich procesów. Znacznie później - zwłaszcza dla rozdziału ziarn bardzo drobnych - wprowadzono nadal rozwijane stosowanie siły odśrodkowej ( $a = \omega^2 r$ , gdzie:  $\omega$  - prędkość kątowna ruchu ziarna,  $r$  - promień krzywizny toru tego ruchu), pozwalające na bardzo znaczne zwiększanie siły wywołującej ruch ziarna. Siły powierzchniowe - w ujęciu podstawowym siły oporu ośrodka



Rys.1

gdzie:  $\omega$  - prędkość kątowna ruchu ziarna,  $r$  - promień krzywizny toru tego ruchu), pozwalające na bardzo znaczne zwiększanie siły wywołującej ruch ziarna. Siły powierzchniowe - w ujęciu podstawowym siły oporu ośrodka

- zależą od wielkości ziarna ( $d$ ), jego kształtu (określonego przez umowny współczynnik  $c$  - na ogół odnoszący pewne cechy geometryczne ziarna do analogicznych cech kuli, dla której  $c=1$ ) oraz prędkości chwilowej ( $v$ ), gęstości ośrodka i jego lepkości (wyrażonej np. przez współczynnik lepkości dynamicznej -  $\mu$ ). Na rys. 1 a - e (wszystkie rysunki omówiono w tekście) - przedstawiono schematycznie zależności jakościowe kształtowania się prędkości chwilowej ziarna od wymienionych wielkości charakteryzujących warunki procesu. W całym rysunku przyjęto, że stan po lewej stronie (1) odpowiada prędkości mniejszej ( $v_1$ ), a po prawej (2) - większej ( $v_2$ ), przy zapisanych tam relacjach wartości poszczególnych wielkości - różnych dla dwóch przykładowych ziarn - i przy stałych wartościach pozostałych wielkości charakterystycznych. Z biegiem czasu powstało wiele zapisów - z reguły dobrze znanych - opisujących ruch ziarna, a w szczególności pozwalających obliczyć jego prędkość graniczną i czas ( $t_0$ ) jej osiągnięcia od momentu rozpoczęcia ruchu w określonych warunkach, wyznaczonych przez zespół omówionych wielkości. Ogólne równanie ruchu ziarna [1] nie znalazło poza tym większego zastosowania. W miarę doskonalenia procesów przepływowych - zwłaszcza klasyfikacji - zwrócono uwagę na inną klasę ich uwarunkowań, obejmującą warunki tzw. ruchu skrępowanego, wynikające bądź z ograniczonej wielkości ( $D$ ) obszaru przebiegu procesu (rys. 1 f.), bądź z obecności w nim innych ziarn, opisywanej ilościowo przez ich koncentrację objętościową -  $\theta = V_p / (V_p + V_c)$ , gdzie  $V_p$  i  $V_c$  - odpowiednio objętości fazy stałej i płynnej (rys. 1 g.). Oprócz wymienionych wielkości, przy opisie procesów w wersji podstawowej uwzględnia się jeszcze prędkość samego ośrodka ( $w$ ), której wektor dodaje się do wektora prędkości ziarna względem ośrodka ( $u$ ), otrzymując prędkość ziarna wobec nieruchomego układu zewnętrznego ( $v$ ) -  $u + w = v$ .

Podstawowe ujęcie opisu procesów przepływowych można streścić następująco:

- 1) w bilansie sił uwzględnia się tylko wielkości zdeterminowane:  $d$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_c$ ,  $\mu$ ,  $c$  - charakteryzujące właściwości fizyczne ziarn i ośrodka oraz przyspieszenie  $a(g, r, \omega)$ , a także  $D$ ,  $\theta$ ,  $\bar{\omega}$  - określające dodatkowo warunki procesu w sposób omówiony poprzednio,
- 2) siły powierzchniowe identyfikuje się z siłami oporu ośrodka ( $P_w$ ), do których zalicza się także efekty skrępowania ruchu (z wyjątkiem wystąpienia tzw. gęstości pozornej ( $\rho$ ): średniej wartości gęstości całego układu - fazy stałej wraz z płynną - którą uwzględnia się także przy obliczaniu siły wyporu):  $P_w = P_w$ , skąd bilans sił:

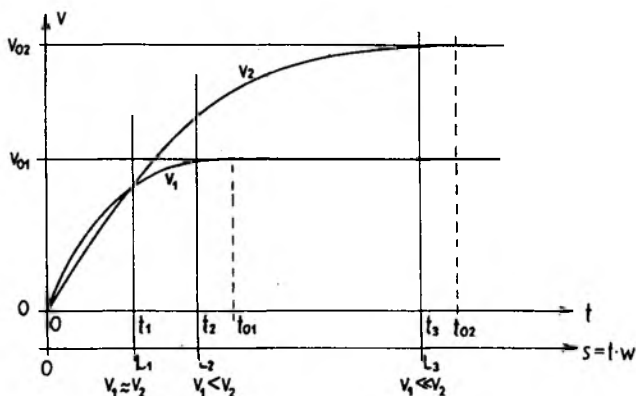
$$P = P_n(d, c, \rho_s, \rho_c, a, \bar{\omega}) + P_w(\rho_c, \mu, d, c, v, \bar{\omega}, D, \theta), \quad (1)$$

- 3) interesująca jest tylko wartość prędkości granicznej ( $v_0$ ), osiągnięta przez ziarna po czasie granicznym ( $t_0$ ) z dokładnością wystarczającą do celów praktycznych (teoretycznie  $v \rightarrow v_0$  w czasie  $t \rightarrow \infty$ ) przy  $P_w \neq 0$ ;  $v_0$  (szczególny przypadek prędkości charakterystycznej  $v$ ) jest funkcją wszystkich wielkości zmiennych, występujących w wyrażeniu (1),
- 4) warunki skrępowania ( $\theta \neq 0$ ,  $d/D \neq 0$ ) oraz ruch ośrodka ( $\bar{\omega} \neq 0$ ) uwzględnia się w przypadkach uzasadnionych przez dokładność opisu (obliczeń), wymaganą dla potrzeb praktycznych.

## 3. ROZWINIĘCIA OPISU PROCESÓW PRZEPLYWOWYCH

## 3.1. Uwzględnianie dodatkowych czynników o charakterze technologicznym

Przyjmowanie do opisu procesów (i do obliczeń praktycznych) prędkości granicznej ( $v_0$ ) daje możliwość rozpatrywania tylko przypadków, w których ruch ziarn jest w pełni ustabilizowany. Jest to z reguły uzasadnione dla ziarn drobnych, dla których czas osiągnięcia tej prędkości ( $t_0$ ) jest bardzo krótki - krótszy od czasu przebywania ziarn wewnątrz obszaru roboczego (obszaru rozdziału) urządzenia. Już jednak w osadzarkach, powszechnie stosowanych do wzbogacania grawitacyjnego, ziarna nie osiągają prędkości granicznych. Rysunek 2 przedstawia teoretyczny przebieg [1] wzrastania prędkości ruchu



Rys.2

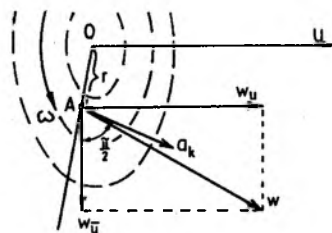
dwa ziarn, różniących się prędkościami granicznymi ( $v_{01} < v_{02}$ ). Przy wyraźnej umowności wzajemnego przebiegu krzywych  $v_1$  i  $v_2$  w czasie  $t \ll t_0$ , widać, że istnieje pewien okres czasu - począwszy od początku biegu procesu - w którym prędkości ziarn podlegających rozdzielowi są porównywalne lub różnią się nieznacznie (np. przy  $t = t_2$ ), co uniemożliwia lub utrudnia przeprowadzenie efektywnego rozdziału. W miarę budowy urządzeń do klasyfikacji ziarn drobnych o coraz krótszych czasach przebiegu procesu (np. przez wzgląd na wydajność), opisywana sytuacja może stać się wiążącą również w takich przypadkach. W związku z tym należałoby przyjmować do opisu procesów zamiast prędkości granicznej, ogólniejszą prędkość charakterystyczną ziarn (w danych warunkach) -  $v = v(t; \dots)$ , gdzie wielokropek oznacza wielkości omówione już poprzednio.

Istotnym warunkiem przebiegu procesu przyplwowego, występującym w większości przypadków rzeczywistych, jest różnorodność ziarn podlegających rozdzielowi nie tylko - jak się zakłada w procesach klasyfikacji - pod względem wielkości, lecz i gęstości, kształtu itp. właściwości, modelujących ich zachowanie. Dotyczy to wszelkich procesów przepływowych i wymaga uwzględniania przy doskonaleniu ich opisów. Wstępne rozważania na ten temat zawarto w [13].

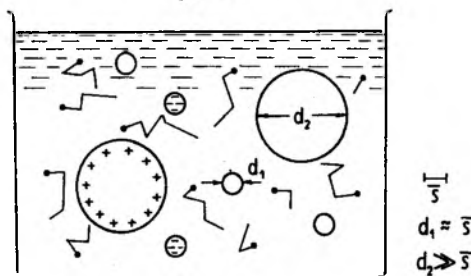
W rozwiązaniach, w których ziarna poruszają się po torach krzywoliniowych (praktycznie w procesach odśrodkowych), należy uwzględnić w bilansie sił jeszcze siłę

Coriolisa [11], występującą przy złożeniu ruchu obrotowego układu z ruchem postępowym, znajdującego się w nim obiektu. Przyspieszenie tej siły -  $a_x = 2\omega \sin\varphi$  ( $\varphi$  - kąt pomiędzy kierunkiem ruchu i osią obrotu) - ma technologicznie taki sam charakter, jak przyspieszenie unoszenia, wywołane przez ruch ośrodka z prędkością  $w$ . Schemat układu z pokazaniem położenia tej siły przedstawia rys.3. ( $w_u, w_o$  - składowe prędkości ośrodka: równoległa i prostopadła do osi obrotu  $\omega$ ).

Szczegółowe rozważania warunków procesu doprowadziły [15] do określenia dodatkowych sił powierzchniowych, występujących w obecności ziarn współpadających. Mają one charakter losowy i właściwości uogólnionego tarcia wewnętrznego (lepkości). Są to siły: gradientowa -  $P_g$  - występująca przy istnieniu gradientu koncentracji (gdy w obszarze rozdziału  $\theta = \theta(x, y, z) \neq \text{const.}$ ,  $x, y, z$  - współrzędne przestrzenne) oraz pochodząca od wzajemnych zderzeń ziarn -  $P_v$ . Wartości tych sił, włączanych w skład siły oporu ośrodka jako człony stochastyczne [9], zależą - obok innych, już omówionych wielkości - od średniej prędkości ruchu chaotycznego ziarn -  $\bar{v}_{cm}$ .



Rys.3



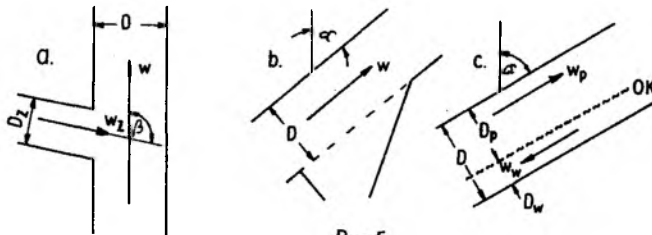
Rys.4

W miarę zmniejszania rozmiarów ziarn podlegających rozdziałowi, zwiększa się relatywny udział w bilansie sił ich innej, dotychczas nie omawianej kategorii [14]. Wynikają one z nieciągłości ośrodka oraz ze stanu elektrycznego powierzchni rozdziału faz, a także - zapewne - z działania innych czynników, na razie trudnych do ścisłego zidentyfikowania. Rysunek 4. przedstawia schematycznie układ, w którym wymienione czynniki mogą występować efektywnie ( $\bar{s}$  - średnia droga swobodna cząsteczek ośrodka - od niej zależą zjawiska typu ruchów Browna, gdy wielkość ziarn jest z nią porównywalna -  $d_i \approx \bar{s}$ ). Takie oddziaływania, zwane umownie fizykochemicznymi, istnieją w każdym układzie warunków procesów przepływowych, jednak w przypadku ziarn dużych są pomijalnie małe w stosunku do oddziaływań uwzględnianych w podstawowych ujęciach opisów tych procesów. Stan ilościowego, a nawet pełnego jakościowego, rozpoznania tej klasy oddziaływań, jest jeszcze bardzo skromny. Ich istnienie było jednak zauważane już dawniej i znalazło wyraz (wraz z efektami skrępowania wynikającymi z ograniczonego obszaru rozdziału) w zaleceniach wprowadzania poprawek empirycznych do wzoru Stokesa - określającego prędkość graniczną dla ziarn bardzo drobnych (poprawki Cunninghama i Landenburga [2]).

### 3.2. Wpływ czynników konstrukcyjnych na proces technologiczny

W dotychczasowych rozważaniach nie było mowy o wpływie (niezamierzonym bądź zamierzonym), jaki na przebieg procesu wywiera nieunikniona obecność w strefie rozdziału elementów konstrukcji samych urządzeń. W dalszym ciągu nie rozpatruje się wpływu rozwiązań konstrukcyjnych, które mają nadać całemu przebiegowi procesu określone warunki, np. wywoływać kręcenie układu rozdziału w celu wywołania siły odśrodkowej.

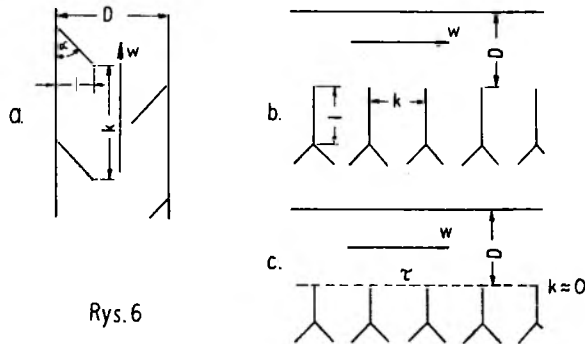
Działanie niezamierzone może pochodzić od dowolnego elementu lub układu konstrukcyjnego. Na rys.5 przedstawiono schematy kilku takich typowych szczegółów.



Rys.5

Rysunek 5 a pokazuje obecność źródła (doprowadzenia strumienia ośrodka w celu wywołania jego przepływu z prędkością  $w$ , wyznaczającą rozdział ziarn na frakcje przelewu o  $v_0 < w$  i wylewu o  $v_0 > w$  można w szczególności doprowadzać w pokazany sposób całość nadawy w postaci zawiesiny). W strefie dopływu tego strumienia zachodzą zaburzenia przepływu, powodujące niekontrolowane zmiany lokalnych warunków procesu, prowadzące do zmiany jego wyników - na ogół do ich pogorszenia. Można zauważyć, że będą one zależały od prędkości strumieni: klasyfikującego ( $w$ ) i doprowadzanego ( $w_2$ ), od szerokości (rozmiarów charakterystycznych) obszaru klasyfikacji ( $D$ ) i źródła ( $D_2$ ) oraz od kąta ( $\beta$ ) pomiędzy wektorami prędkości  $w$  i  $w_2$ .

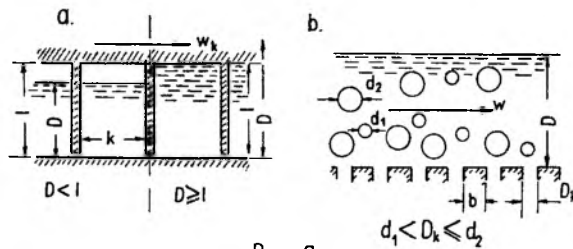
Pochylenie strumienia klasyfikującego - rys.5 b - o kąt  $\alpha$  daje inny wariant warunków procesu. Czynniki wpływające wówczas w największym stopniu na jego wyniki ( $w, D, \alpha$ ) oznaczono na rysunku. Taki przypadek może być również wynikiem innego zamierzenia, np. stosowania do celów klasyfikacji, urządzeń lamelowych (warstwowych) [np. 8], bardziej powszechnie używanych do zagęszczania zawiesin. W tym ostatnim przypadku - rys.5 c. - wystąpi jeszcze inna komplikacja warunków procesu, nie uwzględniana - jak dotychczas - w pracach na temat klasyfikacji lamelowej. Polega ona na wystąpieniu (w obszarze kontaktowym - OK) na granicy przeciwniebieżnych strumieni przelewu (o rozmiarze  $D_p$  i prędkości  $w_p$ ) oraz wylewu (o rozmiarze  $D_w$  i prędkości  $w_w$ ) stałej strefy niekontrolowanych zaburzeń, nie mogących nie mieć znaczenia dla przebiegu i końcowego efektu procesu. Na wielkość skutków omawianego zaburzenia ma wpływ - poza wymienionymi już charakterystykami obu strumieni (wylewu i przelewu) - także kąt nachylenia  $\alpha$ . We wszystkich omawianych przykładowo przypadkach nie wymienia się, jako oczywistych, wpływów podstawowych czynników przebiegu procesu - omówionych poprzednio - przyjmując je za ustalone.



Rys. 6

Inną (umownie) grupę wpływów, zależnych od czynników konstrukcyjnych, wywierają elementy stosowane w budowie klasyfikatorów właśnie w celu spowodowania lokalnych zakłóceń przepływu strumienia - schemat jednego z możliwych rozwiązań przedstawia rys.6 a. Wywołuje się je w celu podwyższenia selektywności rozdziału ziarn trudno klasyfikujących się [1 i in.]. Wpływ takich elementów zależy od ich rozmiarów i geometrii ( $l, k, \alpha$ ), od rozmiarów strefy rozdziału ( $D$ ) oraz od prędkości strumienia klasyfikującego ( $w$ ).

Podobny wpływ wywierają elementy pomocnicze, wprowadzane np. w celu odbierania produktów - przykład na rys.6 b. W tym przypadku stopień tego wpływu można zmniejszyć, stosując przegrodę sitową z otworami o wielkościach umożliwiającymi pominięcie ich jako elementów zakłócających ( $k=0$ ) - rys.6 c. Należy jednak uwzględnić zmianę oporu tarcia strumienia o tak wykonaną ścianę w porównaniu do innych ścian urządzenia (współczynnik tego oporu -  $\tau$ ). Przy tej okazji należy wymienić wartość współczynnika  $\tau$  jako kolejnego parametru charakteryzującego układ warunków przepływu w strefie rozdziału we wszelkich realizacjach procesu.



Rys. 7

Ostatnią z formalnie i umownie wyodrębnionych grup czynników konstrukcyjnych, tworzą te, które związane są z wyborem mechanicznego sposobu wyprowadzania wylewu (rys.7 a.) oraz z ograniczaniem wielkości ziarn przelewu przez wprowadzenie elementów klasyfikacji sitowej (rys.7 b.). Pierwsze rozwiązanie (klasyfikatory mechaniczne, wirówki klasyfikujące) wywołuje jako efekty uboczne: silne mieszanie warstwy wylewu i występowanie niejednolitego ruchu rotacyjnego [11] oraz mechaniczne rozdrabnianie (degradację uziarnie-

nia) ziarn większych [12]. W tym rozwiązaniu wyróżnia się jeszcze obecność (lewa część rys. 7.a) lub nieobecność (prawa część tego rysunku) swobodnej powierzchni zawiesziny w klasyfikatorze. Drugie rozwiązanie (sita łukowe, wirówki sitowe stosowane gdzieś do klasyfikacji) wprowadza do warunków procesu rozdziału element ograniczający w postaci charakterystycznej dla procesu przesiewania. Wielkości istotne dla wpływu omawianych rozwiązań na proces oznaczono na rysunkach ( $D$ ,  $D_k$  - wielkość otworu sita,  $w$ ,  $w_k$  - prędkość elementu roboczego,  $l$ ,  $k$ ,  $b$  - szerokość mostka sita).

Ścisły opis modelowy omówionych w tym rozdziale, a także jeszcze innych, podobnych zmian w przebiegu procesu, wywołanych przez obecność elementów konstrukcyjnych, nie jest - jak dotychczas - możliwy.

#### 4. MOŻLIWOŚCI I KIERUNKI ROZBUDOWY I UOGÓLNIENI MODELII

Przegląd uwarunkowań procesów przepływowych pozwala przedstawić następujące uwagi na temat tytułowych możliwości dalszych prac w zakresie ich opisu:

1. Układ sił, działających na ziarna (1), można uzupełnić o siły losowe:

- gradientową: 
$$P_g = P_g(d, \rho_s, \theta(x, y, z), \rho_c, \mu, \bar{v}_{CN}) \quad (2)$$

- od zderzeń ziarn: 
$$P_U = P_U(d, c, \rho_s, \theta, \mu, \bar{v}_{CN}) \quad (3)$$

- oddziaływań fizykochemicznych: 
$$P_{FC} = P_{FC}(d, c, \theta, \rho_s, \rho_c, \mu, S, e) \quad (4)$$

( $e$  - umowny symbol stanu elektrycznego powierzchni rozdziału faz - stałej i płynnej),

do postaci:

$$P = P_n + P_p + P_g + P_U + P_{FC} \quad (5)$$

co wyczerpuje w zasadzie zakres celowego rozszerzania ich bilansu w celu zwiększenia możliwości dokładnego wyznaczania prędkości charakterystycznej ( $v$ ), w szczególności granicznej ( $v_0$ ). Zespół oddziaływań losowych będzie dalej oznaczany symbolem  $P_L$ .

2. Inne oddziaływania - zwłaszcza konstrukcyjne - powinny być wprowadzane do opisów wyników procesu - np. najbardziej ogólnych: wielkości ziarna podziałowego -  $d_k$  ( $d_{e0}$ ) oraz wskaźnika dokładności rozdziału -  $E$  (abstrahując w tym miejscu od sposobu jego określania). W tym kierunku idą liczne prace nad określeniem wpływu czynników konstrukcyjnych na wyniki procesu klasyfikacji [3,4,5,6,7,9,10 i inne].

3. Kolejne uzupełnienia modeli powinny rozwijać zapoczątkowane już [15] uszczegółowienie charakterystyk wielkości opisujących stan materiału, ośrodka, ich koncentracji i ruchu oraz zmienność tych wielkości w czasie. Do zapisów poszczególnych oddziaływań zostaną więc wprowadzone: czas ( $t$ ) i współrzędne przestrzenne ( $x, y, z$ ) oraz funkcje rozkładu: wielkości ziarn ( $f(d)$ ), gęstości ( $\gamma_s(\rho)$  i  $\gamma_c(\rho)$ ), a także kształtu ziarn ( $\varphi(c)$ ), oprócz wspomnianego poprzednio rozkładu koncentracji ( $\theta(x, y, z)$ ). Funkcje opisujące te rozkłady zastępowałyby występujące obecnie w zapisach modelowych wielkości, odnoszące się w zasadzie do pojedynczych ziarn. Prędkość klasyfikacji ( $w$ ) byłaby średnią ( $\bar{w}$ ) w obszarze rozdziału prędkości rzeczywistych o rozkładzie  $w(t; x, y, z)$ .

4. Czynniki konstrukcyjne można zgrupować np. według ich roli w przebiegu procesu na:

- a) wywołujące wzajemne oddziaływania strumieni osrodka:  $w_z$ ,  $w_n$ ,  $w_r$ ,  $\beta$ ,  $D_n$ ,  $D_r$  i podobne - rys.5 a i rys.5 c - gdzie  $\beta = \pi$ ,
- b) powodujące deformacje strumieni przez elementy konstrukcyjne o charakterystykach:  $D$ ,  $D_r$  (rozmiary przekrojów strumieni),  $k$  i  $l$  (rozmiary elementów - równoległe i prostopadłe do kierunku strumienia klasyfikującego),  $\alpha$  (kąty pomiędzy elementami konstrukcyjnymi i strumieniem, w szczególności wymuszające jego kierunek),  $w_k$  (prędkość ruchu elementów),  $\tau$  (efekty tarcia strumienia o te elementy) - rys.5 b, 5 c, 6 i 7 a,
- c) mające bezpośredni wpływ na wynik rozdziału:  $D_n$ ,  $b$  - rys.7 b.

Wpływ tych czynników na proces rozdziału trudno na razie opisać w sposób zdeterminowany. Ich występowanie (niekoniecznie wszystkich jednocześnie) można zawsze stwierdzić w zespole szczegółów rozwiązania konstrukcyjnego każdego urządzenia do klasyfikacji. Można więc wyrazić opinię o celowości badania wpływów na proces zarówno poszczególnych czynników, jak i ich grup, które bywają na ogół charakterystyczne dla rozmaitych typów klasyfikatorów. Pozwala to na ostrożny optymizm co do możliwości zbudowania takich modeli procesów, w których czynniki konstrukcyjne będą uwzględniane jako zdeterminowane a priori. Należy jednak pamiętać, że łączny wpływ kilku czynników na ogół nie będzie zwykłą sumą ich wpływów cząstkowych. Wspomniane poprzednio badania prowadzi się obecnie z założeniem otrzymywania zapisów odnośnych zależności w postaci modeli fenomenologicznych, na ogół regresyjnych. Nie może to zadowalać, stanowi jednak określony postęp. Zespół czynników konstrukcyjnych będzie dalej oznaczany symbolem  $\Sigma K$ .

5. Uwzględniając poprzednie uwagi, można zmierzać do uzyskiwania opisów zawierających:

$$\bar{v} = \bar{v}(P_m, P_p, P_L, \Sigma K) \quad (6)$$

$$d_k = d_k(\bar{v}, \Sigma K) \quad (7)$$

$$E = E(\bar{v}, \Sigma K) \quad (8)$$

nie wykluczając także badania innych wielkości charakteryzujących wyniki, w szczególności postaci rozkładów  $f(d)$  i  $\gamma_s(\rho)$ , a także  $\phi(c)$  w produktach procesu.

Zamierzeniem autora było przedstawienie pewnego schematu rozważań przy wykonywaniu tytułowego zadania rozwijania, a zwłaszcza unifikacji, opisów procesów przepływowych, tak rozpowszechnionych w różnorodnych ujęciach i zastosowaniach.

#### Literatura (wybrane pozycje)

1. Барский, М.Д., Ревнищев, В.И., Соколкин, В.В. - Гравитационная классификация зернистых материалов, "Недра" Москва 1974.
2. Dalla Valle, F.M. - Micromeritics, The Technology of Fine Particles, Pitman Publishing Corporation New York-London 1948.
3. Makary, B. - Ocena ostrości rozdziału oraz możliwości regulacji ziarna podziałowego w HC 350 mm, II Seminarium Naukowo-Techniczne "Nowe osiągnięcia w klasyfikacji materiałów drobno uziarnionych", Kraków 1985.
4. Makary, B., Ostrowicki, B., Potępa, A. - Über ein Verfahren zur Berechnung der Parameter von Hydrozyklonen zum Klassieren feinkörnigen Stoffe, 16. Diskussionstagung



"Mechanische Flüssigkeitsabtrennung", Magdeburg (NRD) 1979.

5. Makary, B., Potępa, A. - Nomogram zależności  $d_w$ ,  $d_p$  i  $\alpha$  od wartości ziarna podziałowego  $d_{50}$  przy maksymalnej ostrości rozdziału dla HC-30, Seminarium Naukowo-Techniczne "Klasyfikacja materiałów drobno uziarnionych", Kraków 1981.

6. Makary, B., Potępa, A. - Statistische Verifikation mancher Formeln für Durchsatzes und Trennteilchengröße in Hydrozyklon mit einem Durchmesser von 20-100 mm, Freiberg (NRD) 1982.

7. Makary, B., Sztaba, K. - Zum Einfluß der Gestaltung von Einlauf- und Überlaufdüse auf die Trennschärfe von Hydrozyklonen mit kleinem Nenndurchmesser, Internationale Fachtagung "Fortschritte in Theorie und Praxis der Aufbereitungstechnik", Freiberg (NRD) 1984.

8. Marciniak-Kowalska, J. - Teoretyczne wartości wskaźników ostrości rozdziału w procesie klasyfikacji w klasyfikatorze lamelowym, Zeszyty Naukowe AGH, seria: Górnictwo z. 146 Kraków 1989.

9. Nowak, A. - Charakterystyki rozdziału jednorodnych ziarn mineralnych w wirówkach klasyfikujących, PAN - Komitet Górnictwa, PWN, Warszawa-Kraków 1981.

10. Nowak, A. - The Methodology of Description and Evaluation of the Classification Process in Solid Bowl Centrifuges, Materiały: 1. European Symposium on Particle Classification in Gases and Liquids, Norymberga 1984.

11. Соколов, В.И. - Центрифугирование, "Химия" Москва 1976.

12. Sztaba, K. - Krzywe rozdziału w procesie klasyfikacji mokrej, Archiwum Górnictwa t.1 z.2 (1956).

13. Sztaba, K. - Współwystępowanie efektów klasyfikacji i wzbogacania w procesach przepływowych, Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii. 20 (1988).

14. Sztaba, K. - Problemy technologiczne wzbogacania materiałów bardzo drobno uziarnionych, Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii 21 (1989).

15. Тихонов, О.Н. - Введение в динамику массопереноса процессов обогащительной технологии, "Недра" Москва 1973.

Sztaba K., 1992. Conditions and Possibilities of Extension and Unification of Model Descriptions of Processes of the Flow Classification. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 7-16 (polish text).

Processes of the flow classification play a particular role in technology of fine-grained materials. Basic scope of description of these processes does not include numerous dependences on conditions of their real course. Great diversity of practical realizations of the flow classification makes difficult their mutual comparison which is necessary for the proper choice of the best solutions. The paper presents a review of the conditions of these processes together with an attempt of their systematization and definition of the groups of parameter characteristic of various realizations. They can compose a starting point for gradual unification of the models of classification processes.

**Alicja NOWAK\***  
**Bohdan MAKARY\***  
**Kazimierz SZTABA\***

## **BADANIE DOKŁADNOŚCI ROZDZIAŁU W POZIOMOPRĄDOWYM KLASYFIKATORZE POWIETRZNYM**

W referacie przedstawiono wyniki rozdziału wybranych, drobnych klas ziarnowych piasku kwarcowego i barytu w wieloproduktowym, poziomoprądowym klasyfikatorze powietrznym, który został zaprojektowany i wykonany w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH w Krakowie. Otrzymane zależności - głównie wielkości ziarna podziałowego i wskaźników ostrości rozdziału od prędkości przepływu strugi powietrza i długości drogi klasyfikacji - potwierdziły prawidłowość konstrukcji. Stwierdzona ponadto możliwość otrzymania w określonych miejscach klasyfikatora wysokiej ostrości rozdziału nadaje urządzeniu wysoką elastyczność technologiczną.

### **1. KONSTRUKCJA KLASYFIKATORA**

Wieloproduktowy, poziomoprądowy klasyfikator powietrzny został zaprojektowany i wykonany w Instytucie Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych AGH w Krakowie. Rozwiązanie konstrukcyjne, przedstawione schematycznie na rys. 1, miało na celu między innymi uzyskanie przepływu powietrza z możliwością regulacji jego prędkości w klasyfikatorze w zakresie 0,5 - 4 m/s oraz uzyskanie jednorodnego pola prędkości, czyli maksymalne wyrównanie strumienia przepływu.

Przepływ powietrza wymusza wentylator promieniowy (1), napędzany asynchronicznym silnikiem prądu zmiennego (2). Wylot wentylatora jest połączony z przewodem (6) o przekroju prostokątnym 200 x 100 mm i długości 1700 mm. W kanale tym umieszczono podwójne siatki metalowe (3) o otworach 0,5 x 0,5 mm, co powoduje znaczny wzrost oporu aerodynamicznego, zmniejszenie wydatku przepływu i jednocześnie wyrównanie strumienia powietrza. Jak wynika z pokazanych na rys. 1 proporcji, poziomy kanał prostokątny ma długość około 15 średnic hydraulicznych, co zapewnia dalsze

---

\*Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie - Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych, al. Mickiewicza 30, PL 30-065 Kraków

wyrównanie strumienia. Ze względu na to, że wydajność wentylatora znacznie przewyższa pożądany w klasyfikatorze przepływ powietrza, przed przekrojem wylotowym wentylatora wykonano bocznik (okienko - 4) o polu przekroju równym przekrojowi kanału. Umieszczona w boczniku zasuwka umożliwia regulowanie przepływu co najmniej w zakresie  $\pm 50\%$  nominalnej wydajności wentylatora. Dla założonych warunków pracy klasyfikatora powietrznego (8) możliwe jest także ustalenie zależności pomiędzy położeniem zasuwki dławiącej oraz średnią prędkością powietrza mierzoną przy pomocy czujnika anemometru (5).

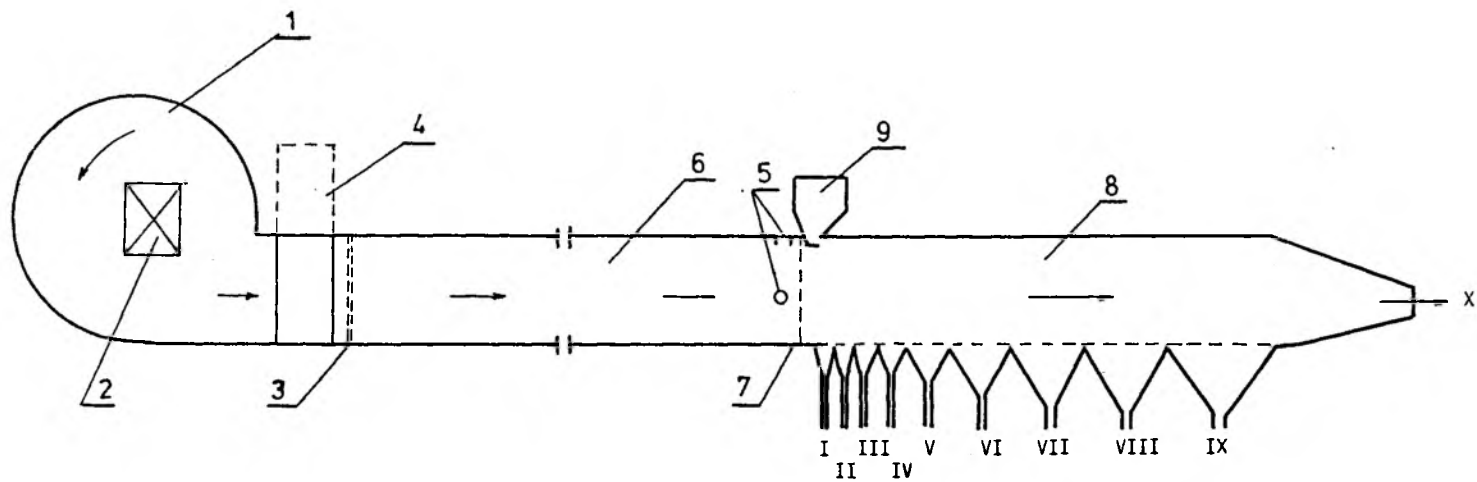
Klasyfikator powietrzny poziomoprądowy (8) jest urządzeniem do rozdziału na sucho materiału o uziarnieniu 0-1 (2) mm. Przy wlocie do klasyfikatora umieszczono pojedynczą siatkę (7), wyrównującą dodatkowo profil prędkości w strumieniu wpływającym do komory klasyfikacji. Pozioma komora klasyfikacji o wymiarach: wysokość - 200 mm, szerokość - 100 mm posiada ostrosłupowe odbieralniki produktów oznaczone na rysunku cyframi rzymskimi od I do IX. Wymiary ich (dł. podst.) zwiększają się w miarę oddalania od punktu podawania materiału i wynoszą kolejno: 20, 25, 40, 60, 80, 115, 160, 230, 310 mm. Powierzchnia podstawy odwróconych ostrosłupów oddzielona jest od komory klasyfikacji siatką metalową. Nadawa doprowadzana jest do klasyfikatora z podajnika (9) o wylocie usytuowanym nad początkiem odbieralnika produktu I. Zmiana wydajności klasyfikatora realizowana jest poprzez regulację szerokości szczeliny wylotowej podajnika nadawy. Ziarna nadawy opadają do poszczególnych odbieralników produktów po torach parabolicznych (w miarę osiągnięcia przez opadające ziarna prędkości granicznej przechodzących w prostoliniowe), których kształt zależy od prędkości poziomego strumienia powietrza i prędkości opadania ziarna w tym ośrodku. Produkt najdrobniejszy (X) zbierany jest w filtrze workowym ze specjalnej tkaniny filtracyjnej wielokrotnego użytku.

## 2. WYNIKI BADAŃ NAD KLASYFIKACJĄ POWIETRZNĄ

W celu określenia przydatności poziomoprądowego klasyfikatora powietrznego do rozdziału materiałów drobnouziarnionych przy jego użyciu wykonano badania nad klasyfikacją:

- a) piasku kwarcowego o uziarnieniu 0-1 mm, o niewielkiej zawartości klasy najdrobniejszej ( $0-63 \mu\text{m}$ ) i najgrubszej (0,5-1 mm) - materiał o zdecydowanej przewadze klasy 0,2-0,5 mm,
- b) piasku kwarcowego (0-1 mm) o jednorodnym składzie ziarnowym,
- c) barytu (0-1) o prostoliniowej charakterystyce uziarnienia,
- d) wąskiej klasy ziarnowej (0,25-0,3 mm) piasku,
- e) wąskiej klasy ziarnowej (0,25-0,3 mm) barytu.

Doświadczenia prowadzono przy różnych prędkościach poziomego strumienia powietrza: 4; 3; 2; 1; 0,5 m/s.



Rys. 1. Schemat konstrukcji klasyfikatora powietrznego  
 Fig. 1. The scheme of air classifier construction

Po ustaleniu żądanej prędkości przepływu powietrza nadawę w ilości 1 kg wsypywano do podajnika. Wszystkie doświadczenia prowadzono z taką samą wydajnością, przy jednakowej szerokości szczeliny wylotowej podajnika równej 2 mm. Po zakończeniu procesu klasyfikacji z poszczególnych odbieralników wysypywano produkty rozdziału. Poddawano je następnie analizie sitowej, której wyniki posłużyły do obliczenia charakterystyk ziarnowych.

W przypadku klasyfikacji szerokich klas ziarnowych opracowany program na EMC pozwolił na wyznaczenie składów granulometrycznych i liczb rozdziału przy grupowaniu produktów klasyfikacji na produkt górny (klasy grube) i produkt dolny (klasy drobne). Za produkt górny przyjmowano początkowo tylko materiał znajdujący się w odbieralniku I (ziarna opadające już na niewielkiej - do 20 mm - odległości od punktu nadawania), następnie materiał zgromadzony w odbieralnikach I i II (ziarna opadające na drodze 0-45 mm) itd. Materiał znajdujący się w pozostałych (dopełniających) odbieralnikach stanowił produkt dolny. Wspomniany program pozwolił również określić wartości wychodów poszczególnych produktów klasyfikacji oraz wielkości ziarn podziałowych ( $d_{50}$ ), rozproszenia prawdopodobnego ( $E_p$ ) oraz wskaźników ostrości rozdziału ( $r$ ), które to wartości obliczone zostały z aproksymant funkcji rozdziału dystrybuantą rozkładu logarytmiczno-normalnego.

W tabeli 1 przedstawiono przykładowo wartości  $d_{50}$  w zależności od drogi opadania ziarn oraz prędkości przepływającego powietrza. Krzyżykami zaznaczono tu, że odczytane z aproksymanty wartości  $d_{50}$  są znacznie większe od maksymalnego ziarna nadawy, kreskami - brak materiału w odbieralniku. Podkreślono wielkości  $d_{50}$  dla warunków, przy których występuje największa ostrość rozdziału.

Analizę wyników klasyfikacji wąskich (0,25-0,3 mm) klas ziarnowych piasku kwarcowego i barytu przeprowadzono w oparciu o spostrzeżenia dotyczące rozkładu zawartości tych klas w różnych odległościach od miejsca nadawania. Rozkład taki pokazano przykładowo dla piasku kwarcowego na rys. 2. Rozkład zawartości klasy 0,25-0,3 mm barytu wzdłuż drogi klasyfikacji ma charakter podobny.

### 3. WNIOSKI

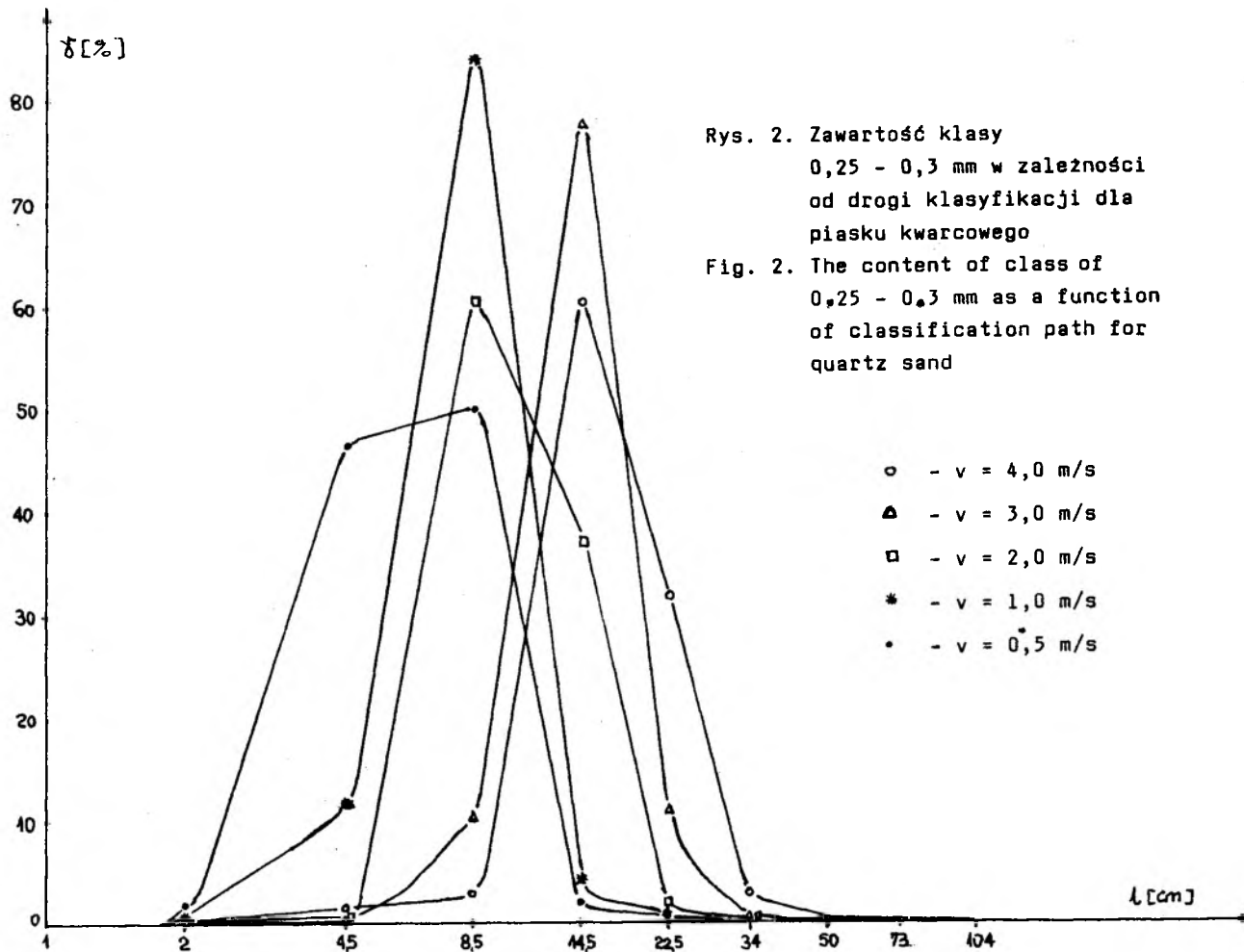
Analiza wyników wszystkich wykonanych doświadczeń upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

1. Zaprojektowany i wykonany w IPIWSM poziomoprądowy klasyfikator powietrzny pracuje prawidłowo - otrzymane wyniki klasyfikacji są zgodne z przewidywanymi wynikami rozdziału, np.
  - wartości  $d_{50}$  zmniejszają się wraz ze wzrostem drogi klasyfikacji i zmniejszaniem się prędkości strumienia powietrza

Tabela 1

Wartości  $d_{50}$  [mm] w zależności od drogi klasyfikacji i prędkości strugi powietrza

Nr dośw.	v [m.s <sup>-1</sup> ]	Droga opadania w mm									
		20	45	85	145	225	340	500	730	1040	
1	3	-	-	2,732	0,399	0,236	<u>0,124</u>	0,090	0,041	-	a
2	2	xxx	xxx	0,801	0,237	0,142	0,095	<u>0,071</u>	0,046	0,014	
3	1	xxx	8,737	0,237	<u>0,108</u>	0,043	0,026	0,021	0,011	0,000	
4	0,5	2,342	0,226	<u>0,058</u>	0,017	0,005	0,002	0,008	-	-	
5	3	-	xxx	1,026	0,208	0,106	<u>0,061</u>	0,033	0,015	0,002	b
6	2	xxx	xxx	0,339	0,120	0,072	<u>0,046</u>	0,025	0,009	0,001	
7	1	xxx	0,671	0,072	<u>0,043</u>	0,026	0,012	0,003	0,0001	-	
8	0,5	2,307	0,063	0,010	<u>0,010</u>	0,003	0,0004	0,000	0,000	-	
9	4	-	xxx	0,360	0,106	0,054	<u>0,027</u>	0,010	0,001	-	c
10	3	-	xxx	0,075	<u>0,025</u>	0,010	0,002	0,000	0,000	-	
11	2	xxx	0,564	<u>0,010</u>	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
12	1	xxx	0,025	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	
		I	I-II	I-III	I-IV	I-V	I-VI	I-VII	I-VIII	I-IX	



- wraz ze zmniejszaniem się prędkości przepływającego powietrza wzrasta zawartość wybranej klasy ziarnowej w odbieralnikach znajdujących się bliżej punktu nadawania.
  - wyraźny jest wpływ gęstości materiału na proces rozdziału - występuje istotne przesunięcie zależności stwierdzonych dla obu badanych materiałów w taki sposób, że ich jakościowy przebieg wykazuje podobne cechy dla barytu przy większych prędkościach, a dla piasku przy mniejszych prędkościach strumienia powietrza; zbliżony charakter mają również podobne zależności od długości drogi klasyfikacji
  - uwidacznia się wpływ składu ziarnowego nadawy na wyniki klasyfikacji.
2. Możliwość otrzymania w określonych miejscach klasyfikatora wysokiej ostrości rozdziału nadaje urządzeniu bardzo wysoką elastyczność technologiczną, dzięki której można uzyskiwać nawet niewielką liczbę gotowych produktów pochodzących z odpowiednio wybranych odbieralników lub ich grup, lecz przy wysokiej dokładności wydzielenia; znaczna liczba odbieralników klasyfikatora służy bardziej takiemu celowi niż równoczesnemu otrzymywaniu z nich licznych produktów końcowych.

#### Literatura

1. Badanie procesów przepływowych w przeróbce surowców mineralnych - sprawozdanie CPBP nr 03.07.05, Kraków 1988, 1989 r., Biblioteka IPIWSM AGH.

Nowak A., Makary B., Sztaba K., 1992. The Investigation of Separation Sharpness in the Horizontal Air Classifier. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 17-23 (polish text).

The paper presents results of measurements of distribution of selected fine size fractions of quartz sand and barite in products from a horizontal air classifier. The classifier was designed and constructed in the Institute of Mineral Processing and Utilization, Academy of Mining and Metallurgy in Cracow. The obtained results and relationships, mainly between separation size, separation sharpness factors, velocity of air flow, and length of classification path confirmed the correctness of construction. It was also found that the classifier enabled obtaining a high separation sharpness at the specified point which grants the device a high technological elasticity.



Eugeniusz GRZELAK\*

## KLASYFIKACJA HYDRAULICZNA DROBNYCH CZĄSTEK I ZAWIESIN

W referacie przedstawiono teoretyczne podstawy klasyfikacji w klasyfikatorach pionowych, poziomych, hydrocyklonach i klarownikach płytkowych wraz z konstrukcją zestawów, rezultatami klasyfikacji piasków budowlanych i klarowania wody. Stwierdzono, że zbudowane węzły klasyfikacji zapewniają rozdział na granicach podziałowych 0,063; 0,50 i 1,0 mm, a klarownik płytkowy na granicy 15 mikrometrów.

### 1. WSTĘP

Klasyfikacja ziarnowa w strumieniu jest jedną z podstawowych operacji technologicznych w przeróbce surowców mineralnych. Obejmuje zakres od kilku mikrometrów do około 2,0 mm.

W klasyfikacji hydraulicznej wykorzystuje się siłę ciężkości cząstki ciała stałego i opór ośrodka - najczęściej wody. Dla zwiększenia różnicy pomiędzy siłą ciężkości cząstek a oddziaływaniem oporu ośrodka stosuje się dodatkowo zawirowanie zawiesiny.

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w przeróbce surowców mineralnych znajdują klarowniki płytkowe. Stosuje się je do klarowania wody zawierającej cząstki o wymiarach nie przekraczających kilkudziesięciu mikrometrów. Ich działanie oparte jest na tej samej zasadzie co klasyfikatorów poziomych, z tym że dla zintensyfikowania procesu osadzania części stałych komora osadcza jest wypełniona płytkami, stąd nazwa klarowniki płytkowe.

### 2. TEORETYCZNE PODSTAWY KLASYFIKACJI HYDRAULICZNEJ

W przypadku klasyfikacji w strumieniu wznoszącym w zakresie ważności prawa Stokesa prędkość unoszenia cząstki określa równanie

$$v_u = \frac{d^2(\gamma - \rho)g}{18\mu} \quad (1)$$

stąd średnicę podziałową  $d_p$  określa zależność [9]

$$d_p = \sqrt{\frac{18\mu v_u}{(\gamma - \rho)g}}, \text{ cm} \quad (2)$$

\* Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego - Warszawa

gdzie

- $\mu$  - lepkość cieczy, g/cm·s /cP/  
 $v_u$  - prędkość przepływu /unoszenia/ cieczy, cm/s,  
 $\gamma$  - gęstość ciała stałego, g/cm<sup>3</sup>  
 $\rho$  - gęstość cieczy, g/cm<sup>3</sup>,  
 $g$  - przyspieszenie ziemskie, cm/s<sup>2</sup>.

W strumieniu poziomym granicę podziałową  $d_p$  określa zależność [9]

$$d_p = \sqrt{\frac{18\mu Q}{(\gamma - \rho)g}}, \quad \text{cm} \quad (3)$$

gdzie  $Q$  - przepustowość strumienia zawiesiny, cm<sup>3</sup>/s  
 $F$  - powierzchnia komory klasyfikacji, cm<sup>2</sup>.

W przypadku hydrocyklonu występuje siła odśrodkowa oddziaływająca na zawieszinę i wówczas granicę podziałową  $d_p$  określa zależność [2]

$$d_p = \frac{18\mu R v_u}{v^2(\gamma - \rho)}, \quad \text{cm} \quad (4)$$

gdzie  $v$  - prędkość wirującego strumienia, cm/s,  
 $R$  - promień obrotu cząstki, cm.

Podane zależności charakteryzują proces wydzielenia jednej cząstki o kształcie kulistym w stałym przepływie strumienia. W rzeczywistości na dokładność podziału i jej granicę wpływa szereg czynników, takich jak kształt cząstek, ich koncentracja w zawieszynie, położenie cząstki w strumieniu i inne.

W klarownikach płytkowych zwiększenie przepustowości osiąga się przez zmniejszenie drogi opadania, a zatem i czasu opadania. Komora sedymentacyjna jest wypełniona pakietami płytek nachylanych pod kątem 55-60° do poziomu /rys. 1/.

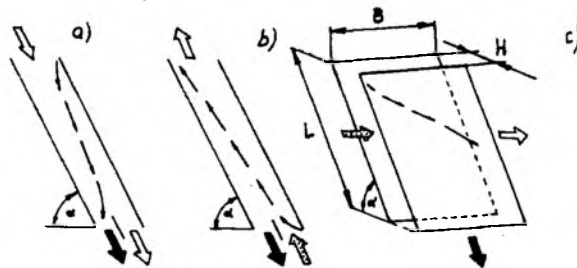


Fig. 1. Flow of suspension in lamellar separators  
 a-co-current; b-counter-current; c-cross-current  
 Rys. 1. Przepływ zawiesiny w klasyfikatorach płytkowych  
 a-współprądowy; b-przeciwprądowy; c-poprzecznoprądowy

Odległość między płytkami nie powinna być mniejsza niż 25 mm. Przy takim rozmieszczeniu płytek powierzchnie rzutowana klarownika płytkowego jest 20-krotnie większa od powierzchni komory bez płytek [8].

Przepływ zawiesziny między płytkami może być współprądowy, przeciwproudowy lub poprzecznoproudowy do kierunku opadania cząstek /rys.1/.

W przypadku przepływu współprądowego prędkość unoszenia cząstki określa zależność

$$v_{uv} = \frac{v}{\frac{L}{H} \cos \alpha + \sin \alpha} \quad (5)$$

Przy przepływie przeciwproudowym prędkość unoszenia cząstki

$$v_{up} = \frac{v}{\frac{L}{H} \cos \alpha - \sin \alpha} \quad (6)$$

Przy przepływie poprzecznoproudowym prędkość unoszenia cząstki

$$v_{ub} = \frac{v}{\frac{B}{H} \cos \alpha} \quad (7)$$

gdzie  $v_{u(v, p, b)}$  - prędkość unoszenia cząstki przy podanych wyżej przepływach, cm/s,

$v$  - średnia prędkość przepływu strumienia, cm/s,

$L$  - długość płytki, cm,

$H$  - odległość między płytkami, cm,

$B$  - długość pakietu płytek, cm.

Doświadczenia z klarownikami płytkowymi wykazały, że pracują one dobrze przy prędkościach unoszenia pojedynczych ziarn  $u_u = 0,15$  mm/s i wyższych. Odpowiada to dolnej granicy podziałowej  $13 \mu\text{m}$  w odniesieniu do ziarna o gęstości  $2,60 \text{ g/cm}^3$ , opadającego w wodzie [1], [4].

Najmniej wrażliwe na zaburzenia przepływu, i tym samym procesu klarowania, są klarowniki z płytkami poprzecznoproudowymi [6], [8].

### 3. WYNIKI KLASYFIKACJI HYDRAULICZNEJ

Rezultatem prac badawczych prowadzonych w byłym Centralnym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Przemysłu Kruszyw Budowlanych /obecnie Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego/ jest opracowanie zestawów do klasyfikacji piasków i klarowania wody.

Podstawowymi urządzeniami są klasyfikatory faliste o podstawowych granicach podziałowych  $d_p = 0,5$  mm i  $1,0$  mm, hydrocyklon  $\varnothing 500$  mm o kącie wierzchołkowym  $30^\circ$  oraz klarownik płytkowy o wymiarach zewnętrznych  $3000 \times 3000 \times 500$  mm. Klasyfikatory faliste są typu współprądowego, tzn. zawieszinę doprowadza się do komory klasyfikacji od dołu poprzez kolumnę doprowadzającą. Częścią składową klasyfikatora jest kolumna wyrównawcza ciśnienia wody doprowadzanej do klasyfikatora.

Na rys. 2 przedstawiono w.w.klasyfikator. Regulacji granicy podziałowej dokonuje się przez wymianę dysz w kolumnie stabilizacyjnej i wy-

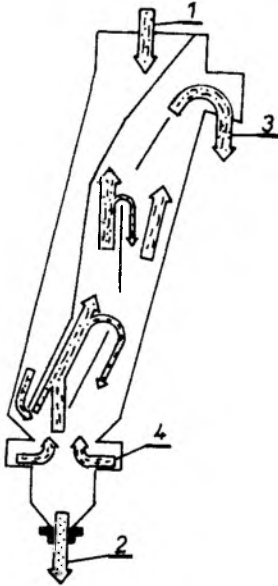


Fig.2. Wave classifier ;

1-inlet of suspension, 2-outlet of coarse sand, 3-overflow of fine sand suspension, 4-water delivery

Rys.2. klasyfikator falisty<sup>†</sup>

1-doprowadzenie zawiesiny, 2-wylew grubego piasku, 3-przelew zawiesiny drobnego piasku, 4-doprowadzenie wody.

lewie klasyfikatora. Na rys. 3 przedstawiono schemat technologiczny tak zwanego "powtarzalnego węzła hydroklasyfikacji piasku", w zestawie którego znajdują się dwa hydrocyklony i klasyfikator falisty. W tabelicy 1 zestawiono uziarnienie nadawy i produktów klasyfikacji powtarzalnego węzła.

Tablica 1

Uziarnienie, mm	Nadawa %	Fracja 0,5-2,0 mm	Fracja 0,063-0,5 mm
> 2,0	8,7	11,6	-
0,5 - 2,0	37,8	70,6	12,7
0,25 - 2,0	32,9	17,8	81,2
0,125 - 0,25	16,7	-	4,6
0,063 - 0,125	2,9	-	1,5
< 0,063	1,0	-	-

Powyższe rezultaty osiągnięto przy obciążeniu węzła 30-50 Mg/h suchej masy. Zużycie wody czystej wynosi 5-6 m<sup>3</sup>/Mg piasku. Zużycie mocy 4 kW/Mg. Współczynnik dokładności rozdziału hydrocyklonu K = 0,68, klasyfikatora K = 0,73. Granice podziałowe d<sub>p</sub>, hydrocyklonu 0,063 mm, klasyfikatora 0,49 mm [3].

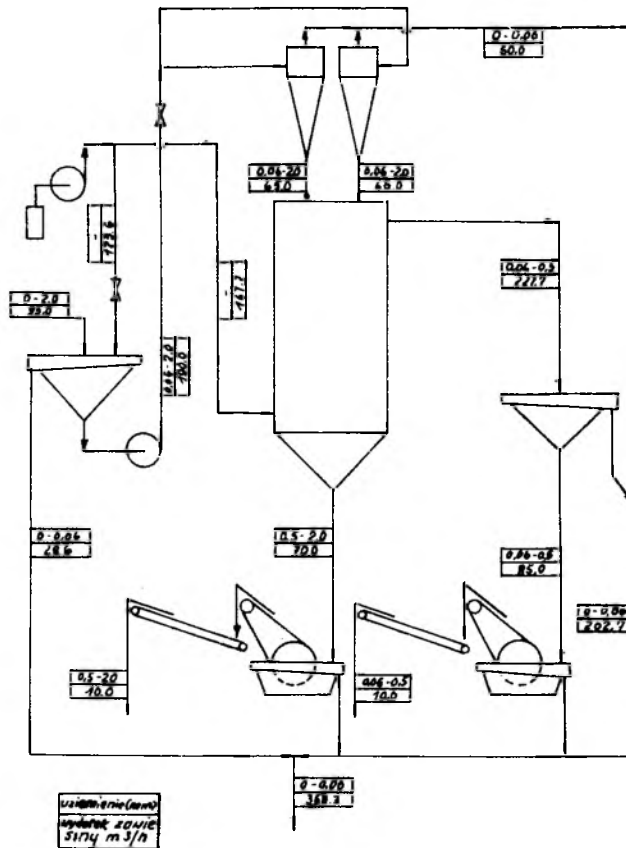


Fig.3. Technological plan of reproducible node for sand classification

Rys.3. Schemat technologiczny powtarzalnego węzła klasyfikacji piasku

W wielostopniowym węźle klasyfikacji zastosowano: hydrocyklon, klasyfikator falisty o granicy podziałowej  $d_p = 1,0$  mm, klasyfikator falisty o granicy podziałowej  $d_p = 0,5$  mm. Na rys. 4 przedstawiono schemat technologiczny i wydatki jakościowo-ilościowe wielostopniowego węzła klasyfikacji, a w tabelicy 2 uziarnienie nadawy i produktów rozdziału.

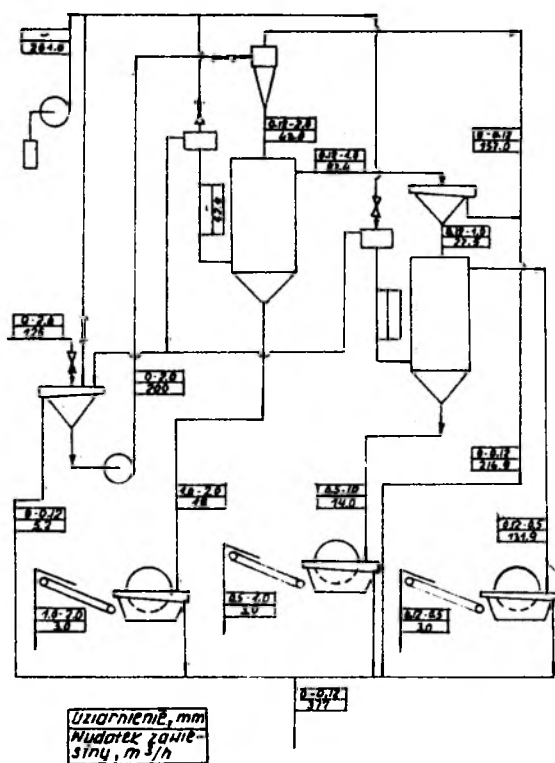


Fig.4. Technological plan of multistage node for sand classification

Rys.4. Schemat technologiczny wielostopniowego węzła klasyfikacji piasku.

Tablica 2

Uziarnienie, mm	Nadawa, %	Frakcja 1-2 mm	Frakcja 0,5-1,0 mm, %	Frakcja 0,063-0,5 mm, %
>2,0	2,0	12,0	-	-
1,0-2,0	9,0	71,0	6,0	-
0,5-1,0	24,0	12,0	77,0	5,0
0,25-0,5	48,0	4,0	10,5	55,0
0,125-0,25	12,0		6,0	39,0
0,063-0,125	3,0	1,0	0,5	1,0
<0,063	2,0	-	-	-

Rzeczywiste granice podziałowe  $d_p$  wynosiły 0,071 mm, 0,47 mm i 0,97 mm. Natomiast współczynniki dokładności rozdziału  $K$  poszczególnych stopni odpowiednio: 0,69; 0,68 i 0,63. Powyższe rezultaty osiągnięto przy przepustowości wężla 16 Mg/h, zużycie energii 3 kW/Mg i zużycie wody 7,0 m<sup>3</sup>/Mg piasku [5].

#### 4. KLAROWANIE WODY

Dla zapewnienia wykorzystania wody w obiegu zamkniętym w procesie płukania kruszywa zostały przeprowadzone badania jej klarowania w prototypowym poprzeczno-prądowym klarowniku płytkowym o powierzchni zabudowy 9,0 m<sup>2</sup>. Nachylenie płytek wynosiło 68°, a odstęp między nimi 25 mm. Do badań użyto między innymi gliny ceglarskiej "Henryków", "Władysławów" i "Pruszków", zbliżone swoim składem mineralnym i uziarnieniem do zanieczyszczeń gliniastych kruszywa "Ławica Słupska". W tabelicy 3 przytoczono niektóre dane z przeprowadzonych badań [10].

Tablica 3

Lp.	Nazwa gliny	Zawartość części stałych, g/l			Granica podział. $\mu\text{m}$
		nadawa	przelew	wylew	
1.	Henryków	23,96	8,07	55,10	10,0
2.	Władysławów	61,27	10,79	159,09	12,0
3.	Pruszków	30,15	4,98	154,39	15,0
4.	Pruszków	41,54	5,33	207,81	17,0

Przepływ zawiesiny wynosił 40-60 m<sup>3</sup>/h przy prędkości 0,75-1,12 cm/s. Zgodnie ze wzorem (7) przy podanej wyżej prędkości przepływu i parametrach klarownika, prędkość unoszenia cząstek wynosiła  $v_u = 0,019-0,028$  cm/s.

Przy tej prędkości unoszenia granica podziałowa  $d_p = 14-18 \mu\text{m}$ . W badaniach stosowano także flokulanty: skrobiowy P-26 i syntetyczny Gigtar-S. Flokulanty nie tylko nie spowodowały przyśpieszenia sedymentacji, ale spowodowały jej spowolnienie. W miarę zwiększania dawki flokulantów zwiększyła się granica podziałowa i zmniejszała zawartość części stałych w wylewie klarownika.

Reasumując, klarownik płytkowy jest przydatny do klarowania zawiesin zawierających cząstki powyżej 10-15  $\mu\text{m}$ . Można w nim przyśpieszyć prędkość sedymentacji ziarn kilkakrotnie w porównaniu z sedymentacją naturalną. Dolna granica podziałowa możliwa do osiągnięcia w warunkach przemysłowych wynosi 12-15 mikrometrów.

## LITERATURA

1. Binder H., Wiesmann U., Sedimentation in Lamellenabscheidern. Aufbereitungs Technik. nr 2 i 3, 1983.
2. Bore M.A. Boczkow J.N., Zarubin L.S., Sznokowye osaditelnyje centrifugi dla ugotnoj promyszlenosti, Moskwa 1970, Niedra.
3. Grzelak E., Malinowski A., Problemy technologiczne produkcji piasków hydroklastyfikowanych. XXV Jubileuszowa Konferencja Naukowa K.I.L.W. PAN i Komitetu PZITB, Krynica 1979.
4. Lange R., Feinsandrückgewinnung nach dem Lamelleneindickerprinzip. Aufbereitungs Technik nr 12, 1990.
5. Malinowski A., Klasyfikacja hydrauliczna piasku, Prace COBRPKB nr 1-2/1982.
6. Nowack E. Lammellenklärer - eine wirtschaftliche Lösung für sauberes Wasser und hohe Eindickung. Aufbereitungs Technik. nr 6, 1990.
7. Richardson J.F., Zaki W.N., Sedimentation and fluidization. Part I Trans.Inst.Chem. Engrs nr 32/1954.
8. Schlitter W.E., Lamellenklärer, Kompaktgeräth mit hohem Raumausnutzungsgrad, Aufbereitungs - Technik nr 9/1976.
9. Schubert H. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Leipzig 1968.
10. Tarkowski P. i inni, Doskonalenie wyposażenia stanowiska doświadczalnego oczyszczania wód. COBRPKB-1980 /niepublikowana/.

Grzelak E., 1992. Hydroclassification of Small Particles and Suspensions. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 25-32 (polish text).

The hydroclassification theory in application to vertical and horizontal classifiers, hydrocyclones and lamellar separators is given. Machine sets design and classification and sedimentation processes, results of mortar and concrete sands are described. It has been found that designed machine sets allow the classification on limits of 0.063, 0.5 and 1.0 mm. The classification on a limit of 15  $\mu\text{m}$  is assured by the lamellar separator.



Janusz GOGAŁA\*

## WPLYW ZASTOSOWANIA WIRNIKA W KLASYFIKATORZE WIROWYM WK400 NA EFEKTY KLASYFIKACJI

Pneumatyczny klasyfikator WK 400 z płaską komorą klasyfikacji jest przeznaczony do rozdziału w zakresie bardzo drobnych ziarn (poniżej 20  $\mu\text{m}$ ). W wyniku klasyfikacji wielu materiałów uzyskiwano niskie granice rozdziału [1], jednak produkt drobny zawierał pewną ilość ziarn grubych. Wykorzystując materiały informacyjne czołowych firm [2], produkujących klasyfikatory i doświadczenia uzyskane w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn PWr., postanowiono [3] zastosować wirnik przepływowy w klasyfikatorze WK 400. Wykonano badania porównawcze i na ich podstawie oceniono pozytywnie wprowadzoną zmianę konstrukcyjną.

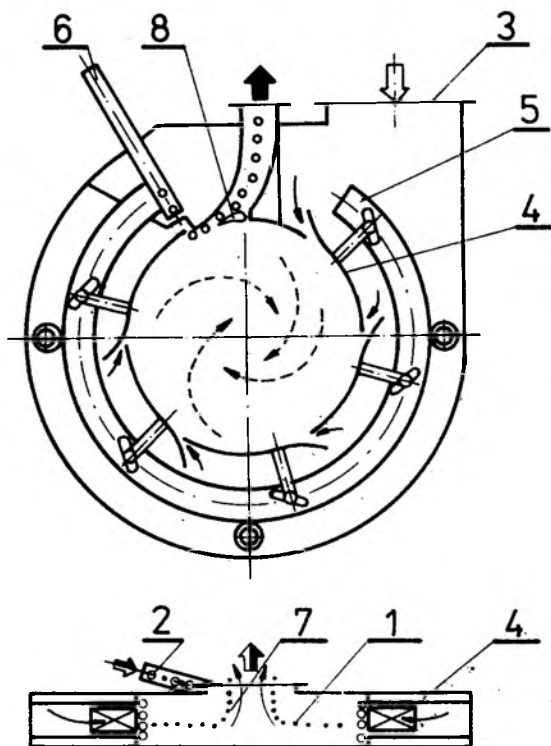
### 1. OPIS KLASYFIKATORA I STANOWISKA BADAWCZEGO

#### 1.1. Zasada działania

Schemat płaskiej wirowej komory klasyfikacji przedstawiono na rys.1. Nadawa wstępnie rozpędzona jest podawana stycznie do wirowej komory 1 przez kruciec 2. Powietrze robocze jest zasysane przez otwór wlotowy 3 i kierowane poprzez stycznie usytuowane łopatki 4 do strefy klasyfikacji. Łopatki kierujące są przestawiane ręcznie mechanizmem 5 napędzanym dźwignią 6. Dobierając właściwe położenie łopatek 4 uzyskuje się odpowiednie pochylenie toru cząstek oraz prędkość obwodową powietrza w komorze klasyfikacji, co wpływa istotnie na wielkość ziarna granicznego.

Na ziarna poruszające się w zawirowanym strumieniu powietrza roboczego działają siły masowe, siły powierzchniowe oraz siły losowe (gradientowe, od zderzeń ziarn i siły oddziaływań fizykochemicznych). W wyniku następuje rozdział na produkt drobny, który ulatuje wraz z powietrzem przez otwór 7 do układu separacji i produkt gruby. Grube ziarna, krążąc po części zewnętrznej komory, są przedmuchiwane strumieniami powietrza

\* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska



Rys.1. Schemat wirowej komory klasyfikacji  
Fig.1. Schematic of a vortex classification chamber

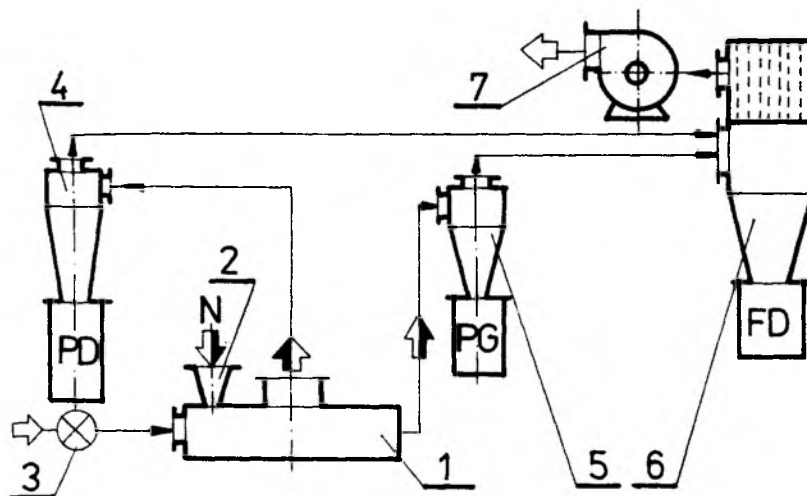
roboczego i napotykając na uchyloną klapę 8 opuszczają komorę klasyfikacji i są kierowane do zbiornika grubego produktu.

### 1.2. Instalacja klasyfikatora WK-400

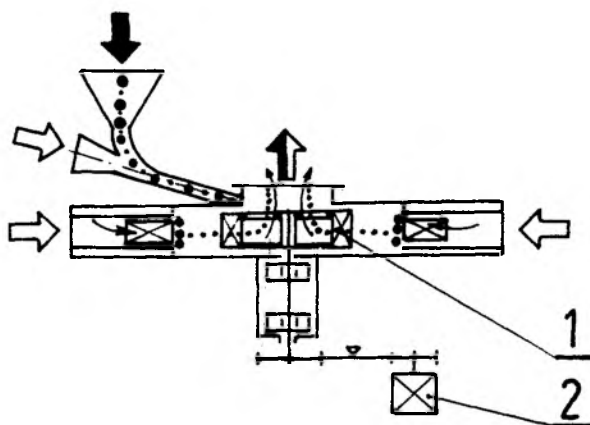
Wirowa komora klasyfikacji 1 (rys.2) jest zamontowana w instalacji pneumatycznej składającej się z: lejki zasypowego 2, zaworu wlotowego powietrza roboczego 3 cyklona drobnego produktu 4 wraz z śluzą, cyklona grubego produktu 5 wraz z śluzą, filtra tkaninowego 6 i wentylatora wyciągowego 7. Klasyfikator został skonstruowany i wybudowany w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn P.Wr.

### 1.3. Wirnik

Konstrukcja wirnika jest dopasowana do wymiarów wirowej komory klasyfikacji, tak aby przesłonić otwór wylotowy drobnego produktu (rys.3). Wirnik obraca się współbieżnie do zawirowanego strumienia powietrza robo-



Rys.2. Schemat instalacji klasyfikatora wirowego  
Fig.2. General layout of an air vortex classifier



Rys.3. Wirowa komora klasyfikacji z wirnikiem  
Fig.3. Vortex classification chamber with a rotor

czego i odrzuca nadwymiarowe ziarna materiału. Wirnik 1 jest napędzany silnikiem 2 prądu stałego poprzez przekładnię pasową.

#### 1.4. Dane techniczne klasyfikatora WK-400

Niżej podano najważniejsze dane techniczne:

średnica komory wirowej	400 mm
wysokość komory wirowej	60 mm
średnica wirnika	200 mm
prędkość obrotowa wirnika	500-4000 obr/min
silnik napędowy wirnika typ	Pzb 35b
moc znamionowa silnika	1,1 kW
prędkość znamionowa	3000 obr/min
przepustowość	50-1000 kg/h
ziarna graniczne $d_{50}$	10-30 $\mu\text{m}$
ziarno $d_{97}$ (patrz p. 2e)	20-60 $\mu\text{m}$
zapotrzebowanie powietrza roboczego	ok. 1000 $\text{m}^3/\text{h}$
masa klasyfikatora	ok. 350 kg

Klasyfikator WK 400 jest podłączony do układu odpylania w laboratorium IKEM, który składa się z:

filtra tkaninowego typ AF40-1991,  
wentylatora MWW 18 (1020  $\text{m}^3/\text{h}$ , 950  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 2890 obr/min).

## 2. METODYKA PROWADZENIA PRÓB I OPRACOWANIA WYNIKÓW

Uruchomienie klasyfikatora wymagało włączenia elektrycznych silników napędowych: wentylatora wyciągowego, śluzy grubego i drobnego produktu, wirnika. Po ustaleniu poziomu podciśnienia w układzie wsypywano odważoną porcję nadawy (20 kg) do klasyfikatora z ustaloną prędkością.

Po zakończeniu próby ważono produkty: gruby i drobny. Część najdrobniejszych klas ziarnowych, należąca do drobnego produktu, ulatywała każdorazowo do filtra i nie mogła być odzyskana. W bilansie mas zaliczano ją do drobnego produktu.

Z nadawy i produktów pobierano próbki do analiz metodą Andreasena (PW-66/Z-04008).

Przyjęto następujące wskaźniki jakości procesu klasyfikacji:

a) Liczba Trompa L

$$L = \frac{Gg_i}{Gg_i + Dd_i} \cdot 100\%$$

gdzie G, D - masa produktu grubego i drobnego

$g_i$ ,  $d_i$  - udziały wagowe i-tej klasy ziarnowej odpowiednio w produkcie grubym i drobnym,

b) ziarno graniczne  $d_{50}$  odczytywane z krzywej Trompa,

c) ostrość rozdziału  $\alpha$  i B

$$\alpha = d_{75}/d_{25}, \quad B = \frac{75-25}{d_{75}-d_{25}},$$

gdzie  $d_{75}$ ,  $d_{25}$  - wartości określone z krzywej Trompa,

d) wychód drobnego produktu

$$W_d = D/N, \quad \text{gdzie } N = D + G,$$

e) wartość ziarna  $d_{97}$  określająca 3% pozostałości na sicie  $d_{97}$  w produkcie drobnym, którą odczytywano z krzywej składu ziarnowego produktu drobnego.

### 3. NADAWA

Do badań użyto mączki chalcedonitowej (gęstość 2400 kg/m<sup>3</sup>). Jest to produkt rozdrabniania w młynie strumieniowym. W tabeli 1 podano uśredniony skład ziarnowy nadawy.

Tabela 1. Skład ziarnowy nadawy

Wymiar klasy ziarnowej w $\mu\text{m}$	60-40	40-30	30-20	20-10	10-5	5-0
Udział masowy klasy ziarnowej w %	13,3	11,2	18,4	22,0	22,2	12,9

### 4. CEL BADAŃ

Jak wspomniano na wstępie, klasyfikator WK 400, pomimo że dzieli nadawę na produkty nawet przy niskim ziarnie podziałowym (10  $\mu\text{m}$ ), to produkt drobny zawiera niewielką ilość ziarn grubych. Ilość nadziarna rośnie w miarę wzrostu przepustowości. Zastosowanie wirnika, jak można się spodziewać, usunie tę wadę produktu drobnego.

### 5. PROGRAM BADAŃ

Program badań obejmował dwie serie prób:

- próby bez wirnika
- próby z wirnikiem,

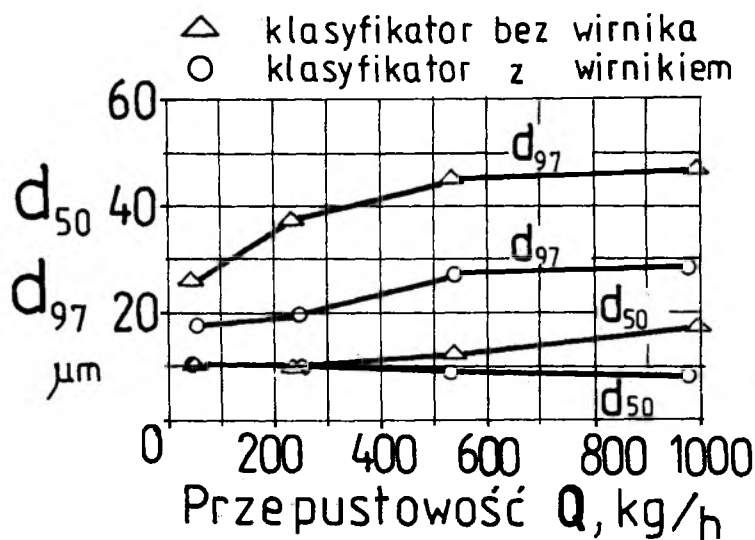
Próby przeprowadzono przy kilku przepustowościach w zakresie do 1000 kg/h.

## 6. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań zamieszczono w tabeli 2 zgodnie z programem badań. Wirnik obracał się z prędkością 4000 obr/min.

## 7. ANALIZA WYNIKÓW

W pierwszej kolejności analizowano wartości wskaźników jakości  $d_{50}$  i  $d_{97}$ . Wyniki badań przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Wpływ zastosowania wirnika na wartość ziarna  $d_{50}$  i  $d_{97}$   
 Fig.4. Effect of a rotor on grain quality characteristics,  $d_{50}$  and  $d_{97}$

Wpływ zastosowania wirnika widać najwyraźniej analizując wartości  $d_{97}$ . W całym zakresie przepustowości otrzymano znacznie korzystniejsze wyniki dzięki zastosowaniu wirnika.

Podobnie, chociaż w mniejszym stopniu, kształtują się wartości ziarna granicznego  $d_{50}$ . Przy większych przepustowościach widać (rys.4) wyraźnie pozytywny wpływ wirnika.

Również stabilność rozdziału, rozumiana jako niezależność wartości ziarna granicznego  $d_{50}$  od strumienia nadawy Q, jest lepsza w klasyfikatorze z wirnikiem.

Analizując wartości wskaźników ostrości rozdziału (tab.2:  $\mathcal{L}$ , 8), a w szczególności wskaźnika B widać, że w klasyfikatorze z wirnikiem jest on korzystniejszy. Natomiast wychód drobnego przedmiotu  $W_D$  jest niższy,

Tabela 2. Wyniki klasyfikacji przy różnych przepustowościach

Nr pr.	Przepustowość Q	Prędkość obrotowa n <sub>w</sub>	klasa ziarnowa	Udział masowy klasy ziarn.		Liczba Trompa L <sub>T</sub>	Ziarno graniczne d <sub>50</sub>	Ostrość rozdziału		d <sub>97</sub>	Wychód W <sub>d</sub>
				d <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>			α	β		
-	kg/h	obr/min	µm	%	%	%	µm	-	-	%	µm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	49	0	63-40	8,1	1,4	98	10,5	5,8	4,2	25	32
			40-30	13,2	1,1						
			30-20	27,5	1,1						
			20-10	36,3	21,9						
			10-5	9,5	41,5						
			5-0	5,4	33,0						
2	236	0	63-40	18,4	6,6	93	10	2,1	7,7	53	37
			40-30	11,9	6,4						
			30-20	30,0	4,9						
			20-10	33,5	4,5						
			10-5	3,6	38,2						
			5-0	2,6	39,4						
3	537	0	63-40	14,8	5,4	90	12,5	3,3	2,8	50	45
			40-30	22,7	6,6						
			30-20	28,6	4,0						
			20-10	23,3	17,2						
			10-5	7,6	33,2						
			5-0	3,0	33,6						
4	1000	0	63-40	27,2	3,4	82	17,5	4,9	2,6	44	46
			40-30	16,6	4,4						
			30-20	21,6	7,7						
			20-10	17,6	27,2						
			10-5	11,1	29,5						
			5-0	5,9	27,8						
5	48	4000	63-40	13,5	0,6	100	10,5	1,7	9,1	17,5	29
			40-30	9,9	0,4						
			30-20	28,4	0,1						
			20-10	38,8	8,9						
			10-5	5,6	41,8						
			5-0	3,8	48,2						
6	247	4000	63-40	5,3	0,3	98	10,0	7,3	4,0	19,5	30
			40-30	23,7	0,7						
			30-20	27,5	1,4						
			20-10	26,1	16,3						
			10-5	8,7	35,3						
			5-0	8,7	46,0						
7	526	4000	63-40	12,8	0,5	90	9,5	6,5	5,0	27,5	26
			40-30	19,4	0,8						
			30-20	21,3	6,8						
			20-10	32,6	14,0						
			10-5	5,7	29,3						
			5-0	8,2	48,6						
8	973	4000	63-40	18,7	0,9	92	8,6	6,5	4,5	28,5	21
			40-30	18,9	1,5						
			30-20	20,9	7,0						
			20-10	29,5	14,2						
			10-5	6,5	28,4						
			5-0	5,5	48,0						

gdyż strumień powietrza wywołany przez wirnik odrzuca część ziarn, które w przypadku braku wirnika przeszłyby do drobnego produktu.

#### 8. WNIOSKI

Zastosowanie wirnika w klasyfikatorze WK-400 najkorzystniej wpłynęło na ilość nadziarna ( $d_{97}$ ) w drobnym produkcie i spowodowało obniżenie jego ilości o ok. 40%.

#### LITERATURA

- [1] Gogała J., Hołdanowicz J., Pigłowski J., Udoskonalona technologia wytwarzania wypełniacza krzemionkowego do produkcji farb przy zastosowaniu nowego typu klasyfikatora, XVII Krakowska Konferencja Naukowo-Techn. Przeróbki Kopalin, Krościenko 1984.
- [2] Materiały firm ALPINE, NAUTAMIX, PFEIFFER AG, POLYSIUS, STURTEVANT.
- [3] Gogała J., Badanie procesu klasyfikacji w klasyfikatorze wirowym - - przebudowa stanowiska, Raport nr S 056/91, Wrocław 1991.

Gogała J., 1992. Influence of a Rotor Applied in a Pneumatic Classifier upon the Separation Results. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 33-40 (polish text).

The pneumatic classifier WK-400 is designed for separating extremely fine material. The final fine-size product has been frequently found to contain an unacceptable amount of oversize grains. The presented experimental study shows how to cope with the problem by installing a rotor.



Paweł MODZEL\*

## ZASTOSOWANIE METODY FOTOGRAFII PLAMKOWEJ DO BADANIA POLA PRĘDKOŚCI CHWILOWEJ PRZEPIYWÓW DWUFAZOWYCH

Praca prezentuje możliwość zastosowania bezkontaktowej metody fotografii plamkowej do pomiaru pola prędkości chwilowej w przepływach dwufazowych. Prezentowane są podstawy fizyczne metody oraz zależności i schematy układów pomiarowych. Opracowanie zawiera przykładowe wyniki badań przeprowadzonych tą metodą.

### 1. WSTĘP

Metodę fotografii plamkowej zaliczyć można do grupy optycznych metod pomiarowych. Są to bezkontaktowe techniki umożliwiające pomiar pola prędkości przepływu dwufazowego. Szczególną ich zaletą jest fakt, iż pozwalają na uzyskiwanie danych dotyczących zarówno kierunku, jak i wartości wektora prędkości przepływu bez wprowadzania zaburzeń miejscowych, które wywołują wszelkiego rodzaju sondy stosowane w metodach kontaktowych.

Do najczęściej stosowanych metod optycznych zalicza się różne odmiany fotografowania wizualizowanego przepływu. Warunkiem niezbędnym do zastosowania tych technik jest przezroczystość ścian kanału przepływowego oraz badanego ośrodka, jeśli pomiar nie ogranicza się do rejonu warstwy przyściennej.

W zależności od zastosowanej aparatury i parametrów rejestracji możliwe jest uzyskiwanie informacji o charakterze ilościowym lub jakościowym. W pewnych warunkach możliwe jest też określenie wielkości poszczególnych składników przepływu oraz ich rozmieszczenie w przestrzeni.

---

\* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej

Skrótowy wykaz metod wykorzystujących zjawiska optyczne stosowane w badaniach przepływów zawiera tabela 1.

Wymienione w niej techniki obarczone są jednak wieloma niedoskonałościami. Np. metody typowo fotograficzne pozwalają najczęściej na uzyskiwanie informacji o charakterze jakościowym zachodzących zjawisk. Z reguły nie pozwalają też na ściśle określenie wartości wektora prędkości w dowolnym punkcie kanału przepływowego.

Metoda bardziej wyrafinowana, o bardzo dużej dokładności, jak np. Laserowa Anemometria Dopplerowska, pozwala na wyznaczenie składowej wektora prędkości w jednym punkcie. Kolejne pomiary oznaczają konieczność przemieszczania układu pomiarowego w nowe położenie. Ponadto występuje ograniczenie dotyczące koncentracji fazy stałej w badanym ośrodku.

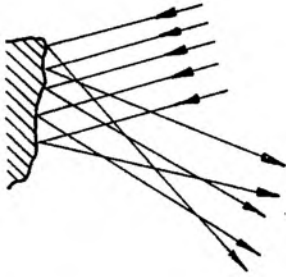
T a b e l a 1.

fotograficzna rejestracja toru:	- jednoekspozycyjna
	- wieloekspozycyjna (stroboskopowa)
	- stereoskopowa
	- z wykorzystaniem pozaoptycznych zakresów promieniowania
rejestracja filmowa:	
	- w układzie względnym
	- w układzie bezwzględnym
rejestracja holograficzna	
metoda cieniowa	
laserowa anemometria dopplerowska	

Na tym tle zwraca na siebie uwagę metoda fotografii plamkowej, która pozwala na zarejestrowanie stanu pola prędkości chwilowej w całym, dowolnie wybranym przekroju kanału przepływowego.

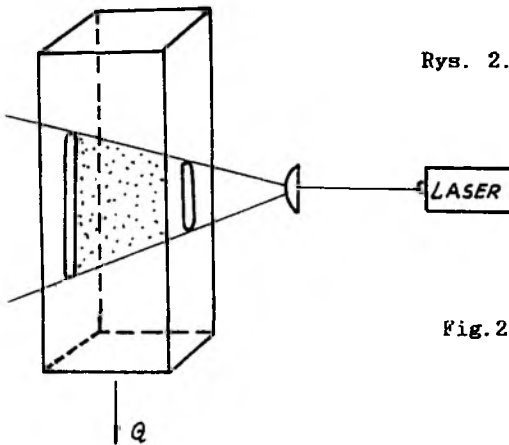
Początkowo metoda ta stosowana była do pomiarów przemieszczeń ciał stałych w oparciu o rejestrację tzw. struktur plamkowych, powstających przy oświetleniu powierzchni optycznie niegładkich. Zjawisko to, przedstawione na rys. 1, jest wynikiem wielokrotnej interferencji promieni światła spójnego odbitych od, traktowanych jako mikrozwierciadła, nierówności powierzchni.

Aplikacja metody do badania zjawisk przepływowych polega na zastąpieniu rejestracji struktury plamkowej rejestracją obrazów drobin unoszonych w badanym przepływie dwufazowym - rys. 2. Stosując oświetlenie tzw. nożem świetlnym wydzielamy z obszaru przepływowego wybrany przekrój do przeprowadzenia analizy. Rejestrując na jednym materiale światłoczułym dwa kolejne położenia drobin, które w czasie  $\Delta t$  przebyły drogę  $d$ , uzyskujemy tzw. plamkogram posiadający własności siatki dyfrakcyjnej (rys. 3).



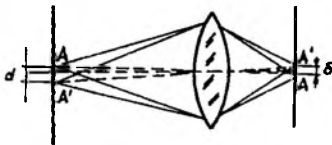
Rys. 1. Schemat tworzenia struktury plamkowej

Fig.1 Scheme of the speckle structure forming



Rys. 2. Schemat rejestracji "struktury plamkowej" w przepływie dwufazowym przy oświetleniu "nożem świetlnym"

Fig.2 Scheme of the speckle structure recording for two-phase flow using light-sheet technique

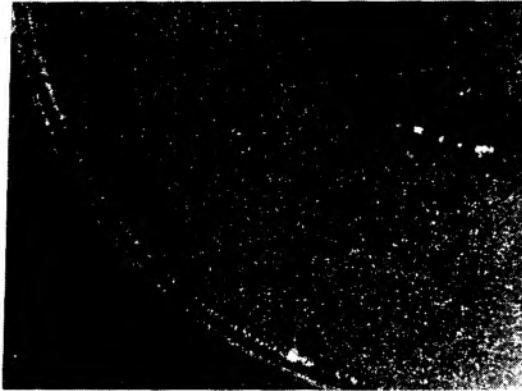


Rys. 3. Schemat tworzenia siatki dyfrakcyjnej przy rejestracji struktur plamkowych

Fig.3 Scheme of the diffraction grating forming in a speckle structure recording

- d - przemieszczenie plamek rzeczywiste,
  - $\delta$  - przemieszczenie plamek na materiale światłoczułym,
  - p - powiększenie fotograficzne
- $$\delta = p \cdot d$$

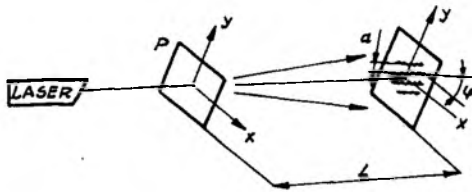
Rys. 4 przedstawia przykładowe zdjęcie struktury plamkowej, zarejestrowanej w trakcie pomiarów pola prędkości chwilowej.



Rys. 4. Zdjęcie kanału przepływowego z zarejestrowanym obrazem plamkowym

Fig.4 Photography of flow channel with speckle structure image

Określenie wartości i kierunku wektora prędkości chwilowej prowadzi się w układzie przedstawionym na rys. 5.



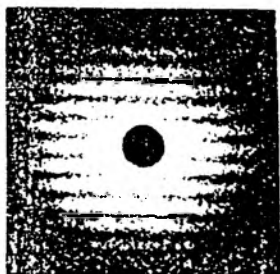
Rys. 5. Schemat układu do analizy obrazów plamkowych

Fig.5 Scheme of the set for specklogram analysis:

- P - plamkogram,
- L - odległość do ekranu,
- a - odległość między prążkami interferencyjnymi,
- $\varphi$  - kąt pochylenia prążków do przyjętego układu współrzędnych

Prześwietlając wybrany punkt zarejestrowanego obrazu kanału przepływowego równoległą wiązką światła spójnego uzyskujemy na ekranie prążki interferencyjne analogicznie jak w doświadczeniu Younga. Rys. 6 ilustruje widoczne na ekranie efekty optyczne. Kierunek wektora

prędkości jest prostopadły do obserwowanych prążków. Wartość wektora prędkości  $V$  wyznacza się z zależności (1) określając uprzednio odległość międzyprążkową:



$$V = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \quad (1)$$

Rys. 6. Obraz prążków interferencyjnych widocznych na ekranie

Fig.6 An image of the interference pattern observed on a screen

Uwzględniając  $\varphi$  - kąt pochylenia prążków interferencyjnych do przyjętego układu współrzędnych wyznaczamy składowe wektora prędkości.

$$U = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \sin \varphi \quad (2)$$

$$W = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \cos \varphi \quad (3)$$

$L$  - odległość plamkogramu od ekranu,

$\lambda$  - długość fali światła spójnego,

$p$  - powiększenie fotograficzne,

$a$  - odległość między prążkami,

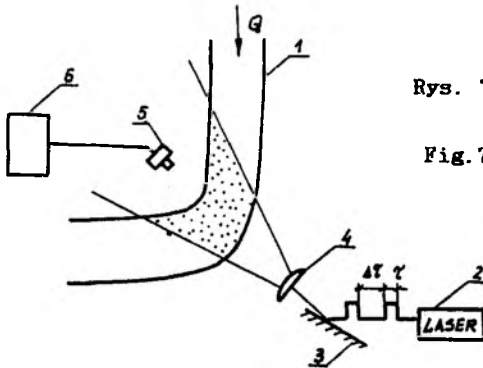
$\Delta\tau$  - odstęp czasu między ekspozycjami,

$U, W$  - składowe wektora prędkości w przyjętym układzie współrzędnych.

Warunkiem dokonania pomiaru jest wystąpienie przemieszczenia drobin na odległość większą od ich rozmiaru, co warunkuje powstanie na plamkogramie struktury dyfrakcyjnej.

## 2. POMIARY

W Laboratorium Doświadczalnej Analizy Naprężeń i Odształceń Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej podjęto próbę praktycznego zastosowania metody fotografii plamkowej do pomiaru prędkości chwilowej w przepływie dwufazowym. Badania prowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 7.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Fig.7 Scheme of the investigation set;

- 1 - kanał przepływowy,
- 2 - źródło światła - laser dwuimpulsowy,
- 3 - zwierciadło kierujące,
- 4 - soczewka formująca "nóż świetlny",
- 5 - sonda optoelektroniczna,
- 6 - oscyloskop

Kanałem przepływowym była rura szklana o średnicy  $\phi = 18$  mm, wygięta pod kątem prostym na promieniu  $R = 70$ . Rejestrowano ruch drobin PCW o średnicy  $\phi_d = 40$   $\mu\text{m}$ , unoszonych w przepływie wody.

Parametry przepływu:  $V_{sr} = 0,419$  m/s,  
 $Re = 6611$ .

Przy doborze parametrów rejestracji przyjęto, iż do zarejestrowania ostrego obrazu poruszających się drobin nie mogą one przemieścić się na odległość większą niż 10 % swojej średnicy

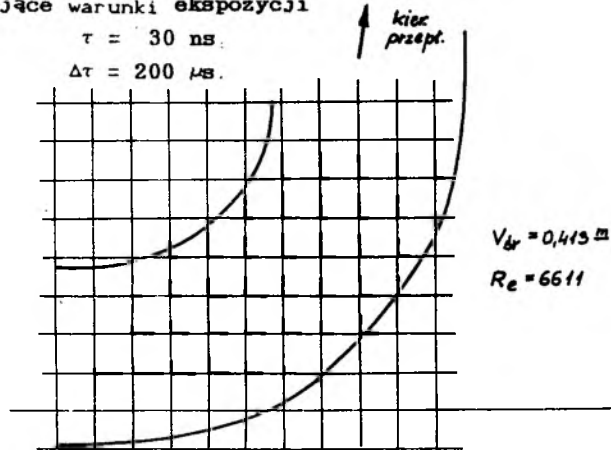
$$d_\tau < 0,1 \phi_d \quad (4)$$

W praktyce badania ośrodków rozdrobionych oznacza to, iż przy prędkościach rzędu 50 m/s i rozmiarach drobin  $\phi_d \cong 50$   $\mu\text{m}$  czasy rejestracji powinny zawierać się w przedziale  $\tau_{max} = 50 - 150$  ns.

Dobór przedziału czasu między ekspozycjami wymaga uwzględnienia, iż obrazy kolejnych położenia drobin nie powinny wyjść z obszaru wiązki analizującej. Jest to warunek zachowania korelacji, pozwalającej na analizę metodą dyfrakcyjną obrazów plamkowych. Dla omawianych zjawisk  $\Delta\tau = (4 - 6 \mu\text{m})$ .

Prezentowany w niniejszym opracowaniu eksperyment przeprowadzono wykorzystując laser impulsowy znajdujący się w Instytucie Optyki Stosowanej w Warszawie.

Przyjęto następujące warunki ekspozycji



Rys. 8. Rozkład prędkości w badanym kanale przepływowym

Fig.8 Velocity distribution in a test channel

Analiza plamkogramu przedstawionego na rys. 4 prowadzona była w układzie optycznym prezentowanym na rys. 5.

Zastosowana do analizy wiązka analizująca miała średnicę  $\phi_a = 1 \text{ mm}$ . Punkty pomiarowe rozmieszczone były w węzłach siatki prostokątnej o gęstości 2 mm. Rys. 8 przedstawia rozkład składowych wektora prędkości chwilowej w przyjętym do analizy prostokątnym układzie współrzędnych.

#### WNIOSKI

Potwierdzono przydatność przedstawionej w opracowaniu metody fotografii plamkowej do badania pola prędkości chwilowej w przepływach ośrodków dwufazowych. Analiza literatury wskazuje na próbę zastosowania jej także w badaniach ośrodków gazowych.

Ze względu na dużą dokładność metody oraz szeroki przedział prędkości możliwych do zarejestrowania (praktycznie od ułamków mm/s do

kilkuset m/s) metoda ta może stać się w niedługim czasie powszechnie stosowana w badaniach dużej gamy zjawisk przepływowych, takich np. jak: układy dolotowe silników spalinowych, maszyny i urządzenia transportu hydraulicznego i pneumatycznego.

#### Literatura

- [1] Fomin N.A., Interferometria plamkowa w przepływach gazów. Nauka i Technika, Mińsk 1989
- [2] Szczepiński W., pod red., Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. PWN, Warszawa 1984.
- [3] Barker D.B., Fourney M.K., Optics Letters 1977, Vol. 1, nr 4, pp. 135 - 137.

**Modzel P., 1992. Application of a Speckle Photography in an Investigation of Two-Phase Flow Field Velocity. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 41-48 (polish text)**

A paper contains a short description of a speckle photography in measurement of flow velocity field. Basing on time intervals between recordings and displacement of markers during the flow and the velocity vector components, the calculation of velocity vector components in every point of the area tested is possible.



*Andrzej HEIM\**

## MONODYSPERSYJNOŚĆ UKŁADÓW MIELONYCH W MŁYNACH PEREŁKOWYCH

Przedstawiono wyniki rozdrabniania na mokro barwnika o nazwie Granat Syntenowy P-BL w laboratoryjnych młynach perełkowych dwóch konstrukcji: pionowym z mieszadłem wielotarczowym oraz z mieszadłem kielichowym. Zmiany stanów granulometrycznych materiału w czasie mielenia opisano za pomocą momentów zmiennych losowych i ich funkcji. Na ich podstawie wyciągnięto wnioski dotyczące mechanizmów rozdrabniania w obu młynach.

### 1. WPROWADZENIE

Zapotrzebowanie na monodispersyjne układy ziarniste o wysokim stopniu rozdrobnienia występuje m.in. w przemyśle farmaceutycznym przy wytwarzaniu spieków ceramicznych, wieloskładnikowych nawozów sztucznych, barwników zawieszinowych. Wielkość ziaren ma w tych przypadkach zasadnicze znaczenie dla jakości proszku czy jego zawiesiny, a przykładowo dla leków czy nawozów sztucznych decyduje o ich działaniu. Układy wieloskładnikowe wymagają zwykle wysokiego stopnia zmieszania i braku tendencji do segregacji, której sprzyja rozrzut wielkości cząstek. Ponadto wiadomo, że proszki o cząstkach większych ale o mniejszym rozrzucie wielkości ziaren tworzą trwalsze zawiesiny (trudniej sedymentują) niż proszki o rozdrobnieniu większym, których cząstki mają dużą rozpiętość wymiarów. Te właśnie wymagania odnośnie produktu mielenia trzeba uwzględnić przy wyborze metody i urządzenia rozdrabniającego.

Jednym ze sposobów rozdrabniania, w którym otrzymuje się ziarna o wymiarach kilku mikrometrów, jest mokre mielenie w młynach perełkowych. Zbiornik takiego młyna jest wypełniony kuleczkami o średnicy rzędu 1 mm, między którymi w czasie cyrkulacji wsadu wywołanego mieszadłem odbywa się rozdrabnianie. Z różnym udziałem występuje tutaj kilka mechanizmów rozdrabniania: ścieranie, ścinanie, zgniatanie, uderzanie.

Klasyczną konstrukcją młyna perełkowego stanowi zbiornik cylindrycz-

---

\* Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Łódzkiej, Łódź

ny (pionowy bądź poziomy), wewnątrz którego jest umieszczone mieszadło w formie zamocowanych na wale tarcz (rys. 1a,b). Młyny laboratoryjne o małej pojemności są budowane jako periodyczne, natomiast większe do pracy ciągłej (z przepływem zawiesiny mielonego materiału przez młyn). W tym drugim przypadku pożądane jest, aby rozkład czasów przebywania był możliwie zbliżony do przepływu tłokowego. Prawdopodobieństwo rozdrobnienia każdej cząstki ciała stałego jest wtedy podobne.

Nowymi konstrukcjami są młyny wąskoszczelinowe, w których komorę roboczą stanowią pierścieniowe przestrzenie o szerokości równej kilku średnicom kulek rozdrabniających. Można do nich zaliczyć młyn CoBall-Mill [4] (rys. 1c) oraz młyny z mieszadłem cylindrycznym zamkniętym (rys. 1d) i mieszadłem kielichowym (rys. 1e), skonstruowane w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Łódzkiej [1-3].

## 2. CEL PRACY

Prowadzone od kilkunastu lat w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Łódzkiej prace dały podstawę do skonstruowania nowych młynów, których prototypy następnie poddano próbom i badaniom. Jedną z efektywniejszych konstrukcji okazał się młyn z mieszadłem kielichowym. Celem niniejszej pracy było porównanie uzyskiwanych efektów mielenia w takim właśnie młynie z rezultatami otrzymywania w klasycznym młynie pionowym z mieszadłem wielotarczowym. Ponieważ jednym z typowych zastosowań młynów perełkowych jest przemysł barwnikarski, gdzie do rozdrabniania ziaren barwników są stosowane właśnie takie urządzenia, postanowiono próby porównawcze wykonać dla wodnej zawiesiny barwnika syntetowego z udziałem odpowiednich dyspergatorów.

## 3. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### 3.1. Zakres badań

Badania porównawcze wykonano w skali laboratoryjnej: w młynach o pojemności ok. 1 dm<sup>3</sup>. Zbiornik młyna z mieszadłem kielichowym posiadał średnicę  $D = 0,095$  m i wysokość  $H = 0,24$  m, natomiast wymiary mieszadła wynosiły  $\phi 0,068$  m ( $\phi 0,063$  m x 0,235 m) przy średnicy rdzenia wewnętrznego  $\phi 0,042$  m. Uzyskiwane szerokości szczelin wynosiły więc: 13,5 mm (zewnętrzna) i 9,5 mm (wewnętrzna). Zbiornik młyna z mieszadłem wielotarczowym miał wymiary  $\phi 0,085$  m x 0,24 m. Na wale, równomiernie rozmieszczonych wzdłuż wysokości, osadzonych było 9 tarcz,  $\phi 0,078$  m / 0,064 m.

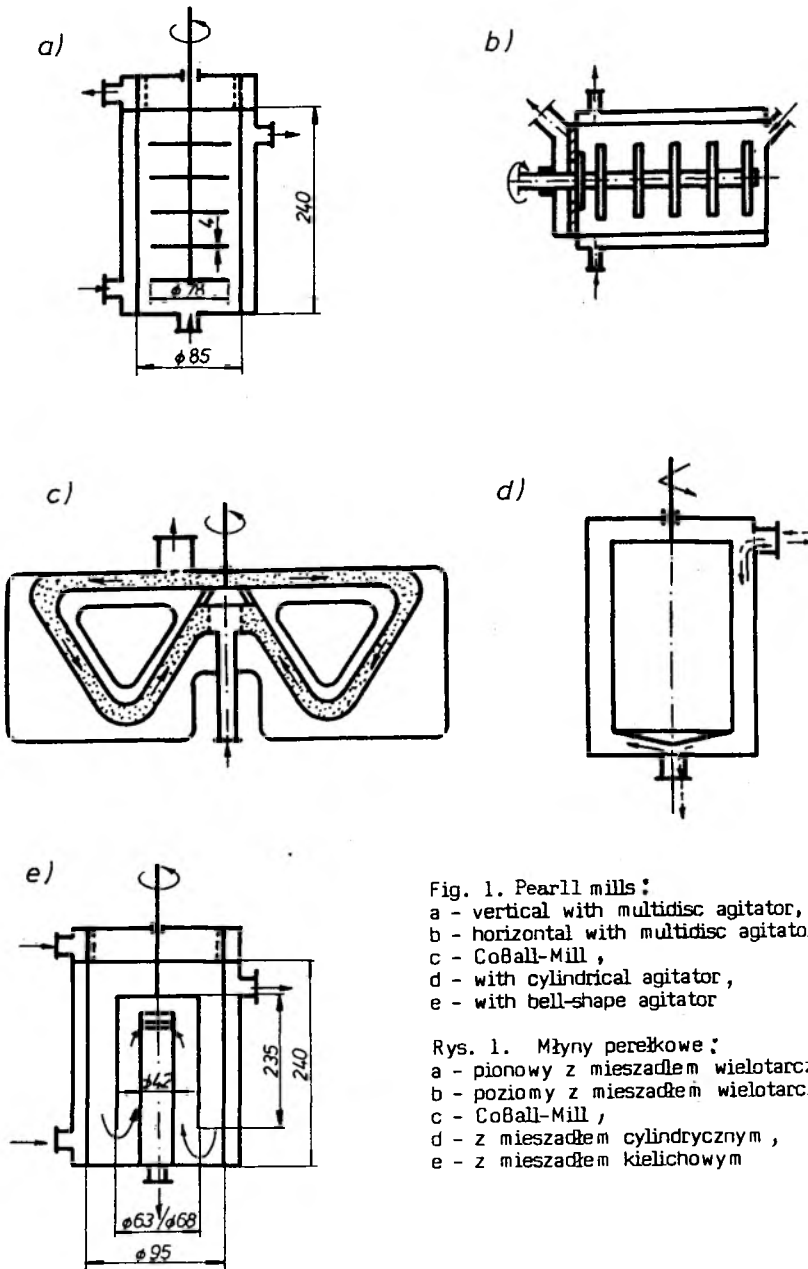


Fig. 1. Pearl mills:  
 a - vertical with multidisc agitator,  
 b - horizontal with multidisc agitator,  
 c - CoBall-Mill,  
 d - with cylindrical agitator,  
 e - with bell-shape agitator

Rys. 1. Młyny perełkowe:  
 a - pionowy z mieszadłem wielotarczowym,  
 b - poziomy z mieszadłem wielotarczowym,  
 c - CoBall-Mill,  
 d - z mieszadłem cylindrycznym,  
 e - z mieszadłem kielichowym

Próby rozdrabniania wykonywano dla ustalonych we wcześniejszych badaniach optymalnych parametrach procesowych, których wartości zebrano w tab. 1.

Tabela 1. Parametry procesowe stosowane dla obu młynów w czasie prób mielenia

Parametr	Młyn pionowy z miesz. wielotarczowym	Młyn z mieszadłem kielichowym
Częstość obrotowa mieszadła [s <sup>-1</sup> ]	44	25
Prędkość obwodowa krańcowych punktów mieszadła [m/s]	10,8	5,34
Stopień wypełnienia młyna kulkami	0,6	0,7
Średnica kulek [mm]	1,0-1,2	1,0-1,2

Skład zawiesiny barwnika do prób mielenia był następujący:

Granat syntenowy P-BL	- 14,3%
Dyspergator NNO	- 21,3%
Dyspergator S-65	- 4,4%
Woda	- 60%

### 3.2. Metodyka badań i opracowanie danych doświadczalnych

Próby mielenia wykonano w układzie periodycznym, pobierając z młyna, w ustalonych odstępach czasu, próbki zawiesiny do oceny stopnia rozdrobnienia. Analizę stanu granulometrycznego ziaren barwnika w zawieszynie dokonywano przy użyciu licznika ziaren, zliczającego cząstki w odpowiednich zakresach wielkości. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie procentowych udziałów masowych ziaren w poszczególnych przedziałach rozmiarowych  $p(x,t)$  oraz sumarycznych, masowych udziałów procentowych ziaren o wymiarach mniejszych od  $x - P(x,t)$ . Dla liczbowego scharakteryzowania zmiany w czasie składu granulometrycznego mielonego materiału obliczano dla każdego analizowanego składu: moment zerowy pierwszego rzędu ( $m_1$ ), momenty centralne ( $M$ ) oraz współczynniki: spłaszczenia ( $K_1$ ) i asymetrii ( $K_2$ ). Stosowano przy tym wzory:

$$m_1 = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (1)$$

$$M_k = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^k p_i \quad (2)$$

Tabela 2. Wyniki mielenia w badanych młynach

Lp.	x	x <sub>gr</sub> [µm]	p[%] dla t[s]					P[%] dla t[s]				
			600	1200	1800	2700	3600	600	1200	1800	2700	3600
<b>Młyn pionowy z mieszadłem wielotarczowym</b>												
1	do 3	1.5	42	45.5	49	52.5	57	42	45.5	49	52.5	57
2	3÷4	3.5	17.5	17.5	17.5	19.5	19.5	59.5	63	66.5	72	76.5
3	4÷5	4.5	14.5	14.5	13	12	11	74	77.5	79.5	84	87.5
4	5÷6	5.5	9.5	9.5	9	7	6	83.5	87	88.5	91	93.5
5	6÷7	6.5	8.5	6.5	6	5	3.5	92	93.5	94.5	96	97
6	7÷8	7.5	4	3	3.5	3	2	96	96.5	98	99	99
7	8÷9	8.5	2.5	2.5	2	1	1	98.5	99	100	100	100
8	9÷10	9.5	1.5	1	0	0	0	100	100	100	100	100
9	10÷13	11.5	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
10	13÷17	15	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
			m <sub>1</sub>	3.63	3.43	3.25	3.03	2.83				
			M <sub>2</sub>	4.76	4.39	3.99	3.46	3.06				
			M <sub>3</sub>	6.91	7.15	6.3	5.98	5.96				
			M <sub>4</sub>	56.5	52.35	40.53	34.23	31.93				
			K <sub>1</sub>	2.49	2.72	2.55	2.86	3.41				
			K <sub>2</sub>	0.67	0.78	0.79	0.93	1.11				
<b>Młyn z mieszadłem kielichowym</b>												
1	do 3	1.5	25	29.5	33	36.5	40	25	29.5	33	36.5	40
2	3÷4	3.5	13.5	14	16.5	18	19	38.5	43.5	49.5	54.5	59
3	4÷5	4.5	10	11	13	13.5	12.5	48.5	54.5	62.5	68	71.5
4	5÷6	5.5	10	10.5	10	8.5	7.5	58.5	65	72.5	76.5	79
5	6÷7	6.5	9	9	8	7.5	7.5	67.5	74	80.5	84	86.5
6	7÷8	7.5	6.5	6	5.5	5	4.5	74	80	86	89	91
7	8÷9	8.5	5.5	5.5	4	4	3.5	79.5	85.5	90	93	94.5
8	9÷10	9.5	7.5	6.5	5	4	3.5	87	92	95	97	98
9	10÷13	11.5	6	5	4	3	2	93	97	99	100	100
10	13÷17	15	7	3	1	0	0	100	100	100	100	100
			m <sub>1</sub>	5.84	5.15	4.57	4.18	3.93				
			M <sub>2</sub>	15.05	11.64	9	7.31	6.65				
			M <sub>3</sub>	47.3	34.89	25.37	16.9	15.94				
			M <sub>4</sub>	664.1	449.4	284.4	159.4	139.6				
			K <sub>1</sub>	2.93	3.32	3.51	2.99	3.15				
			K <sub>2</sub>	0.81	0.88	0.94	0.86	0.93				

$$K_1 = \frac{M_4}{(M_2)^2} \quad (3) \quad K_2 = \frac{M_3}{(M_2)^{3/2}} \quad (4)$$

gdzie  $i$  - liczba przedziałów rozmiarowych,  
 $k$  - rząd momentu centralnego.

Wszystkie wyniki zebrano w tab. 2.

### 3.3. Omówienie wyników i wnioski

Przedstawione w tab. 2 rezultaty pozwalają na szeroką analizę porównawczą wyników rozdrabniania w młynach obu typów. Dla wszystkich czasów mielenia średnie wymiary ziaren (wartości  $m_1$ ) ucieranych w młynie z mieszadłem kielichowym są niższe niż w młynie z mieszadłem wielotarczowym. Również wymiary największych, występujących w zawieszynie w czasie mielenia ziaren, jest mniejszy w przypadku młyna z mieszadłem kielichowym. Przykładowo w młynie tej konstrukcji po czasie mielenia 1800 s nie ma ziaren większych od  $8\mu\text{m}$ , natomiast w młynie z mieszadłem wielotarczowym występują ziarna o wymiarach do  $17\mu\text{m}$ .

Interesująco zmieniają się w czasie mielenia wartości współczynników  $K_1$  i  $K_2$ . Dla młyna z mieszadłem wielotarczowym współczynnik spłaszczenia  $K_1$  waha się w niewielkim zakresie bez tendencji do wzrostu, natomiast w przypadku młyna z mieszadłem kielichowym obserwuje się pewien wzrost jego wartości, co oznacza zawężenie zakresu zmienności wymiarów ziaren. Ponadto w początkowym okresie mielenia wartości  $K_1$  dla młyna z mieszadłem wielotarczowym są wyższe niż dla młyna z mieszadłem kielichowym. Po czasie mielenia 3600 s sytuacja jest odwrotna. Podobnie wygląda porównanie wartości współczynnika  $K_2$ . Są one w pierwszym okresie rozdrabniania niższe dla młyna z mieszadłem kielichowym, ale obserwujemy tutaj bardzo wyraźny wzrost. W przypadku młyna z mieszadłem wielotarczowym początkowe wartości  $K_2$  są wysokie, ale bez tendencji do wzrostu po 1800 s mielenia.

Otrzymane wyniki sugerują, że w młynie z mieszadłem wielotarczowym dominuje mechanizm rozbijania ziaren, a produkt trafia do wszystkich wyższych przedziałów rozmiarowych. W młynie z mieszadłem kielichowym natomiast największy udział w rozdrabnianiu posiada mechanizm ścierania. Produktem jest ziarno spadające do sąsiedniego, wyższego zakresu rozmiarowego i bardzo drobne ziarna przechodzące do klasy najwyższej, o najmniejszych rozmiarach cząsteczek.

## LITERATURA

- [1] Heim A., Sitarek R. Młyn perełkowy z mieszadłem cylindrycznym. Inż. i Aparat. Chem. 5/84, 24-26.
- [2] Młyn perełkowy, patent PRL nr 126 021 z dn. 15.04.1985.
- [3] Młyn perełkowy, patent RP nr 152 505 z dn. 12.06.1991.
- [4] Prospekt firmy FRYMA-Maschinen AG nr MS 1001

Heim A., 1992. Monodispersity of Substances Ground in Pearl Mills. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 49-55 (polish text).

Wet grinding of a synten dry in two types of laboratory pearl mills (one with a vertical multidisc agitator and the other with a bell-shape agitator) was discussed. Changes in particle size distribution during grinding were described using the moments of random variables: ordinary moment and central moments of the order of 2-4, as well as their functions: concentration coefficient and distribution asymmetry coefficient. It was found that in the mill with a multidisc agitator particles were shattered, while in the mill equipped with a bell-shape agitator, abrasion was the prevailing mechanism of particle grinding.

*Jan SIDOR\**

## **WSTĘPNE BADANIA PROTOTYPOWEGO PRZEMYSŁOWEGO MŁYNA OBROTOWO-WIBRACYJNEGO DO BARDZO DROBNEGO MIELENIA TLENKU GLINU**

W pracy przedstawiono opis budowy prototypowego przemysłowego młyna obrotowo-wibracyjnego do bardzo drobnego mielenia tlenku glinu (poniżej  $8 \mu\text{m}$ ). Główna część pracy zawiera metodę, program i wyniki wstępnych badań procesu bardzo drobnego mielenia tlenku glinu w tym młynie. Otrzymane wyniki badań charakteryzują się wysoką zgodnością z parametrami wyznaczonymi na podstawie rezultatów badań przeprowadzonych w młynie modelowym.

### **1. WPROWADZENIE**

Tlenek glinu jest materiałem znajdującym szerokie zastosowanie w najnowszych technologiach przemysłu ceramicznego, maszynowego, elektronicznego, badaniach kosmicznych, medycynie. Jest materiałem, z którego wytwarzane są odporne na ścieranie części maszyn, narzędzia skrawające, elementy ceramiki elektronicznej, elektrotechnicznej, wysokiej jakości materiały ogniotrwałe, kształtki do implantacji, elementy aparatury naukowej, przemysłowej i wiele innych wyrobów.

Jego zastosowanie uwarunkowane jest głównie dwoma czynnikami: odpowiednim - zwykle bardzo drobnym uziarnieniem - poniżej  $20 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ , a nawet  $1 \mu\text{m}$  oraz wysoką czystością, co przy jego wysokiej twardości (9 w skali Mohsa) sprawia duże problemy techniczne i technologiczne

Proces jego rozdrabniania może być przeprowadzany w młynach grawitacyjnych, wibracyjnych, mieszadłowych, tarczowych i strumieniowych [6].

Zastosowanie któregośkolwiek z wymienionych młynów uwarunkowane jest wymaganiami technologicznymi stawianymi rozdrabnianemu materiałowi, z których najważniejsze to: odpowiednie uziarnienie, wysoka czystość, wymagana wydajność młyna, a także koszty inwestycyjne i eksploatacyjne młyna i całego układu mielącego. Mając na względzie pozytywne rezultaty

---

\* AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA im. St. Staszica, Kraków

Institut Maszyn Hutniczych i Automatyki



procesu koloidalnego mielenia węgla krzemu w stosunkowo dużym młynie obrotowo-wibracyjnym (zmielony SiC miał zaledwie 1,5 % klasy +1  $\mu\text{m}$  oraz aż 95 % klasy -0,2  $\mu\text{m}$ ) [10] oraz bardzo niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne tego młyna w stosunku do innych znanych młynów podjęto próbę zastosowania młyna obrotowo-wibracyjnego do bardzo drobnego mielenia tlenku glinu w skali przemysłowej.

Przyszły użytkownik młyna postawił następujące wymagania technologiczne:

- uziarnienie zmielonego tlenku glinu - wymiar ziarna  $d_{90} < 8 \mu\text{m}$
- wydajność od 40 do 60 kg/zmianę
- całkowite wyeliminowanie zanieczyszczeń metalicznych
- możliwie najniższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne młyna.

Do opracowania młyna przyjęto metodę projektowania, zastosowaną praktycznie w projektowaniu półtechnicznych i przemysłowych młynów obrotowo-wibracyjnych do mielenia szkliv [5], dolomitu [7] oraz węgla krzemu [11].

Pierwszą fazę tej metody stanowiły badania procesu mielenia przeprowadzone w modelowym młynie obrotowo-wibracyjnym [8], kolejne fazy obejmowały: wyznaczenie parametrów technologicznych i konstrukcyjnych młyna przemysłowego [8], projekt techniczny młyna [9] i jego wykonanie, rozruch mechaniczny oraz badania wstępne i eksploatacyjne [12].

Niniejsza praca stanowi fragment ostatniej, finalnej fazy prac metody projektowania młynów obrotowo-wibracyjnych i dotyczy wstępnych badań prototypowego, przemysłowego młyna obrotowo-wibracyjnego typu MOW-H-200, opracowanego specjalnie do bardzo drobnego mielenia tlenku glinu. Oryginalne rozwiązanie techniczne młyna jest prawnie chronione [2].

Pozytywne wyniki wstępnych badań prototypowego młyna, oprócz eksperymentalnej weryfikacji metody projektowania przemysłowych młynów obrotowo-wibracyjnych, umożliwiły przekazanie młyna do eksploatacji w ZWLE Polam w Warszawie.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA I OPIS BUDOWY MŁYNA

Młyn obrotowo-wibracyjny należy do grupy młynów z mielnikami swobodnymi i ruchomą komorą z przekazywaniem energii przez komorę [6]. Proces mielenia polega na wprawieniu komory młyna (wypełnionej mielonym materiałem i swobodnymi mielnikami) w ruch złożony, składający się z ruchu obrotowego oraz ruchu drgającego o kierunku amplitudy drgań prostopadłym do osi obrotu komory. Ruch drgający może mieć trajektorię amplitudy drgań odcinkową [3, 5], quasi-odcinkową [5, 7, 9] względnie kołową [11]. Proces mielenia w tym młynie może zachodzić w sposób ciągły lub w sposób okresowy, w środowisku gazowym - przeważnie powietrzu - lub

w środowisku cieczy.

Schemat konstrukcji prototypowego młyna typu MOW-H-200 zamieszczono na rys.1, natomiast widok młyna (bez osłony) na rys. 2.

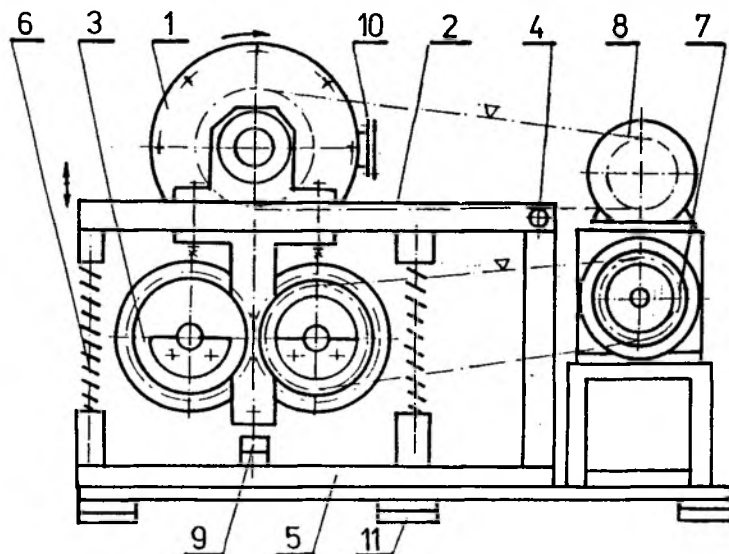


Fig.1. Diagram of construction of the prototype rotary vibration mill of MOW-H-200 type: 1 - unit chamber, 2 - rocker, 3 - vibrator, 4 - articulated joint, 5 - frame, 6 - elastic element, 7 - power unit of the vibrator, 8 - power unit of the chamber, 9 - stop, 10 - closure of chamber, 11 - vibrator insulator [9]

Rys.1. Schemat konstrukcji prototypowego młyna obrotowo-wibracyjnego typu MOW-H-200: 1 - zespół komory, 2 - wahacz, 3 - wibrator, 4 - przegub, 5 - rama, 6 - układ sprężysty, 7 - napęd wibratora, 8 - napęd komory, 9 - zderzak, 10 - zamknięcie komory, 11 - wibroizolator [9]

Głównym zespołem roboczym młyna jest zespół komory 1, którego oprawy łożysk przymocowane są do wahacza 2, do którego przymocowany jest także wibrator mechaniczny - bezwładnościowy 3. Wahacz 2 połączony jest z ramą młyna 5 przegubami 4 oraz układem sprężystym 6. Napęd wibratora stanowi silnik 7 z typową przekładnią pasową, natomiast napęd komory motoreduktor 8 i także przekładnia pasowa. Do ograniczenia nadmiernej amplitudy drgań przewidziano zderzaki 9. Do operacji załadunku i rozładunku komory przewidziano zamknięcie załadowczo-rozładowcze komory 10. Cały młyn umieszczony jest w dźwiękochłonnej osłonie i przymocowany jest do podstawy, która spoczywa na wibroizolatorach 11.

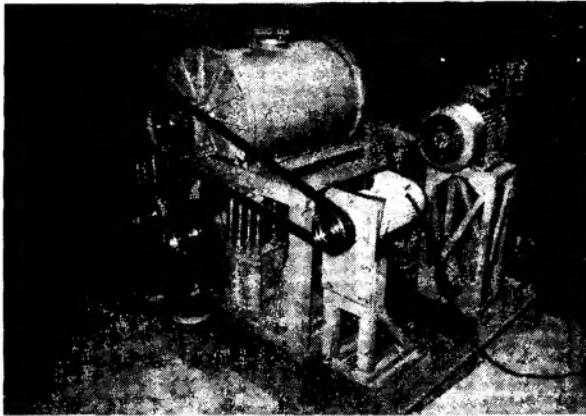


Fig.2. Prototype of the MOW-H-200 rotary-vibration mill - without noise screen [12]

Rys.2. Prototypowy młyn obrotowo-wibracyjny MOW-H-200 - bez osłony dźwiękochłonnej [12]

#### Podstawowe parametry młyna [9]:

1. Wydajność młyna 40-60 kg/zmianę - przy mieleniu tlenku glinu do wymiaru ziarna  $d_{90} < 8 \mu\text{m}$ .
2. Pojemność komory 200 dm<sup>3</sup>.
3. Częstotliwość drgań 14 Hz.
4. Prędkość obrotowa komory 65-105 obr/min.
5. Moc silnika napędu wibratora 10 kW.
6. Moc silnika napędu komory 2,2 kW.
7. Wymiary młyna: długość 1700 mm, szerokość 1460 mm, wysokość 1320 mm.
8. Masa samego młyna z pustą komorą 1300 kg.
9. Masa kompletnego młyna z podstawą, osłoną i ładunkiem 2 500 kg.

### 3. CEL I METODA BADAŃ

Zasadniczym celem poznawczym badań było sprawdzenie poprawności przyjętej metody projektowania młyna przemysłowego, a w szczególności błędów wyznaczenia jego parametrów na podstawie badań przeprowadzonych w młynie modelowym - o sto razy mniejszej pojemności i kilkakrotnie mniejszej średnicy komory oraz poprawności obliczeń konstrukcyjnych młyna (zapotrzebowania mocy przez oba napędy, amplitudy drgań, wibroizolacji). Cel użytkowy dotyczył sprawdzenia poprawności działania młyna, uzyskania projektowej wydajności i przygotowania go do eksploatacji.

Metoda badań obejmowała następujące elementy [12]:

- przygotowanie młyna do badań (zdjęcie osłony, przyłączenie watomierzy, do zacisków silników, przygotowanie przyrządu do pomiaru amplitudy drgań, ustalenie ilości, rodzaju obciążników i umocowanie w odpowiednich uchwytach wibratora,
- przygotowanie ładunku - odważenie tlenku, mielników, wody i dodatków, wykonanie analizy granulometrycznej tlenku przed mieleniem - metodą dyfraktometryczną - granulometrem laserowym firmy Malvern typ 3600 E,
- załadowanie komory młyna, uruchomienie go, rejestracja wskazań watomierzy, pomiary amplitudy drgań, pobieranie - co godzinę próbki mielonego tlenku do zbadania uziarnienia wyżej wymienioną metodą,
- zatrzymanie procesu mielenia w następnej godzinie po uzyskaniu uziarnienia  $d_{90} \leq 8 \mu\text{m}$ .

#### 4. PROGRAM, REALIZACJA I WYNIKI BADAŃ

Program badań zakładał prowadzenie badań do uzyskania projektowej wydajności młyna przy możliwie najmniejszym obciążeniu wibratora. Założono następujące stany obciążenia wibratora: 0,14; 0,20; 0,25; 0,31; 0,40 projektowego maksymalnego obciążenia oraz cztery warianty ładunku komory (mielników, tlenku glinu i dodatków): 0,25; 0,50; 0,75, 1,00 ładunku znamionowego, a także dwa warianty zestawu mielników [12].

Do uzyskania projektowej wydajności młyna, a właściwie około 30 % większej, przeprowadzono osiem serii doświadczeń, w tym dwie próbne.

Uziarnienie tlenku glinu przed mieleniem: wymiar ziarna maksymalnego  $d_{\text{max}}$  129  $\mu\text{m}$ , ziarna  $d_{90}$  59  $\mu\text{m}$ , powierzchnia właściwa 0,28  $\text{m}^2/\text{cm}^3$ .

W pracy przytoczono w formie graficznej wyniki badań kinetyki mielenia dwóch najbardziej istotnych serii badań III i VII - rys.3 i rys.4.

Parametry młyna i niektóre wyniki badań III serii:

- obciążenie wibratora 0,25 obciążenia maksymalnego, zestaw mielników I,
- ładunek komory 0,50 ładunku znamionowego; wydajność 21 kg/zmianę,
- pobór mocy: napęd komory 2,01 kW, napęd wibratora 6,58 kW,
- amplituda drgań: zmierzona 2,20 mm, obliczona 2,33 mm.

Parametry młyna i niektóre wyniki badań VII serii:

- obciążenie wibratora 0,40 obciążenia maksymalnego, zestaw mielników I,
- ładunek komory znamionowy; wydajność młyna 75 kg/zmianę,
- pobór mocy: napęd komory 2,15 kW, napęd wibratora 6,78 kW,
- amplituda drgań: zmierzona 3,62 mm, obliczona 3,84 mm.

Najkorzystne wyniki uzyskano w serii VIII, w której przy zestawie II mielników przy identycznych pozostałych parametrach. Wówczas wydajność młyna wzrosła do 80 kg/godz, a w czasie czterech godzin produkt mieleń miał:  $d_{90}$  8,1  $\mu\text{m}$ ,  $S_v$  3,57  $\text{m}^2/\text{cm}^3$ , natomiast po pięciu godzinach mielenia:  $d_{90}$  6,5  $\mu\text{m}$ ,  $S_v$  3,84  $\text{m}^2/\text{cm}^3$ . Wymiar ziarna  $d_{\text{max}}$  wynosił po czterech i pięciu godzinach mielenia 15  $\mu\text{m}$ .

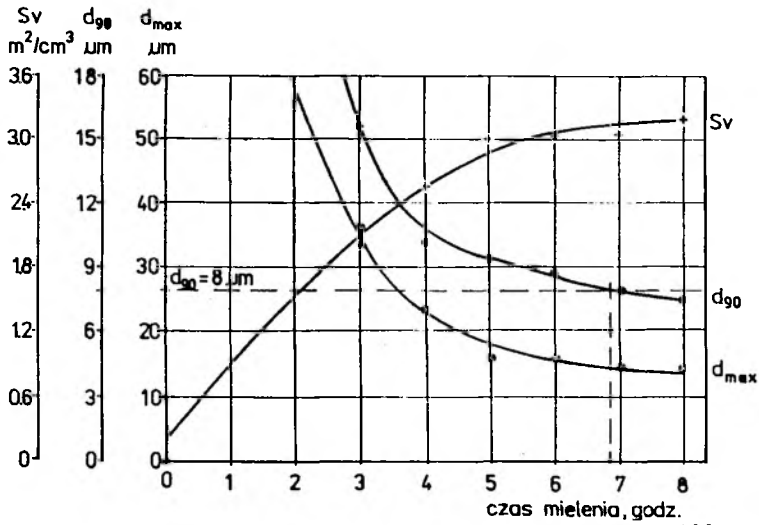


Fig. 3. Influence of the milling time and parameters of mill on selected indicators of grain size distribution of aluminium oxide being grinded in series III:  $d_{max}$  - maximal size of grain,  $d_{90}$  - limiting size of grain; the smaller grains consist 90%,  $S_v$  - specific surface

Rys. 3. Wpływ czasu mielenia i parametrów młyn na przyjęte wskaźniki uziarnienia mielonego tlenku glinu w serii III:  $d_{max}$  - wymiar ziarna maksymalnego,  $d_{90}$  - wymiar ziarna, poniżej którego występuje 90% ziarn,  $S_v$  - powierzchnia właściwa

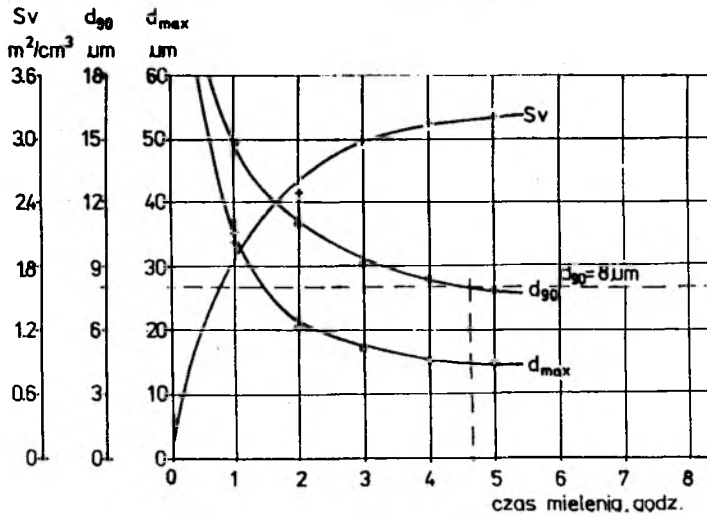


Fig. 4. Influence of the milling time and parameters of mill on selected indicators of grain-size distribution of aluminium oxide being grinded in series VII

Rys. 4. Wpływ czasu mielenia i parametrów młyn na przyjęte wskaźniki uziarnienia mielonego tlenku glinu w serii VII

W tab. 1 zamieszczono wskaźniki uziarnienia tlenku glinu uzyskane: w młynie modelowym, wyznaczone na ich podstawie wskaźniki teoretyczne młyna przemysłowego oraz wskaźniki uzyskane doświadczalnie w młynie przemysłowym.

Tabela 1

Czas mielenia	Wskaźniki uziarnienia	Młyn modelowy	Młyn przemysłowy	
			teoretyczne	empiryczne
2 godz	$d_{max}$ , $\mu m$	17,4	21,3	20,1
4 godz		15,0	16,2	15,0
2 godz	$d_{90}$ , $\mu m$	9,6	11,4	10,9
4 godz		6,8	8,9	8,4
2 godz	$S_v$ , $m^2/cm^3$	3,1	2,2	2,5
4 godz		3,8	3,0	3,2

Teoretyczne wyznaczenie wskaźników uziarnienia młyna przemysłowego uwzględniało: wpływ średnicy komory młyna oraz wpływ amplitudy drgań, a w szczególności przyspieszenia ruchu drgającego. Charakter tych wpływów jest przeciwny, bowiem wzrost średnicy komory młyna obrotowo-wibracyjnego powoduje wzrost szybkości procesu mielenia [4, 8], natomiast spadek amplitudy drgań zmniejsza jego szybkość [3,8].

#### 5. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Podczas badań zrealizowano w pełni założony program eksperymentu i uzyskano następujące wyniki:

- wydajność młyna 80 kg/zmianę, czyli o 30 % większą od projektowej wydajności maksymalnej przy wymaganym uziarnieniu  $d_{90}$  8  $\mu m$ ,
- dobrą zgodność wskaźników uziarnienia uzyskanych eksperymentalnie z wskaźnikami wyznaczonymi teoretycznie,
- dobrą zgodność mierzonych parametrów mechanicznych młyna (amplitudy drgań, poboru mocy) z parametrami wyznaczonymi teoretycznie,
- bardzo korzystne obniżenie o około 30 % zawartości wody w ładunku.

Podczas badań uzyskano skrócenie czasu mielenia tlenku glinu z 70 godzin - w eksploatowanym w ZWLE Polam młynie grawitacyjnym o tej samej pojemności komory, do 4 godzin w młynie obrotowo-wibracyjnym przy obniżeniu o ponad dwukrotnie jednostkowego zużycia energii.

## LITERATURA

- 1.Kurer K. E., Gock E., Michaelis S., The rotary chamber vibration mill, a further developement of the customery tube vibration mill. XVI International Processing Congress, edited by E.Forsberg Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 1988, str. 121 - 130.
- 2.Opis patentowy, Nr 152047. Opubl. 1991.05.31. MKP Int.Cl.<sup>2</sup> B02C 19/16 Młyn wibracyjny. Akademia Górniczo-Hutnicza. Kraków. PL. Twórcy: Zygmunt Drzymała, Jan Sidor.
- 3.Sidor J., Optymalizacja pracy młyna obrotowo-wibracyjnego. Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Maszyn 1978. Kraków.
- 4.Sidor J., Wpływ średnicy komory na wydajność młynów z mielnikami swodnymi. II Konferencja "Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych" Mogilany k.Krakowa. Wyd.Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 1984, s. 135 - 144.
- 5.Sidor J., Nowe konstrukcje młynów wibracyjnych o obniżonej częstotliwości drgań. Materiały Ogniotrwałe 1986, nr 6, s. 152 - 155.
- 6.Sidor J., Stan, potrzeby i perspektywy rozwoju otrzymywania materiałów bardzo drobno uziarnionych. Kraków 1988 (Zeszyty Naukowe AGH nr 1239, Górnictwo nr 140, s.107 - 124).
- 7.Sidor J., Przybliżona metoda opracowywania konstrukcji przemysłowych młynów obrotowo-wibracyjnych. Kraków 1988 (Zeszyty Naukowe AGH nr 1159, Mechanika nr 13, s.49 - 61).
- 8.Sidor J., Jodłowski W., Michłowicz E. i inni: Badania, opracowanie technologii mielenia tlenku glinu i założeń do konstrukcji przemysłowego młyna obrotowo-wibracyjnego Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1988 Prace Instytutu Maszyn Hutniczych i Automatyki, s. 58, (niepubl.).
- 9.Sidor J., Drzymała Z., Golik L. i inni, Projekt prototypowego młyna obrotowo-wibracyjnego do mielenia tlenku glinu. Spółdzielnia Pracy "Nowa Technika", Kraków 1988, s.62 (niepubl.).
- 10.Sidor J., Ermer-Kowalczewska E., Wstępne badania koloidalnego mielenia węgla krzemu w nowym laboratoryjnym młynie obrotowo-wibracyjnym. Inżynieria Materiałowa 1989, nr 4, s. 106 - 110.
- 11.Sidor J., Próba opracowania konstrukcji przemysłowego młyna obrotowo-wibracyjnego do koloidalnego mielenia SiC<sub>2</sub> na podstawie eksperymentu przeprowadzonego w młynie modelowym. Kraków 1990 (Zeszyty Naukowe AGH nr 1355, Mechanika tom 9, Zeszyt 3, s.197 - 206).
- 12.Sidor J., Kończyk M., i inni, Badania eksploatacyjne prototypu młyna obrotowo-wibracyjnego. Spółdzielnia Pracy "Nowa Technika", Kraków 1990, s. 26 (niepubl.).

Sidor J., 1992. Preliminary Tests of a Prototype of the Industrial Rotary-Vibration Mill for Fine Milling of Aluminium Oxide. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 57-64 (polish text)

Paper describes the prototype of industrial rotary-vibration mill for fine milling of aluminium oxide ( under 8  $\mu\text{m}$ ). The principal part of the paper includes method, programme and preliminary results of fine milling of aluminium oxide. The results of tests are characterized by high compatibility with parameters determined in the laboratory mill.

Tadeusz PAWLUK\*  
Włodzimierz PAPROTNY\*  
Grzegorz CZACHOR\*

## OCENA UZIARNIENIA PYŁÓW NA PODSTAWIE ICH OBRAZÓW DYFRAKCYJNYCH - KOMUNIKAT

Ustalenie składu ziarnowego stanowi jedno z trudniejszych zagadnień miernictwa pyłów. Miara trudności, jakie występują przy określaniu składu ziarnowego jest fakt, iż w chwili obecnej istnieje kilkadziesiąt metod i przyrządów do jego pomiaru. Wraz z rozwojem produkcji źródeł światła koherentnego oraz techniki mikrokomputerowej zaistniały możliwości zastosowania wyników oddziaływania światła laserowego z cząstkami pyłów do badań rozkładu ich wielkości. W pracy podano zarys metody pomiarowej oraz opis przyrządu do pomiaru składu ziarnowego, wykorzystującego zjawisko dyfrakcji Fraunhofera światła laserowego na cząstkach pyłu.

### 1. Metoda pomiaru

Jest rzeczą oczywistą, że efekty dyfrakcyjne, zachodzące na badanych cząstkach, decydują o ściśle określonym rozkładzie energii światła ugiętego, z którego wnioskujemy o rozmiarach obiektów ugięciowych (cząstek pyłu). Jeśli obraz dyfrakcyjny powstaje w równoległej wiązce światła i obserwujemy go w płaszczyźnie widma Fouriera obiektu o ogniskowej  $f_{ob}$  (w płaszczyźnie ogniskowej), to rozkład natężenia światła,  $I(r)$  dla  $N$  cząstek kulistych o średnicy  $D$ , zgodnie z teorią dyfrakcji Fraunhofera, może być w pierwszym przybliżeniu opisany funkcją:

$$I(r) = N I_0 \left[ \frac{2 J_1(R)}{R} \right]^2, \quad (1)$$

gdzie  $J_1$  jest funkcja Bessela pierwszego rzędu, argumentu  $R = \pi D r / \lambda f_{ob}$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali światła laserowego,  $r$  - odległość od środka obrazu dyfrakcyjnego, a  $I_0$  - natężeniem światła padającego. Funkcja ta przyjmuje maksimum dla  $r=0$  oraz posiada szereg miejsc zerowych, z których pierwsze jest dla  $r = 3,83 \lambda f_{ob} / \pi D$ .

\*Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu



W przypadku pyłów polidispersyjnych, każda grupa cząstek o określonej średnicy wytwarza swój własny obraz dyfrakcyjny. Obrazy pochodzące od poszczególnych grup nakładają się na siebie, wskutek czego wypadkowy obraz nie składa się z wyraźnych minimumów i maksimumów, jak to ma miejsce w przypadku pyłów monodispersyjnych, lecz ma postać rozmytej plamy, w której natężenie światła opisuje całka po wszystkich grupach cząstek z funkcji (1). Należy dodać, że obraz ten zależy również od własności optycznych ośrodka, w którym zachodzi dyfrakcja, oraz od własności optycznych samego pyłu.

## 2. Opis przyrządu

Rys.1. przedstawia schemat przyrządu do wyznaczania składu ziarnowego pyłów, realizującego opisaną wyżej metodę pomiarową. Zastosowano

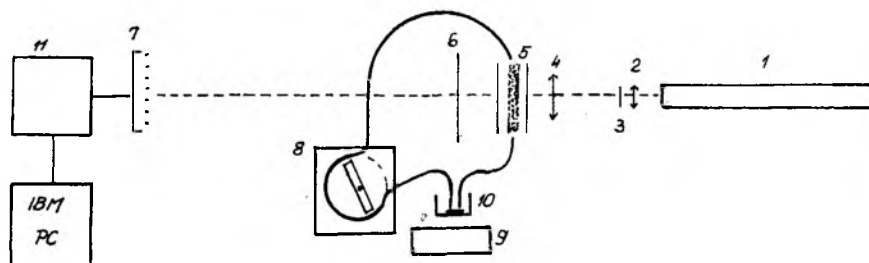


Fig.1. Scheme of the device for particle size distribution measurements

Rys.1. Schemat przyrządu do pomiaru składu ziarnowego

następujące oznaczenia: 1- laser He-Ne z zasilaczem, 2- obiektyw mikroskopowy, 3- filtr przestrzenny, 4- obiektyw lunety, 5- kuweta z zawiesiną pyłową, 6- obiektyw zbiorczy, 7- zespół detektorów światła, 8- pompka perystaltyczna, 9- mieszadło magnetyczne, 10- zlewka z zawiesiną, 11- interfejs szeregowy. Przyrząd ten został opracowany w Instytucie Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu i jest produkowany pod nazwą Laserowy Analizator Uziarnienia. Pomiar polega na przepuszczeniu próbki badanego pyłu prostopadle do wiązki światła laserowego i pomiarze rozkładu natężenia światła w widmie dyfrakcyjnym. Skład ziarnowy wyliczany jest w sposób automatyczny przez komputer, a wynik obliczeń wyprowadzany na ekran monitora i na drukarkę. Na rys.2. przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru rozkładu natężenia światła, uzyskane dla dwóch próbek o różnym składzie ziarnowym, a na rys.3. składy ziarnowe dla tych próbek.

## 3. Cechowanie przyrządu

Wyznaczanie składu ziarnowego przy pomocy opisanego przyrządu odbywa się na zasadzie porównania widma dyfrakcyjnego nieznannej próbki z widmami

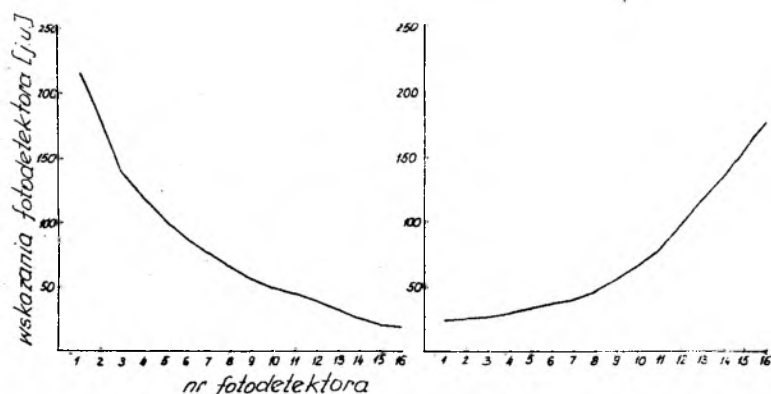


Fig.2. Photodetector graphs for two different samples of dust  
Rys.2. Wykresy wskazań fotodetektorów dla dwóch różnych próbek pyłu

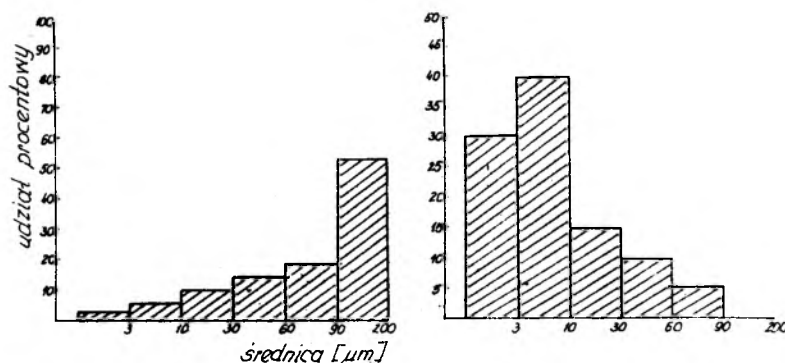


Fig.3. Particle size distributions for samples from Fig.2.  
Rys.3. Składy ziarnowe próbek z rys.2

próbek wzorcowych. Ma to na celu między innymi uniknięcie konieczności posiadania informacji o własnościach optycznych cieczy dyspergującej i badanego materiału. Procedura cechowania polega na pomiarze widm dyfrakcyjnych, wytwarzanych przez szereg próbek o znanym składzie ziarnowym (wzorców), tworzących zawiesinę w cieczy dyspergującej. Zastosowano równanie regresji postaci:

$$K_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j I_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j}^n a_{jk} I_j I_k, \quad (2)$$

gdzie  $K_i$  jest udziałem procentowym  $i$ -tej frakcji,  $a_0, a_j, a_{jk}$  - współczynnikami regresji, a  $I_j, I_k$  - mierzonymi natężeniami światła.

Po wycechowaniu przyrządu, nieznane próbki powinny być mierzone w tej samej cieczy. Wpływ cieczy dyspergującej na natężenie światła w obrazie dyfrakcyjnym obrazuje rys.4., na którym przedstawiono wyniki pomiaru natężenia światła dla tego samego materiału w dwóch różnych cieczach dyspergujących: alkoholu izopropylowym i wodzie.

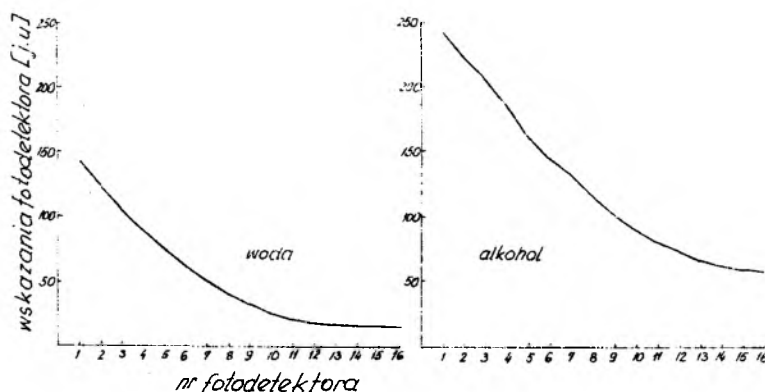


Fig. 4. Photodetector graphs for one sample dispersed in two different liquids

Rys.4. Wykresy wskazań fotodetektorów dla tej samej próbki w dwóch różnych cieczach dyspergujących

#### 4. Zastosowanie przyrządu

Wykorzystanie dyfrakcji Fraunhofera do konstrukcji laserowego analizatora uziarnienia pozwoliło opracować przyrząd o korzystnych cechach metrologicznych. Podstawową zaletą jest krótki czas pomiaru (ok. 2min) przy zakresie pomiarowym do  $200\mu\text{m}$ , z podziałem na 6 frakcji, z możliwością tworzenia podzakresów (np.: do  $40\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $90\mu\text{m}$ ). Przy tak krótkim czasie pomiaru możliwy staje się pomiar kilkudziesięciu próbek dziennie. Autorzy pracy badali uziarnienie szeregu materiałów występujących w przemyśle materiałów mineralnych, budowlanych, górnictwie, energetyce i chemii.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego Nr 7 7153 91 02, finansowanego w roku 1992 przez Komitet Badań Naukowych.

Pawluk T., Paprotny Wł., Czachor G., 1992. Estimation of the Particle Size Distribution of Dust Using its Diffraction Patterns. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 65-68 (polish text)

Physical principle of the particle size distribution measurements using laser light diffraction effect is presented. Short description of the block diagram of the device basing on the aforesaid effect, its main technical parameters, measuring technique, calibration and possibility of industrial applications are given.

Tadeusz PAWLUK\*  
Grzegorz CZACHOR\*  
Włodzimierz PAPROTNY\*

## DOBÓR STRUKTURY MODELU CECHOWANIA W DYFRAKCYJNEJ METODZIE POMIARU SKŁADU ZIARNOWEGO

Jednym z ważniejszych problemów występujących w dyfrakcyjnej metodzie pomiaru składu ziarnowego jest dobór struktury modelu umożliwiającego obliczanie składu ziarnowego na podstawie natężenia światła w widmie dyfrakcyjnym. W modelu może wystąpić wiele zmiennych niezależnych. W pracy przedstawiono kryteria i algorytmy umożliwiające dobór optymalnej struktury modelu przy ograniczonych nakładach obliczeniowych. Podano przykłady doboru struktury modelu w oparciu o rzeczywiste dane z przyrządu pomiarowego.

### 1. Wprowadzenie

W dyfrakcyjnej metodzie pomiaru składu ziarnowego występuje problem cechowania przyrządu pomiarowego, sprowadzający się do wyboru struktury modelu i estymacji jego parametrów. Poszukuje się modeli w klasie:

$$K_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j I_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j}^n a_{jk} I_j I_k \quad (1)$$

gdzie:  $K_i$  - udział procentowy  $i$ -tej frakcji,  $a_0, a_j, a_{jk}$  - parametry modelu, a  $I_j, I_k$  - zmierzone natężenia światła.

Zagadnienie doboru struktury eksperymentalnego modelu rozwiązuje się zwykle w następujących etapach:

- a) wybór struktury modelu,
- b) estymacja parametrów modelu,
- c) ocena jakości modelu, jeśli jest negatywna, to powrót do etapu a).

Nieodpowiedni dobór struktury modelu, np. model z małą ilością parametrów może ukryć pewne istotne własności zjawiska, natomiast model ze zbyt dużą ilością parametrów daje dobrą dokładność dla konkretnej realizacji danych pomiarowych, ale gorszą dla innych realizacji. Ponadto model o dużej liczbie parametrów jest nieodporny numerycznie.

---

\* Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych w Opolu

W przypadku cechowania analizatora uziarnienia występuje problem wyboru struktury modelu dla wielu zmiennych niezależnych (kilkadziesiąt sygnałów z detektorów natężenia światła). Przy tej ilości zmiennych konieczne jest zastosowanie algorytmów umożliwiającących automatyczny wybór struktury modelu.

## 2. Kryteria doboru struktury modelu

Do badania algorytmów doboru struktury modelu wybrano następujące kryteria: test F, test końcowego błędu prognozy wg Akaike (ang. Final Prediction Error, FPE) oraz kryterium informacyjne Akaike (ang. Akaike Information Criterion, AIC) [1, 2].

Test F ocenia, czy nastąpiło znaczne zmniejszenie wariancji błędów modelu  $\sigma_n^2$  z powodu zwiększenia ilości estymowanych parametrów (wielkość  $\sigma_n^2$  jest obliczana tutaj bez uwzględnienia liczby stopni swobody). Bada się statystykę

$$F = N \frac{\sigma_{n1}^2 - \sigma_{n2}^2}{\sigma_{n2}^2} \quad (2)$$

gdzie N - długość realizacji,  $\sigma_{n1}^2$  i  $\sigma_{n2}^2$  wariancje dla modeli o odpowiednio  $n_1$  i  $n_2$  parametrach ( $n_1 < n_2$ ). Statystyka F ma rozkład [1]  $\chi_{\alpha}^2(n_2 - n_1)$  na poziomie ufności  $1 - \alpha$  (np.  $\alpha = 0,95$ ) wybiera się model o mniejszej liczbie parametrów, jeśli  $F < \chi_{\alpha}^2(n_2 - n_1) = F_{\alpha}$  ( $F_{\alpha}$  jest parametrem projektowym w dyspozycji badacza).

Test FPE wykorzystuje zależność:

$$FPE = \sigma_n^2 \frac{N+n}{N-n} \quad (3)$$

gdzie n - ilość parametrów modelu. Test ten nakłada karę na modele o dużej liczbie parametrów, zwłaszcza dla krótkiej realizacji danych pomiarowych. Optymalna jest taka wartość n, dla której kryterium osiąga minimum.

Kryterium informacyjne Akaike jest następujące:

$$AIC = N \log \sigma_n^2 + 2p \quad (4)$$

gdzie p jest liczbą parametrów modelu. Pierwszy składnik w (4) określa dopasowanie do danych pomiarowych, natomiast drugi stanowi karę za zbyt dużą ilość parametrów. Należy zauważyć, że oba kryteria FPE i AIC nie wymagają niezależnego zestawu danych do weryfikacji modelu.

## 3. Dobór struktury modelu

Zastosowanie omówionych wyżej kryteriów doboru struktury modelu przedstawimy na przykładzie danych pomiarowych z przyrządu wyposażonego w 16 detektorów natężenia światła. Do badania wybrano zestaw danych pomiarowych dla 17 próbek o znanym składzie ziarnowym (określonym jedną z klasycznych metod pomiarowych). Jako potencjalne zmienne niezależne

wybrało detektory  $I_1, I_2, \dots, I_{13}$ , a jako zmienna zależna  $K_2$  (zawartość frakcji od 5 do 10  $\mu\text{m}$ ).

Struktura modelu jest poszukiwana metodą regresji krokowej. W metodzie tej ustala się korelację poszczególnych zmiennych niezależnych względem zmiennej zależnej i szereguje zmienne wg malejącej korelacji. W kolejnym kroku jest wprowadzana do modelu ta zmienna, która ma największy współczynnik korelacji. Dla aktualnej struktury testowana jest istotność każdej zmiennej niezależnej w modelu (1); jeśli po wprowadzeniu do modelu nowej zmiennej inna zmienna straci istotność, to jest usuwana z modelu i ilość parametrów w danym kroku zmniejsza się.

Kolejne kroki algorytmu regresji krokowej były następujące (rys. 1):

nr kroku	zmienne w modelu	ilość param.	$\sigma_n^2$	FPE	AIC
1	9.	2	11,28	14,29	21,89
2	1,9	3	9,78	13,97	22,83
3	1,6,9	4	5,68	9,19	20,83
4	1,6,9,13	5	3,38	6,21	19,00
5	6,9,13	4	3,41	5,50	17,05
6	6,9,12,13	5	0,21	0,40	-1,24
7	9,12,13	4	0,22	0,36	-2,96
8	9,10,12,13	5	0,12	0,22	-5,52
9	3,9,10,12,13	6	0,08	0,16	-6,62

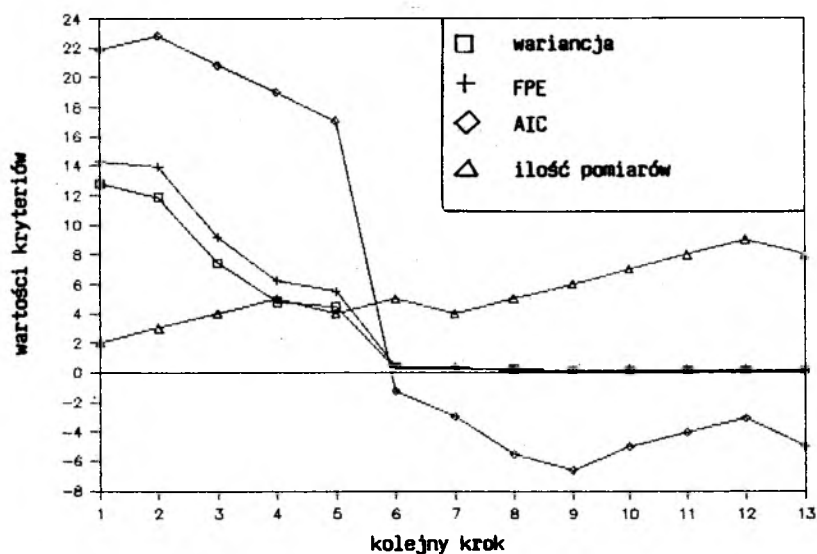


Fig. 1. Values of  $\sigma_n^2$ , FPE i AIC versus number of parameters

Rys. 1. Wartości  $\sigma_n^2$ , FPE i AIC w funkcji ilości parametrów.

Badania doboru struktury modelu wskazują, że wykorzystywane kryteria mają tendencję do proponowania zbyt dużej liczby parametrów. Ilość parametrów ustala się przy pomocy algorytmu ekspertowego, wykrywającego moment wystąpienia "kolana" (ang. elbow) na wykresach zmian kryteriów. W klasycznej regresji krokowej wprowadza się kolejne zmienne do modelu, zwiększając ilość parametrów. Dla niektórych zestawów danych bardziej niezawodnym sposobem doboru zmiennych jest postępowanie odwrotne, poszukiwanie rozpoczyna się od modelu zawierającego wszystkie zmienne i w kolejnych krokach eliminuje mało istotne zmienne. Aktualnie opracowywany przyrząd zawiera kilkadziesiąt detektorów (zmiennych I). W związku z tym rozwijany jest ekspertowy system doboru struktury modelu, który umożliwi znaczne zmniejszenie ilości badanych struktur modelu.

#### 4. Wnioski

Dzięki zastosowaniu odpowiednich testów, zautomatyzowano zagadnienie optymalnego doboru modelu cechowania analizatora uziarnienia. Rozwiązanie tego zagadnienia jest szczególnie istotne w związku z opracowywaniem nowej wersji analizatora, zawierającej kilkadziesiąt detektorów.

#### Literatura

1. Astrom, K.J., Maximum likelihood and prediction error methods. Automatica, 16, 551-574, 1980.
2. Akaike, H., A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Aut. Control, AC-19, 716-722, 1974.

Badania zrealizowano w ramach projektu Nr 7 7153 91 02, finansowanego w roku 1992 przez Komitet Badań Naukowych.

Pawluk T., Czachor G., Paprotny Wł., 1992. Choice of Calibration Model Structure for the Diffraction Method of Measurement of Particle Size Distribution. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 67-72 (polish text)

Selection of calibration model structure for the particle size analyzer is an iterative procedure which includes parameter estimation and model validation. An "exhaustive search" approach could lead to horrendous number of models. Provided with data measurements, the expert system organizes an intelligent search through the set of candidate structures and stops with the "best" model according to statistical tests. Tests on real measurements have shown that the expert system behaves as well as human expert, with considerable savings in time.

