

ZOFIA OCIEPA\*, WIESŁAW MAĆZKA\*

## **Badanie wpływu kształtu ziarn na wyniki rozdziału w procesach wzbogacania grawitacyjnego**

### Słowa kluczowe

Procesy grawitacyjne, wzbogacanie w osadzarkach, kształt i gęstość ziarna, prędkość opadania

### Streszczenie

W pracy przedstawiono rezultaty modelowych badań nad wpływem kształtu ziarn na proces rozdziału w osadzarce. Do badań wykorzystano wąską klasę ziarnową materiału o zbliżonej gęstości ziarn i wyraźnym zróżnicowaniu ich pod względem kształtu. Przyjęto, że dla takiego materiału czynnikami decydującymi o rozdziale ziarn w procesach grawitacyjnych będzie masa ziarna i jego kształt. Wyznaczono prędkości opadania ziarn o zbliżonej masie w zależności od ich kształtu oraz dokonano rozdziału w urządzeniu imitującym pracę osadzarki. Uzyskano potwierdzenie wpływu kształtu ziarna na przebieg i wyniki rozdziału grawitacyjnego. W przypadku wąskiej klasy ziarnowej wpływ masy ziarna na wyniki rozdziału był mniej istotny. Ważnym parametrem jest czas rozdziału i kształt ziarna. Ziarna kuliste ulegają uporządkowaniu szybciej niż ziarna płaskie.

### Wprowadzenie

Przebieg przepływowych procesów rozdzielczych (klasyfikacji hydraulicznej, jak również procesów wzbogacania grawitacyjnego) uzależniony jest od różnic prędkości opadania ziarn. Prędkość opadania uwarunkowana jest między innymi wielkością, gęstością oraz kształtem ziarna. W przypadku rozdziału materiałów, w których wszystkie ziarna mają identyczną gęstość oraz zbliżone rozmiary, kształt ziarna może być podstawowym czynnikiem decydującym o prędkości opadania. W procesach masowych, gdzie mamy do czynienia ze znaczną ilością ziarn o zróżnicowanych kształtach, czynnik ten może mieć znaczący wpływ na efektywność procesu.

---

\* Dr inż., Wydział Górnictwa AGH, Kraków.

Recenzował prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Sztaba

Zagadnienie to ma szereg aspektów praktycznych. W procesach hydraulicznej segregacji mieszanin szkła z innymi materiałami o podobnej gęstości wpływ kształtu ziarna na prędkość opadania może być wykorzystany dla dokonania rozdziału szkła od pozostałego materiału. Rozdrobnione szkło charakteryzuje się płaskimi ziarnami zdecydowanie różniącymi się kształtem od ziaren gruzu, cegły czy też żwirów występujących w zanieczyszczonej stłuczce czy też odpadach komunalnych.

W referacie przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań modelowych związanych z powyższym zagadnieniem.

## 1. Opadanie ziarn w ośrodku wodnym

W zakresie opadania ziarn istnieje bogata literatura przedmiotowa omawiająca zarówno proces przemieszczania się ziarn w ośrodku, jak i matematyczny opis tego zjawiska (Stępiński 1964; Budryk 1977; Makary 1977; Szochin 1980; Tichonov 1984).

Z uwagi na warunki w jakich ten proces zachodzi, rozróżnia się opadanie swobodne i opadanie skrepowane.

Pod pojęciem **opadania swobodnego** rozumie się opadanie pojedynczych ziarn w środowisku, w którym wielkość ziarna jest bardzo mała w porównaniu z przekrojem poprzecznym naczynia, w którym ziarno porusza się oraz gdy ziarna współopadające nie oddziałują wzajemnie na siebie. Tak więc wpływ tych oddziaływań na prędkość opadania ziarna można pominąć. Opadające ziarno w początkowym okresie porusza się pod wpływem siły ciężkości zwiększając swą prędkość tak długo, dopóki zwiększający się ze wzrostem prędkości opór nie zrównoważy pozostałych sił działających na ziarno. Z chwilą gdy siły te osiągną stan równowagi, ziarno uzyskuje prędkość końcową  $v_0$  i w dalszym ciągu opada już ze stałą prędkością. Prędkość tę można wyznaczyć z warunku równowagi sił działających na ziarno. Jak wiadomo, na ziarno zanurzone w cieczy i znajdujące się w ruchu, w polu grawitacyjnym działają:

- siła grawitacji,
- siła wyporu ośrodka wynikająca z prawa Archimedesesa,
- siła oporu hydrodynamicznego zależna od prędkości i przyspieszenia przemieszczania się cząstki, jej wielkości i kształtu, gęstości i lepkości cieczy. Dla cząstki przemieszczającej się ze stałą prędkością opór ten wyraża się równaniem:

$$F = \Psi \Delta v^2 d^2$$

gdzie:

- $\Psi$  — współczynnik oporu zależny od liczby Reynoldsa,
- $\Delta$  — gęstość cieczy,
- $v$  — prędkość ruchu ziarna,
- $d$  — wielkość ziarna.

Opór hydrodynamiczny wywołany jest przez:

- siłę tarcia cieczy o cząstkę zależną od pola powierzchni cząstki, gradientu prędkości i lepkości cieczy,
- wypadkowej działających na powierzchnię cząstki sił naporu (ciśnienia) ośrodka.

Od wzajemnego stosunku pomiędzy tymi dwoma siłami (tarcia i ciśnienia) zależy wielkość i charakter oporu hydrodynamicznego. Dla cząstek małych ( $d < 0,2$  mm), dla małych liczb Reynoldsa ( $Re < 100$ ), dominuje siła tarcia, dla ziarn dużych — wypadkowa sił ciśnienia.

W stanie równowagi sił działających na ziarno kuliste poruszające się w cieczy nieruchomej równanie ruchu ziarna ma postać:

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho - \Delta) g = \psi \Delta d^2 v^2$$

gdzie:

$g$  — przyspieszenie ziemskie.

Na podstawie tych rozważań wyprowadzono szereg wzorów na prędkość opadania ziarn w warunkach opadania swobodnego. Najczęściej stosowane to: wzór Stokesa, Newtona-Rittingera, Budryka czy empiryczny wzór Allena. Dla ziarn dużych, o średnicy powyżej 1 mm, najczęściej zaleca się stosowanie wzoru Rittingera:

$$v = K \sqrt{\frac{\rho - \Delta}{\Delta}} \cdot d$$

gdzie:

$K$  — współczynnik uwzględniający głównie kształt ziarna,

$\rho$  — gęstość ziarna.

Jeżeli przyjąć, że rozdziałowi podlega wąska klasa ziarnowa materiału jednorodnego pod względem gęstości ( $\rho = \text{const.}$ ), a różniącego się w sposób istotny pod względem kształtu ziarn, to w takich samych warunkach przemieszczania się ziarn o ich prędkości opadania w głównej mierze decydować będzie kształt ziarna (na prędkość opadania mają także wpływ chropowatość powierzchni i jej zwilżalność, ale — jak podaje literatura — ich wpływ jest zdecydowanie mniejszy). Można więc przyjąć, że jeżeli różnice kształtu ziarn będą dostatecznie duże, to w określonych warunkach można będzie uzyskać rozdział ziarn według ich kształtu.

Cytując za Sztabą (1964) pod pojęciem **kształtu ziarna** rozumie się konfigurację przestrzenną ziarna, wyrażoną przez opis, stwierdzenie podobieństwa geometrycznego lub przez wartość umownych, bezwymiarowych współczynników. Istnieje duża trudność w jednoznacznym określeniu kształtu ziarna, szczególnie dotyczy to ziarn o nieregularnych postaciach.

W literaturze podaje się opisowo ziarna: sześciennie, graniaste, wydłużone, płytkowe, igiełkowate, zaokrąglone, kuliste itp.

Dla liczbowego opisu bardzo często kształt ziarna charakteryzuje się współczynnikiem kształtu, sferyczności (kulistości) czy cyrkularności (kolistości) i innymi.

Pod pojęciem **współczynnika kształtu** ( $W_k$ ), najczęściej rozumie się stosunek szerokości ziarna do jego grubości. **Współczynnik sferyczności** ziarna definiuje się jako stosunek powierzchni ziarna do powierzchni kuli o tej samej objętości co ziarno. **Cyrkularność ziarna**

określa się jako stosunek obwodu rzutu ziarna do obwodu koła o tej samej powierzchni co rzut ziarna. Wartości te można też określić przez stosunek średnicy zastępczej ziarna do średnicy najmniejszej kuli, którą można opisać na mierzonym ziarnie. Kształt ziarna może też być opisany współczynnikiem kształtu rozumianym jako stosunek kwadratu średnicy zastępczej ziarna do kwadratu średnicy projekcyjnej ziarna (Nowak 1981).

W procesach rozdziału ziarn zachodzących zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych mamy do czynienia z opadaniem skrępowanym. Dla procesów tych charakterystyczne jest to, że przemieszczaniu podlega nie pojedyncze ziarno, lecz masa ziarn w urządzeniu, którego rozmiary wielokrotnie przewyższają rozmiary ziarna. W warunkach tych bardzo istotne jest wzajemne oddziaływanie ziarn sąsiadujących ze sobą. Zjawisko opadania skrępowanego było badane i opisywane przez wielu badaczy, jednak do tej pory nie ma jednolitej teorii ruchu skrępowanego ziarn, która pozwoliłaby na pełne wyjaśnienie i opis tego zjawiska. Jest to związane z dużą liczbą czynników decydujących o opadaniu skrępowanym i ogromnymi trudnościami w ich ilościowym ujęciu.

Materiał modelowy wykorzystany w przeprowadzonych badaniach stanowił zbiór ziarn jednorodnych pod względem rozmiarów oraz gęstości. W przypadku rozpatrywania procesu skrępowanego opadania jednorodnych ziarn wykorzystywane są dwa rodzaje wzorów dla określenia prędkości opadania (Kizevalter 1979). Wzory pierwszego rodzaju zakładają, że masa rozpatrywanych ziarn zachowuje się jak filtr, przez który następuje pionowy przepływ cieczy od dołu do góry. Drugie podejście do opisu rozpatruje opadanie w cieczy pojedynczego ziarna znajdującego się w grupie pozostałych ziarn. Oba wymienione sposoby pozwalają na wyznaczenie prędkości opadania skrępowanego za pomocą skomplikowanych zależności, których zastosowanie jest ograniczone do wąskiej klasy ziarnowej.

Jednym z najprostszych wzorów na prędkość opadania skrępowanego ziarn jednorodnych jest wzór Olewskiego:

$$v_{sk} = v_{sw} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)$$

gdzie:

- $v_{sk}$  — prędkość opadania skrępowanego,
- $v_{sw}$  — prędkość opadania swobodnego,
- $T$  — masowa koncentracja części stałych w rozpatrywanej mieszaninie,
- $T_m$  — maksymalna koncentracja części stałych (ułożenie ziarn w siatce sześcienniej).

Analiza doświadczalna powyższej zależności wykazała, że można ją stosować dla wąskiej klasy ziarnowej (0,2—0,3 mm) i nieznacznych różnic gęstości ziarn (2,65—3 g/cm<sup>3</sup>) przy współczynniku rozluźnienia (objętościowy udział fazy ciekłej w zawiesinie)  $m > 0,8$ .

Dla opisu kinetyki procesu rozdziału ziarn w warunkach rzeczywistych panujących w osadzarce można wykorzystać jego opis jako procesu stochastycznego. Proces rozdziału można tutaj rozpatrywać jako stochastyczny składający się z dwóch procesów składających:

- zgodnego z prawami fizycznymi przemieszczenia jednorodnych ziarn w kierunku pionowym (w dół lub w górę) pod wpływem siły ciężkości i oporu środowiska,
- przypadkowych zmian położenia ziarn.

Ze statystycznego punktu widzenia współrzędna ziarna dowolnego z odczytywana od pewnego poziomu (na przykład od sita osadzarki) jest wielkością losową mającą pewne prawdopodobieństwo o gęstości rozkładu  $\omega(z_0, z, t)$ . Wyrażenie  $\omega dz$  określa prawdopodobieństwo znalezienia się ziarna w czasie  $t$  w warstwie ograniczonej współrzędnymi  $z$  i  $z + dz$ . Wspomniane prawdopodobieństwo jest równoważne z uzyskiem ziarn do określonego obszaru. Gęstość rozkładu prawdopodobieństwa  $\omega$  można rozpatrywać jako względną koncentrację danego składnika.

Procesy, w których jednocześnie zachodzi zmiana położenia ziarn i uporządkowane poruszanie się w określonym kierunku pod wpływem wspomnianych wyżej sił, można opisać równaniem Fokkera-Plancka w następującej postaci:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} [c(t, z)\omega] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} [b(t, z)\omega]$$

gdzie:

$c(t, z)$ ,  $b(t, z)$  — współczynniki zależne w ogólnym przypadku od  $t$  i  $z$ .

Współczynnik  $c(t, z)$  związany jest z ruchem ziarn wynikającym z działania siły ciężkości i oporu środowiska.

Współczynnik  $b(t, z)$  związany jest z przypadkowym przemieszczaniem ziarn, jest to współczynnik quasidyfuzji ziarn.

Jeśli powyższe współczynniki mają wartości stałe, podane wyżej równanie przyjmie postać:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -c \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{b}{2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}$$

Względną ilość ziarn przechodzących przez powierzchnię jednostkową na poziomie  $z = z_1$  (np. przez sito osadzarki) w jednostce czasu można opisać wzorem

$$\varepsilon_1 = \frac{b}{2} \frac{\partial \omega}{\partial z} \pm c\omega$$

W powyższym równaniu znaki „+” i „-” związane są z kierunkiem przemieszczania się ziarn w dół lub w górę.

Przy  $\varepsilon_1 = 0$  (warunek równowagi quasistacjonarnej) z równania powyższego otrzymamy:

$$\frac{b}{2} \frac{\partial \omega}{\partial z} \pm c\omega = 0$$

Powyższe równanie zostało wykorzystane dla opisu procesów klasyfikacji grawitacyjnej (Tichonov 1984).

Matematycznym opisem procesu wzbogacania w osadzarce zajmowało się także wielu autorów (Siwiec, Tumidajski 1985).

## 2. Przedmiot i metodyka badań

### 2.1. Charakterystyka materiału

Przedmiotem badań były ziarna wybrane ze żwiru rzecznoego. Przy wyborze ziarn brano pod uwagę ich kształt, wielkość, masę i gęstość.

Do badań wybrano ziarna o wielkości 15—30 mm, masie od 3 do około 5,5 (6) gramów i gęstości około 2,55 do 2,68 g/cm<sup>3</sup>.

Kształt ziarna opisano umownym „wskaźnikiem kształtu” i określano go jako stosunek masy ziarna do prostopadłego rzutu jego powierzchni na płaszczyznę, przy najbardziej stabilnym położeniu przyjętym przez ziarno po swobodnym jego rzucie na powierzchnię poziomą. W ten sposób chciano powiązać kształt ziarna z jego masą, jako czynnikiem, który ma wpływ na prędkość przemieszczania się ziarn.

Do analizy i oceny wyników rozdziału ziarna pogrupowano według przyjętego „wskaźnika kształtu” w sześć grup podanych w tabeli 1. W tabeli tej oraz na rysunku 1 podano także dodatkowo opisowo kształt ziarn (ich postać) dominujących w danej grupie.

TABELA 1

Charakterystyka materiału używanego do badań pod względem kształtu

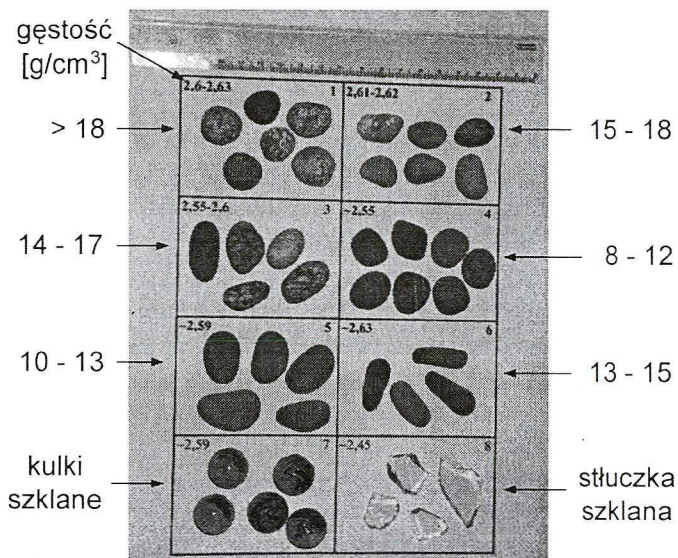
TABLE 1

Characteristics of the material used for investigations in reference to the shape

Grupa kształtu ziarna	„Wskaźnik kształtu” ziarna	Opis kształtu ziarna
1	ok. 8—10,5	płytko kolista
2	>10,5—12,5	płaskie wydłużone
3	>12,5—15,5	igły płaskie, igły grube
4	>15,5—18,5	kuliste, lekko wydłużone
5	>18,5—21,5	kuliste
6	>21,5	kuliste

### 2.2. Opis metody badania opadania swobodnego

Do wyznaczenia prędkości opadania wybranych ziarn posłużono się pionowo umocowaną szklaną rurą o średnicy wewnętrznej około 63 mm i wysokości roboczej około 1300 mm. Rura była napełniona wodą do wysokości około 1150 mm. Czas opadania ziarna mierzono po prze-



Rys. 1. Zdjęcie przedstawiające kształt ziarn ze zbioru użytego do badań. Liczby wskazane strzałką oznaczają wartości „wskaźnika kształtu”

Fig. 1. Photograph presenting the shape of grains from the set used for investigations. Numbers marked by an arrow denote the values of the “index of the shape”

byciu przez nie odcinka początkowego o wysokości około 200 mm. Droga ziarna, na której mierzono czas opadania wynosiła 950 mm.

Do wyznaczenia prędkości opadania wybrano ziarna o zbliżonej masie i różnych kształtach. Pomiar wykonano dla pięciu grup ziarn o masie około: 3, 3,5, 4, 4,5 i 5g. Wyniki pomiarów podano w tabeli 2, a na rysunku 2 przedstawiono zależności prędkości opadania ziarn o danej masie od „wskaźnika kształtu”.

TABELA 2

Prędkość opadania ziarn w wodzie w zależności od masy i kształtu ziarna  
(S — powierzchnia, v — prędkość opadania ziarna, Q — masa ziarna, Q/S — „wskaźnik kształtu”)

TABLE 2

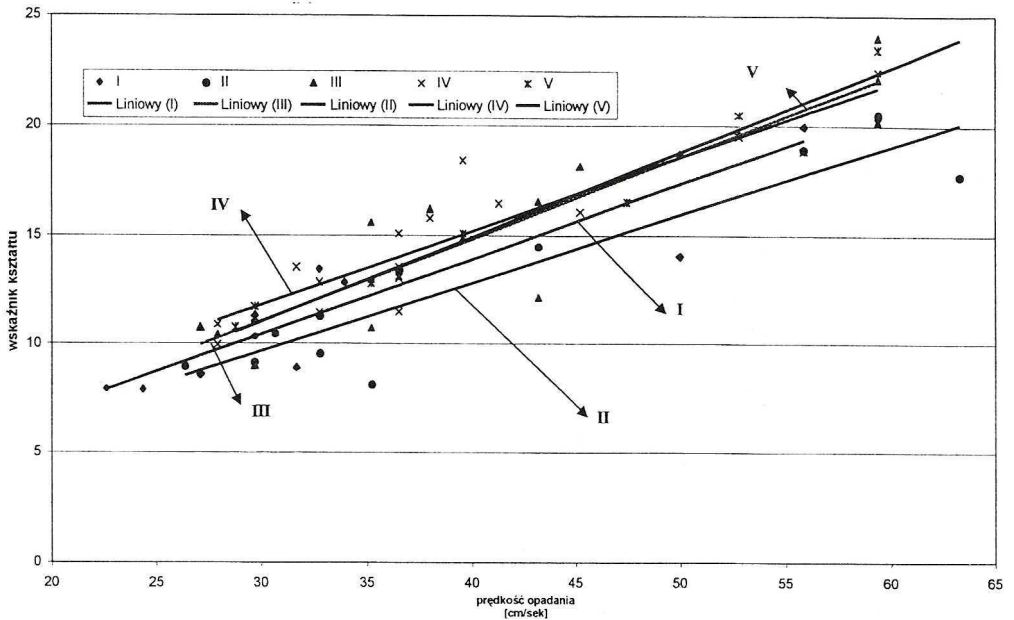
Velocity of grain settling in the water depending on the mass and shape of the grain  
(S — surface, v — velocity of grain settling, Q — mass of the grain, Q/S — “index of the shape”)

Grupa	Ciężar [g]	S [mm <sup>2</sup> ]	Q/S	Kształt	Czas opadania [s]	v [m/s]
	2	3	4	5	6	7
I ~3 g	3,184	403	7,9	płytko kolistą	3,9	24,36
	3,221	407	7,91	płytko kolistą	4,2	22,62
	3,215	376	8,55	wydłużony	3,5	27,14
	3,039	352	8,63	płaska igła	3,5	27,14

1	2	3	4	5	6	7
I ~3 g	2,99	337	8,87	plaskie wyd.	3,0	31,67
	3,184	308	10,34	plytka kolista	3,2	29,69
	3,156	286	11,03	plytka kolista	3,2	29,69
	3,063	271	11,3	plytka kolista	3,2	29,69
	3,21	250	12,84	igla	2,8	33,93
	3,075	229	13,43	plaska igla	2,9	32,76
	3,0	214	14,02	kuliste	1,9	50,0
	3,028	205	14,77	igla gruba	2,4	39,58
	3,067	164	18,7	kuliste	1,9	50,0
	3,199	160	19,99	kuliste	1,7	55,88
II ~3,5 g	3,467	426	8,14	plytka kolista	2,7	35,19
	3,572	399	8,95	plaskie wyd.	3,6	26,39
	3,57	390	9,15	plytka kolista	3,2	29,69
	3,688	387	9,53	plytka kolista	2,9	32,76
	3,619	346	10,46	plytka kolista	3,1	30,65
	3,539	314	11,27	wydluzony	2,9	32,76
	3,4	254	13,39	igla	2,6	36,54
	3,608	249	14,49	koło grube	2,2	43,18
	3,335	188	17,74	kuliste wyd.	1,5	63,33
	3,444	182	18,92	kuliste	1,7	55,88
	3,511	171	20,53	kuliste wyd.	1,6	59,38
III ~4 g	4,012	446	8,99	plytka kolista	3,2	29,69
	3,94	378	10,42	plytka kolista	3,4	27,94
	3,979	370	10,75	plaskie wyd.	2,7	35,19
	4,046	376	10,76	plytka kolista	3,5	27,14
	3,716	336	11,06	igla plaska	3,2	29,69
	4,158	343	12,12	plytka kolista	2,2	43,18
	4,115	318	12,94	igla	2,7	35,19
	3,8	244	15,57	koło grube	2,7	35,19
	4,159	257	16,18	igla gruba	2,5	38,0



1	2	3	4	5	6	7
III ~4 g	3,932	238	16,52	koło grube	2,2	43,18
	3,864	213	18,14	kuliste	2,1	45,24
	3,932	200	19,66	kuliste	1,8	52,78
	4,17	206	20,24	kuliste	1,6	59,38
	4,213	190	22,17	kuliste	1,6	59,38
	4,135	172	24,04	kuliste	1,6	59,38
IV ~4,5 g	4,476	449	9,97	plytka kolista	3,4	27,94
	4,401	404	10,89	plaskie	3,4	27,94
	4,372	383	11,42	plaskie wyd.	2,9	32,76
	4,436	386	11,49	plytka kolista	2,6	36,54
	4,648	362	12,84	plaskie	2,9	32,76
	4,709	361	13,04	koło grube	2,6	36,54
	4,641	343	13,53	koło grube	3,0	31,67
	4,44	328	13,54	plytka kolista	2,6	36,54
	4,463	296	15,08	koło grube	2,6	36,54
	4,622	293	15,77	igła gruba	2,5	38,0
	4,591	286	16,05	kuliste	2,1	45,24
	4,636	282	16,44	igła gruba	2,3	41,3
	4,605	250	18,42	igła gruba	2,4	39,58
	4,494	230	19,54	kuliste	1,8	52,78
4,563	226	20,19	kuliste	1,6	59,38	
4,452	198	22,48	kuliste	1,6	59,38	
V ~5 g	5,078	472	10,76	plaskie wyd.	3,3	28,79
	4,9	419	11,69	plytka kolista	3,2	29,69
	5,151	403	12,78	plytka kolista	2,7	35,19
	4,819	367	13,13	igła	2,6	36,54
	4,962	329	15,08	igła gruba	2,4	39,58
	5,143	312	16,48	igła gruba	2,0	47,5
	4,969	264	18,82	kuliste	1,7	55,88
	4,839	236	20,5	kuliste	1,8	52,78
	5,119	218	23,48	kuliste	1,6	59,38
5,012	200	25,06	kuliste	1,5	63,33	



Rys. 2. Prędkość opadania ziarn o różnej masie w zależności od wskaźnika kształtu (liniami ciągłymi zaznaczono trendy dla grup ziarn: I — masa 3g, II — 3,5 g, III — 4g, IV — 4,5 g i V — 5g)

Fig. 2. Velocity of settling of different mass grains depending on the index of the shape (I — 3 g mass, II — 3,5 g, III — 4 g, IV — 4,5 g and V — 5g)

### 2.3. Opis metody rozdziału w osadzarce

Rozdział ziarn wykonano w urządzeniu imitującym pracę osadzarki z sitem ruchomym. Urządzenie to składało się z dwóch, centrycznie względem siebie zainstalowanych cylindrów: zewnętrznego, nieruchomego, wypełnionego wodą i wewnętrznego wykonującego w pionie ruchy posuwisto-zwrotne z częstotliwością około 90 wahań na minutę i amplitudzie około 100 mm. Cylinder wewnętrzny wykonany był z luźnych pierścieni o średnicy 100 mm i wysokości 20 mm każdy. Tylko ostatni, dolny pierścień miał wysokość około 15 mm. Pierścienie zewnętrzne, dolny i górny, zaopatrzone były siatką o wielkościach otworów 3 mm.

W każdym doświadczeniu sześć pierścieni napełniano dobrze wymieszanym materiałem (starano się, aby sposób mieszania i napełniania był jednakowy we wszystkich doświadczeniach), następnie dołączano pozostałe pierścienie, całość skręcano, umieszczano w cylindrze zewnętrznym i uruchamiano urządzenie na ustalony czas. Po tym czasie pierścienie rozdzielano, zawarty w nich materiał suszono, a następnie ziarna segregowano ręcznie według zaznaczonego na nich „wskaźnika kształtu” i ważono.

Wyniki doświadczeń uzyskane dla różnych czasów rozdziału podano w tabeli 3 oraz na rysunkach 3a—c.

TABELA 3

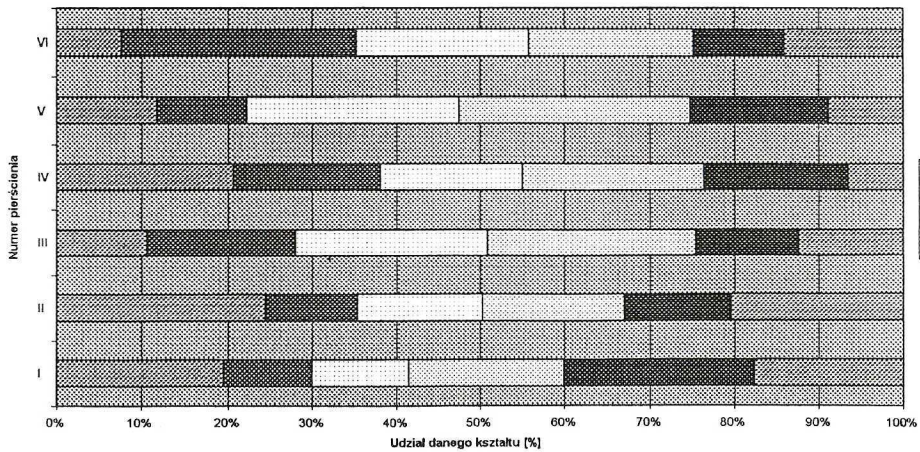
Wyniki rozdziału w zależności od czasu (udział danego kształtu w pierścieniu)

TABLE 3

Results of separation depending on time (participation of a given shape in the ring)

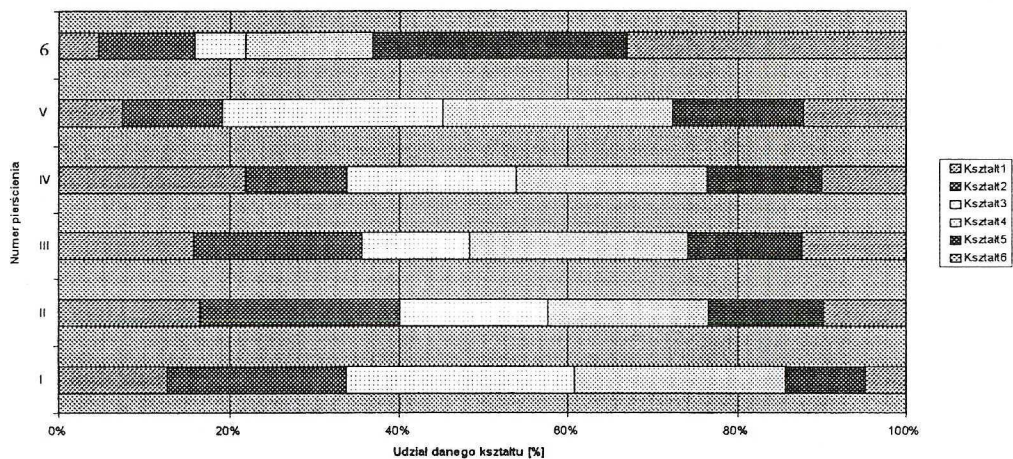
Czas minuty	Pierścień numer	Kształt ziarna						Suma [%]
		1	2	3	4	5	6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	I	19,54	10,47	11,48	18,32	22,63	17,56	100
	II	24,43	10,93	14,9	16,66	12,74	20,34	100
	III	10,71	17,27	22,82	24,67	12,26	12,27	100
	IV	20,63	17,44	17,02	21,33	17,11	6,47	100
	VI	11,79	10,4	25,29	27,28	16,37	8,87	100
	VI	7,66	27,52	20,64	19,34	10,85	13,99	100
1	I	8,9	13,6	22,7	34,9	12,2	7,7	100
	II	13,5	17,7	20,2	16,2	19,8	12,6	100
	III	21,6	23,3	14	19,8	13,6	7,7	100
	IV	13,4	16,3	21,1	23	13,7	12,5	100
	V	12,1	11,3	25	20,5	13	18,1	100
	VI	10,4	10,1	9,6	19,9	22,6	27,4	100
3	I	12,92	20,9	27,1	25,1	9,24	4,74	100
	II	16,5	23,7	17,5	19,1	13,9	9,3	100
	III	15,8	19,8	12,7	26	13,7	12	100
	IV	21,9	12	20	22,7	13,7	9,7	100
	V	7,4	11,7	26,1	27,1	15,8	11,9	100
	VI	4,6	11,2	6,3	14,9	30,2	32,8	100
6	I	27,5	14,7	19,1	20,8	17,9	0	100
	II	14,9	21,9	17,2	26,7	11	8,3	100
	III	14,8	12,9	19,6	12,3	24,5	15,9	100
	IV	11,8	15,1	22,1	25,9	4,9	20,2	100
	V	9	26,8	19,4	27,5	12,6	4,7	100
	VI	5,2	2,2	13	23,5	26,8	29,3	100
9	I	15,9	25,3	20,7	17,5	18,5	2,1	100
	II	21,4	7,3	21,8	26	21,2	2,3	100
	III	8	17,3	20,6	27,3	18,9	7,9	100
	IV	13,7	20	11,2	24,7	18	12,4	100
	V	16,5	21,5	24,1	18	13,7	6,2	100
	VI	4,1	4,1	11,6	19,5	4,6	56,1	100

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	I	23,1	17,1	16,7	28,3	14,8	0	100
	II	21,9	11,4	13,3	17,7	30,9	4,8	100
	III	14,8	16,6	15,2	16,2	18,2	19	100
	IV	9,8	18,8	21,3	28,3	8	13,8	100
	V	6,7	11,1	29,8	28,4	13,4	10,6	100
	VI	6,9	13,8	9,1	23,3	8,5	38,4	100
20	I	20,5	17,9	17,9	29	12,1	2,6	100
	II	16,8	17,8	14,6	14,8	20,5	15,5	100
	III	13,4	23,5	21,2	28,5	9,7	3,7	100
	IV	15	14,8	27,7	21,6	15,9	5	100
	V	14,9	10,9	19,2	22,4	16,9	15,7	100
	VI	1,9	9,3	11,7	27,9	14,8	34,4	100



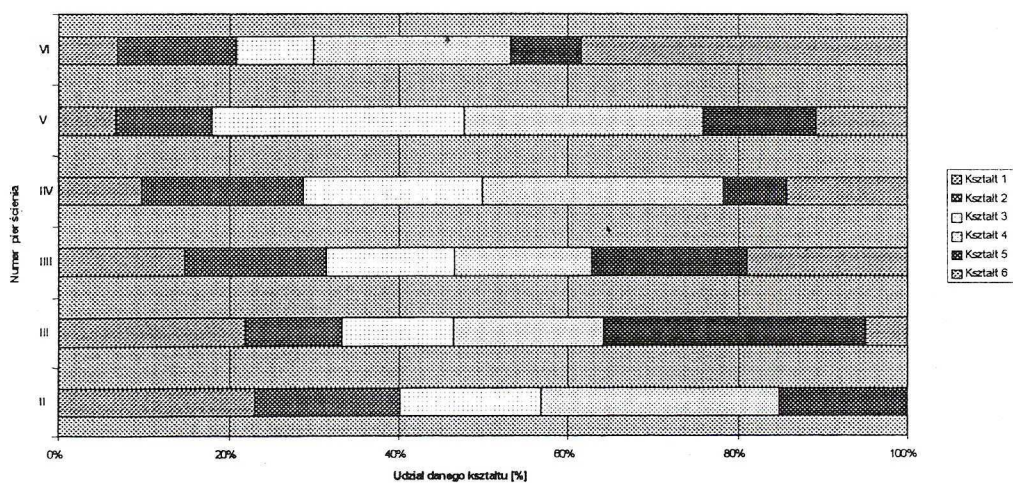
Rys. 3a. Rozdział ziarn w poszczególnych pierścieniach, w próbie bez wzbogacania

Fig. 3a. Distribution of grains in individual rings in the test excluding enrichment



Rys. 3b. Rozdział ziarn w poszczególnych pierścieniach po 3 minutach wzbogacania

Fig. 3b. Distribution of grains in individual rings after the three minute enrichment



Rys. 3c. Rozdział ziarn w poszczególnych pierścieniach po 15 minutach wzbogacania

Fig. 3c. Distribution of grains in individual rings after the 15 minute enrichment

### 3. Omówienie wyników badań

#### 3.1. Wpływ kształtu ziarna na opadanie swobodne

Założono, że dla wąskiej klasy ziarnowej materiału „jednorodnego” pod względem gęstości, o prędkości opadania decyduje masa ziarna i jego kształt. Celem wyjaśnienia, która z tych cech jest czynnikiem dominującym, wykonano pomiary prędkości opadania dla pięciu grup ziarn o zbliżonej masie (ok.: 3, 3,5, 4, 4,5 i 5g), a różniących się wyraźnie kształtem. Wyniki doświadczeń podano w tabeli 2, a na rysunku 2 przedstawiono zależności prędkości opadania ziarn od „wskaźnika kształtu”. W tabeli 2 wskaźnik kształtu to stosunek masy ziarna do rzutu jego powierzchni na płaszczyznę poziomą (Q/S).

Wyniki doświadczeń potwierdziły, że kształt ziarna miał decydujący wpływ na prędkość opadania. Dla wszystkich grup ziarn potwierdzona została znana zależność, że ziarna płaskie okrągłe lub płaskie zaokrąglone opadają z prędkością najmniejszą. Większą prędkość opadania miały ziarna wydłużone, igłowe, a największą ziarna kuliste. Linie trendu (liniowego) dla grup ziarn o różnych masach charakteryzuje prawie identyczny współczynnik nachylenia. Uzyskane zależności pozwalają stwierdzić, że w procesie swobodnego opadania badanego materiału masa ziarna miała znaczenie drugorzędne. Uznano więc, że jeżeli podstawą rozdziału zbioru ziarn na frakcje jest ich kształt, a rozdział zachodzi według różnic prędkości opadania, to można uzyskać efekt segregacji na podstawie różnic kształtów ziarn.

#### 3.2. Wyniki rozdziału w osadzarce

W tabeli 3 i 4 oraz na rysunkach 3a—c podano wyniki rozdziału badanego materiału w „osadzarce” uzyskane dla różnych czasów wzbogacania: 1, 3, 6, 9, 15 i 20 minut. W tabelach tych podano także wyniki tak zwanej próby zerowej — są to wyniki naturalnego rozkładu ziarn w pierścieniach uzyskanego przy ich napełnianiu (czas wzbogacania równy 0 min). Wyniki te stanowiły punkt odniesienia w ocenie rozdziału w procesie wzbogacania.

Pierścienie ponumerowano od I do VI, gdzie nr I oznacza pierścień górny, a VI pierścień dolny.

W tabeli 4A i B zestawiono wyniki rozdziału w zależności od czasu wzbogacania dla ziarn o dwóch skrajnych „wskaźnikach kształtu”. W części A tabeli podane wyniki dotyczą ziarn z grupy 1 o „wskaźniku kształtu” w przedziale od 8 do 10,5 (ziarna płaskie, koliste i lekko wydłużone). W części B podano rozkład ziarn z grupy 6 o wskaźniku kształtu powyżej 21 (ziarna kuliste).

Na rysunkach 3a—c przykładowo przedstawiono graficznie udział ziarn danego kształtu w poszczególnych pierścieniach dla czasów wzbogacania 0, 3 i 15 minut.

Analizując przedstawione dane (tab. 3, rys. 3a—c) stwierdza się, że w próbce bez wzbogacania nie ma wyraźnego, ukierunkowanego zróżnicowania rozkładu ziarn w poszczególnych pierścieniach. W procesie wzbogacania zachodzi uporządkowanie ziarn pod względem kształtu, szczególnie dla ziarn o skrajnych wartościach wskaźnika kształtu 1 i 6. Analizując rozkład tych ziarn obserwuje się bardzo wyraźne i stosunkowo szybkie uporządkowanie ziarn kulistych (kształt 6). Ich udział w pierścieniu dolnym (VI) zmienia się od około 20,7 % (bez wzbogacania) do około 56,3 % po 9 minutach wzbogacania (tab. 4B). Bardzo wyraźnie maleje także udział tych

TABELA 4

Wyniki rozdziału w zależności od czasu

TABLE 4

Results of separation depending on time

## A. Udział ziarn kształtu 1 w poszczególnych pierścieniach [%]

## A. Participation of the grains of the shape 1 in individual rings [%]

Pierścień numer	Czas [minuty]						
	0	1	3	6	9	15	20
I	2	3	4	5	6	7	8
I	24,1	9,2	15,3	26,4	16,4	24,2	22,2
II	20,8	18	19,6	21,9	28,3	26,4	21,7
III	10,9	28,9	21,8	19,2	10,9	21,1	16,7
IV	21,8	18,9	28,9	16,1	19,4	13,2	18,1
VI	12,7	15,3	9,9	11,1	21,1	9	19,4
VI	9,7	9,7	4,5	5,3	3,9	6,1	1,9
	100	100	100	100	100	100	100

## B. Udział ziarn kształtu 6 w poszczególnych pierścieniach [%]

## B. Participation of the grains of the shape 6 in individual rings [%]

I	2	3	4	5	6	7	8
I	25,3	7,9	6	0	2,3	0	3,1
II	20,2	16,7	11,8	12,8	3,2	5,9	22,6
III	14,6	10,2	17,5	21,5	11,4	27	5,3
IV	8	17,3	13,5	28,8	18,4	18,6	6,8
V	11,2	22,5	16,9	6,1	8,4	14,1	23,2
VI	20,7	25,4	34,3	30,8	56,3	34,4	39
	100	100	100	100	100	100	100

ziarn w pierścieniu górnym (I); od około 25,3% — bez wzbogacania, do kilku procent lub nawet do zera dla czasu 6 i 15 minut (tab. 4B).

Podobnie wyraźne, chociaż nie tak dokładne uporządkowanie obserwuje się w zakresie ziarn płaskich z grupy 1 i 2. Dla tych ziarn uporządkowanie i rozdział zachodzą znacznie wolniej

i w większym stopniu zależy od czasu wzbogacania. Najlepszy rozdział uzyskano po 6 minutach i wtedy udział ziarn kształtu I w pierścieniu górnym (I) wynosił około 26,4%, a w pierścieniu dolnym około 5,3% (tab. 4A).

Wyniki doświadczeń wskazują, że jeżeli z badanego zbioru ziarn chcielibyśmy wydzielić ziarna kuliste, to najkorzystniejsze wyniki rozdziału uzyskuje się po 9 minutach. Wtedy ich udział w pierścieniu VI (dolnym) wynosił około 56 lub 66% w połączonych pierścieniach dolnych (V + VI — tab. 4B). Chcąc wydzielić ziarna płaskie korzystniej jest przyjąć krótszy czas wzbogacania (6 minut). Po tym czasie udział ziarn płaskich w pierścieniu górnym (I) wynosił około 26—27%, a w połączonych pierścieniach górnych (I + II) około 48% (tab. 4 A, B).

Reasumując można stwierdzić, że dla badanego materiału kształt ziarna i czas wzbogacania miały istotny wpływ na wyniki rozdziału w „osadzarce”. Stosunkowo łatwo można było wydzielić ziarna kuliste, dla ziarn płaskich uporządkowanie i rozdział zachodziły w znacznie mniejszym stopniu i nie były tak dokładne. Może to wynikać stąd, że podczas wzbogacania w górnej warstwie łoża rozwarstwienie materiału jest zbyt duże i przy tych parametrach pracy „osadzarki” (amplituda, częstotliwość wahań) układ jest mało stabilny i może zachodzić zbyt intensywne mieszanie, które utrudnia segregację ziarn. Zjawisko to, jak również wpływ innych parametrów, takich jak grubość warstwy wzbogacanego materiału i średnica pierścieni, będą przedmiotem dalszych badań.

### Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań dla wąskiej klasy ziarnowej (15—30 mm) materiału „jednorodnego” pod względem gęstości (od ok. 2,55 do 2,68 g/cm<sup>3</sup>) uzyskano potwierdzenie wyraźnego wpływu kształtu ziarn na przebieg i wyniki rozdziału grawitacyjnego. Dla badanego materiału kształt ziarna jest parametrem istotnym wskazuje na to zarówno prędkość opadania ziarn jak i wyniki rozdziału w osadzarce. Masa ziarn ma w tym przypadku charakter czynnika drugorzędowego.

Bardzo istotnym parametrem jest czas rozdziału. Dla ziarn kulistych uporządkowanie zachodzi stosunkowo szybko i w stopniu zadowalającym, dla ziarn płaskich natomiast uporządkowanie przebiega znacznie wolniej, jest ono zakłócanie obecnością ziarn o kształtach pośrednich i być może ograniczoną przestrzenią, w której proces zachodzi. Może być także związany z nadmiernym rozluźwianiem materiału.

Artykuł jest wynikiem realizacji projektu badawczego KBN nr 9 T12A 015 14.

### LITERATURA

- Kizevalter B.V., 1979 — Teoreticzeskije osnovy gravitacionnych processov obogaszczeniija. Niedra, Moskwa.  
 Makary B., 1977 — Poradnik górnika, t. 5, s. 348—357. Śląsk, Katowice.  
 Nowak A., 1981 — Charakterystyki rozdziału jednorodnych ziarn mineralnych w wirówkach klasyfikujących. PWN, Warszawa—Kraków.



- Siwiec A., Tumidajski T., 1985 — Mathematical model of ore processing in a jig based on the analysis of grain movements. *Archiwum Górnictwa*, t. 30, z. 2.
- Spravochnik po obogaszczenu rud. Praca zbiorowa. Niedra, Moskwa 1983.
- Szochin V.N., Łopatin A.G., 1980 — Gravitacjonnyje metody obogaszczeniya. Niedra, Moskwa.
- Sztaba K., 1964 — Niektóre własności geometryczne zbiorów ziarn mineralnych. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
- Tichonov O.N., 1984 — Zakonomiornosti efektivnovo razdeleniya mineralov v processach obogaszczeniya poleznykh iskopajemykh. Niedra, Moskwa.
- Wybór pism Witolda Budryka. Tom II. Opracowanie zbiorowe pod redakcją S. Knothc, PWN, Warszawa-Kraków, 1977.
- Stępiński W., 1964 — Wzbogacanie grawitacyjne. PWN, Łódź-Warszawa-Kraków.

ZOFIA OCIEPA, WIESŁAW MACZKA

INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF THE GRAIN SHAPE ON THE RESULTS OF SEPARATION IN THE PROCESS OF GRAVITATIONAL ENRICHMENT

Key words

Gravitational processes, jiggng, grain shape and density, falling velocity

Abstract

The course of processes of hydraulic classification and also processes of separation (enrichment) depends on the differences in the velocity of falling of grains. The falling velocity is conditioned, among others, by dimensions, density and grain shape. In the case of separation of materials in which all grains have the same density and almost similar dimensions the grain shape may be the factor determining the falling velocity. In the bulk processes where we deal with many grains of differentiated shapes, this factor can have a significant effect on the process efficiency. The paper presents the results of model investigations on the influence of grain shapes on the separation process in the jig. A narrow grain class (15 to 30 mm) of the valley gravel was used for the tests which was a mixture of grains of close-to-similar density (about 2.55 to 2.68 g/cm<sup>3</sup>) and the mass from 3 to 5.5 g. The selected grains were characterised by a clear differentiation of shape. The grain shape was described conventionally by the "shape indicator" and was determined as the relation of grain mass to the perpendicular projection of its area on the plane, at its most stable position assumed by the grain after its free projection on the surface. It was an attempt to combine the grain shape with its mass as a factor affecting the velocity of displacement of grains. The values of the "shape indicator" were from 8 for flat grains and spherical, through slightly elongated and needle-shaped, up to 27 for spherical grains.

It was assumed that for such a material the grain mass and shape would be the factors which determine the separation of grains in gravitational processes. The falling velocities of grains of almost similar masses were determined experimentally, depending on their shape, and the separation was performed in a device which imitated a jig. The investigations confirmed the effect of the grain shape on the course and results of the gravitational separation. In case of the narrow grain class the effect of the grain mass on the results of separation was less significant. The separation time and grain shape constitute an important parameter. Spherical grains were subject to be arranged in order faster than flat grains. Their participation in the upper layer of the sediment of the jig decreased and, depending on the separation time, was from a few to 0%, at the simultaneous increase of their participation in the lower layer to about 66%.