

Krzysztof Wierzchowski\*

## STATYSTYCZNA OCENA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW TECHNICZNYCH PRACY HYDROCYKLONU „HWO” NA WYNIKI ROZDZIAŁU

### Streszczenie

W artykule omówiono wpływ wybranych parametrów technicznych hydrocyklonu „HWO” na wyniki wzbogacania mialu węglowego. Przeprowadzone w szerokim zakresie doświadczenia wartości kryterium rozdziału pozwoliły na otrzymanie produktów rozdziału o mocno zróżnicowanych parametrach jakościowych. Parametry te, tj. zawartość popiołu i koncentracja części stałych, poddano testom statystycznym metodą analizy wariancji w funkcji zmian średnic końcówek przelewowej i wylewowej. Testy wykazały, że zmiana średnic obu końcówek wpływa na zawartość popiołu w produktach wzbogacania. Wpływ taki występuje w przypadku koncentracji części stałych przelewu. Według oceny statystycznej średnice obu końcówek nie wpływają na koncentrację części stałych wylewu. Stwierdzono również, że dolna granica wielkości ziarn podlegających wzbogacaniu w hydrocyklonie, waha się w przedziale 0,18–0,063 mm.

### Statistical assessment of the effects of selected technical parameters of the “HWO” hydrocyclone operation on the separation results

### Abstract

The effects of selected technical parameters of the “HWO” hydrocyclone on the results of fine coal enrichment have been discussed in the paper. The experiments that had been carried out within a wide range of the values of the separation criterion allowed to obtain the products of separation with strongly diversified quality parameters. These parameters, i.e. ash content and concentration of solid particles have been subjected to statistical tests, using the variance analysis method, as a function of changes of diameters of both overflow and outflow endings. The tests have shown that the change of the diameters of both endings affects the ash content in the separation products. Such an effect occurs in the case of the concentration of solids in the overflow. According to the statistical assessment performed, the diameters of both endings do not influence the concentrations of solids in the outflow. It has been also found that the lower limit of particle size liable to enrichment in the hydrocyclone varies in the range of 0,18–0,063 mm.

### WPROWADZENIE

Na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego wieku w Polsce do wzbogacania mialów węglowych zaczęto stosować hydrocyklony *water only* (HWO). Urządzenia te przyjęło się utożsamiać ze wzbogacalnikami grawitacyjnymi, w których rozdział ziarn nadawczy zachodzi według różnic w ich gęstości, pomimo tego, że proces rozdziału zachodzący w hydrocyklonie niewątpliwie należy do kategorii procesów przepływowych (Sztaba 2000), w których za kryterium rozdziału powszechnie przyjmuje się prędkość opadania ziarn. W Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG (obecnie: Instytut Techniki

---

\* Główny Instytut Górnictwa

Górnictwej KOMAG) opracowano typoszereg hydrocyklonów *water only* o średnicach 300, 225 i 150 mm. W literaturze (Jachna 1993; Błaszczyński, Olas, Świerkot-Kopała 1977; Suresh, Vannangamundi, Rao 1990; Określenie parametrów... 1995; Błaszczyński 1972) można znaleźć informacje dotyczące wzbogacania w hydrocyklonach „HWO” i ich doboru, zgodnie z którymi, na przykład:

- średnica hydrocyklonu powinna być większa 10–20 razy od maksymalnej wielkości ziarn nadawy,
- średnica końcówki wylawowej powinna być co najmniej 3 razy większa od maksymalnej wielkości ziarn,
- stosunek wymiarów największych ziarn do najmniejszych aby osiągnąć tak samo skuteczny rozdział wszystkich ziarn nadawy, powinien być mniejszy od 10,
- podstawowymi parametrami wpływającymi na przyjmowaną za kryterium rozdziału gęstość ziarn, są: średnica dyszy przelewowej i głębokość jej zanurzenia oraz średnica dyszy wylawowej,
- ciśnienie zasilania hydrocyklonu ma ograniczony wpływ na wyniki rozdziału, a jego zwiększenie powoduje przede wszystkim wzrost wydajności układu; raczej nie zaleca się stosowania wysokiego ciśnienia zasilania, gdyż przyrost przepustowości hydrocyklonów od pewnej wartości ciśnienia nadawy jest mały, a wyraźnie wzrasta abrazyjny wpływ ziarn nadawy na ściany urządzenia.

Z danych zawartych w przywołanych wcześniej publikacjach (Jachna 1993; Błaszczyński, Olas, Świerkot-Kopała 1977; Suresh, Vannangamundi, Rao 1990; Określenie parametrów... 1995; Błaszczyński 1972) wynika, że kryterium rozdziału, za które przyjmuje się gęstość ziarn, w hydrocyklonie maleje wraz z:

- wzrostem średnicy dyszy wylawowej,
- zmniejszeniem średnicy dyszy przelewowej,
- zmniejszeniem zanurzenia dyszy przelewowej.

W jednostopniowym procesie wzbogacania nie można także uzyskać jednocześnie dostatecznie „czystego” koncentratu i odpadów o dużej zawartości popiołu, co stwarza konieczność stosowania dwustopniowych układów wzbogacania (Jachna 1993; Nowak 1970). W drugim stopniu wzbogacania, rozdziałowi poddaje się najczęściej frakcję ciężką z pierwszego stopnia wzbogacania. Ponadto, konieczne jest wydzielanie niewzbogaconych ziarn mułowych z przelewu, co jednak w praktyce nie stanowi problemu. Ziarna mułowe są wydzielane w procesie odwadniania przelewu. W literaturze brak jest informacji dotyczących wpływu podstawowych parametrów technicznych hydrocyklonu, tj. średnic końcówek przelewowej i wylawowej oraz głębokości zanurzenia końcówki przelewowej na wyniki rozdziału jakościowego, tj. zawartość popiołu i koncentrację części stałych w produktach rozdziału. Wyniki wzbogacania otrzymywane w praktyce najczęściej odbiegają od wcześniejszych prognoz, wykonanych na podstawie znanego składu gęstościowego nadawy (Określenie parametrów... 1995). Ponadto, rozdział/wzbogacanie w hydrocyklonie zachodzi według zasad klasyfikacji hydraulicznej, zgodnie z którymi decydujące znaczenie ma zarówno rozkład wielkości ziarn, jak i rozkład ich gęstości w populacji wzbogacanego materiału oraz inne parametry, jak na przykład lepkość ośrodka. Jest to prawdopodobnie podstawowa

przyczyna różnicy między rzeczywistymi wynikami wzbogacania a wynikami prognoz, opracowanymi na podstawie analiz gęstościowych nadawy. W literaturze brak jest jednak prób uwzględnienia tego faktu w analizie, opisie i ocenie pracy hydrocyklonów.

W związku z powyższym, podjęto badania w celu statystycznej oceny prawidłowości wnioskowania o wpływie zmian podstawowych parametrów technicznych hydrocyklonu na wyniki rozdziału. Przeprowadzono sześć doświadczeń z zastosowaniem tej samej nadawy, lecz z różnymi średnicami końcówek przelewowych i wylewowych. Uzyskano produkty rozdziału o charakterystykach jakościowych, mieszczących się w szerokich przedziałach wartości, szczególnie w przypadku jednego produktu, tj. wylewu. Szeroki zakres parametrów jakościowych produktów wzbogacania oznacza, że doświadczenia przeprowadzono w bardzo szerokim przedziale wartości kryterium rozdziału, a otrzymane zmiany parametrów jakościowych produktów pozwolą na bardziej kompleksowe wnioskowanie w zakresie techniki i technologii wzbogacania w HWO. Odniesiono się również do dolnej granicy „wzbogacania” ziarn w HWO.

## 1. METODYKA BADAŃ

Charakterystykę ziarnowo-popiołową materiału użytego do badań przedstawiono w tablicy 1. Wynika z niej, że średnia zawartość popiołu w miale wynosiła około 39%. Zawartość popiołu zmniejszyła się z ponad 58% w ziarnach o wymiarach powyżej 2,8 mm do 21,86% w klasie ziarnowej 0,063–0,045 mm. Klasa ziarnowa poniżej 0,025 mm zawierała ponad 43% popiołu. Użyty do badań miał węglowy można określić więc jako materiał bardzo zapopielony. Był on jednak stosunkowo łatwo wzbogacalny, o czym mogą świadczyć wyniki analizy gęstościowo-popiołowej, z której wynika, że badany miał zawierał około 7–10% frakcji przerostowych o gęstości 1,4–2,0 g/cm<sup>3</sup>, natomiast zawartość popiołu we frakcjach poniżej 1,4 g/cm<sup>3</sup> była mniejsza od 3,5%. (tabl. 2).

Tablica 1. Charakterystyka ziarnowo-popiołowa nadawy

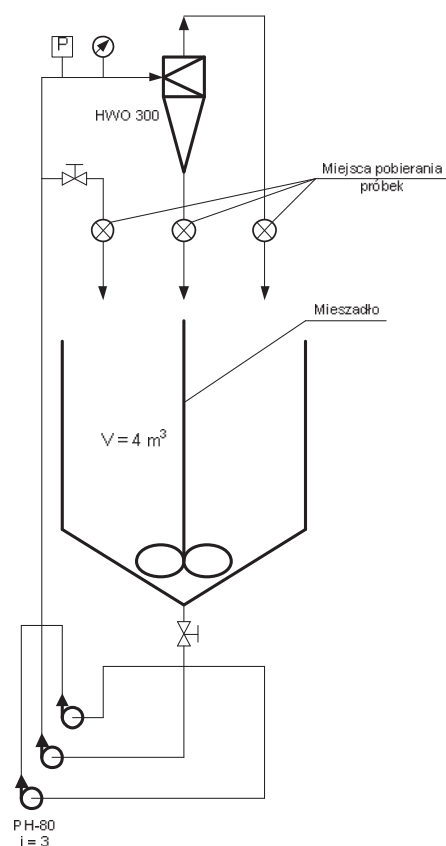
Klasa ziarnowa mm	Wychód $\gamma$ %	Suma wychodu %	Zawartość popiołu $A^a$ , %	Średnia zawartość popiołu $A^{a_{\text{śrd}}}$ , %
+ 2,8	16,3	16,3	58,51	58,51
2,8–2,0	13,9	30,2	49,46	54,35
2,0–1,0	20,5	50,7	39,47	48,33
1–0,71	10,0	60,7	26,08	44,67
0,71–0,5	7,2	67,9	29,32	43,04
0,5–0,315	5,9	73,8	26,79	41,75
0,315–0,25	2,5	76,3	26,60	41,26
0,25–0,18	3,2	79,5	26,06	40,64
0,18–0,1	4,3	83,8	23,02	39,74
0,1–0,063	2,8	86,6	24,03	39,22
0,063–0,045	1,6	88,3	21,86	38,90
0,045–0,025	2,4	90,7	27,14	38,59
–0,025	9,3	100,0	43,23	39,02
Razem	100,0	–	39,02	

Tablica 2. Analiza gęstościowo-popiołowa nadawy

Frakcja gęstościowa g/cm <sup>3</sup>	Klasa ziarnowa +0,5 mm		Klasa ziarnowa 0,5–0,1 mm		Klasa ziarnowa 0,1–0,045 mm	
	wychód $\gamma$ %	zawartość popiołu A <sup>a</sup> %	wychód $\gamma$ %	zawartość popiołu A <sup>a</sup> , %	wychód $\gamma$ %	zawartość popiołu A <sup>a</sup> %
-1,4	46,9	3,22	66,7	2,27	68,6	2,07
1,4–1,6	3,4	22,85	3,3	20,59	5,4	13,32
1,6–2,0	5,2	49,14	4,1	47,78	3,5	47,63
2,0	44,5	85,81	25,8	83,23	22,5	86,29
Razem	100,0	43,04	100,0	25,61	100,0	23,24

Badania wykonano na stanowisku zabudowanym w hali technologicznej Laboratorium Wzbogacania i Utylizacji Kopaliny (rys. 1), które składa się z:

- zbiornika o pojemności 4 m<sup>3</sup> z mieszadłem mechanicznym,
- układu pompowego 3 pomp PH-80A, połączonych równolegle,
- stanowiska montażowego hydrocyklonów z zabudowanym hydrocyklonem HWO-300,
- systemu rurociągów z zabudowanym przepływomierzem i manometrem,
- układu umożliwiającego pobieranie próbek.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Scheme of the test stand

Materiał do badań stanowiła mieszanina ziarn o wielkości 0–4 mm wysiana z miazgi surowego z odpowiednio dobranym dodatkiem ziarn skały płonnej.

Zabudowany na stanowisku badawczym układ pompowy oraz system zasów umożliwił regulację natężenia przepływu nadawy przez hydrocyklon w zakresie do 100 m<sup>3</sup> oraz ciśnienia na wlocie hydrocyklonu od 0,8 do 1,3 MPa. W celu zapewnienia porównywalnych parametrów technologicznych nadawy w całym cyklu badawczym, produkty wzbogacania, tj. wylew i przelew były recyrkulowane do zbiornika nadawy. Podczas prowadzenia badań koncentracja części stałych w zawieszynie wynosiła około 220 g/dm<sup>3</sup>. Po ustaleniu warunków pracy układu, tj. przepływu rzędu 60–65 m<sup>3</sup>/h i ciśnienia równego około 1 MPa przystąpiono do pobierania próbek. Próbki przelewu i wylewu pobierano w tym samym czasie z całego przekroju strumienia produktów.

Po wykonaniu pierwszego doświadczenia zmieniano parametry techniczne hydrocyklonu (zmiana końcówki wylewowej i/lub przelewowej) i po ustabilizowaniu parametrów pracy przystępowano do następnego opróbowania (tabl. 3). Wszystkie analizy i badania wykonywano zgodnie z obowiązującymi normami i procedurami badawczymi stosowanymi w Laboratorium Wzbogacania i Utylizacji Kopaliny, a mianowicie:

- pobieranie próbek – PN-90/G-04502,
- oznaczanie składu ziarnowego – PN-ISO 1953:1999,
- oznaczanie składu gęstościowego – PN-ISO 7936:1999,
- oznaczanie koncentracji części stałych – PN-92/G-04557,
- oznaczanie zawartości popiołu – PN-80/G-04512.

**Tablica 3.** Średnice końcówek hydrocyklonu podczas wykonywania badań

Nr doświadczenia	Średnica końcówki przelewowej, mm	Średnica końcówki wylewowej, mm
1	105	36
2	105	50
3	105	60
4	125	60
5	125	50
6	125	36

## 2. WYNIKI BADAŃ

Wyniki oznaczeń koncentracji części stałych, zawartości popiołu i wyniki obliczeń bilansowych (wychodu masowego i objętościowego produktów wzbogacania) dla poszczególnych doświadczeń przedstawiono w tablicy 4.

**Tablica 4.** Wyniki badań w hydrocyklonie HWO 300

Produkt	Parametr	Numer doświadczenia					
		1	2	3	4	5	6
Przelew	Koncentracja części stałych, g/dm <sup>3</sup>	150	94	82	110	122	158
	Zawartość A <sup>a</sup> , %	22,53	23,55	19,77	17,58	19,28	22,65
	Wychód masowy	65,9	31,6	19,5	51,4	53,2	68,4
	Wychód objętościowy	93,2	85,1	83,5	88,3	90,1	94,2
Wylew	Koncentracja części stałych, g/dm <sup>3</sup>	1180	942	850	1053	1111	1220
	Zawartość A <sup>a</sup> , %	67,96	44,65	42,41	58,23	59,27	71,27
	Wychód masowy	34,1	68,4	80,5	48,6	46,8	31,6
	Wychód objętościowy	6,8	14,9	16,5	11,7	9,9	5,8

Z tablicy wynika, że zawartość popiołu w wylewie, stanowiącym produkt odpadowy, zmieniała się w bardzo szerokich granicach od 42,41 do 71,27%. Zawartość popiołu w przelewie, będącym produktem wzbogaconym, wahała się w przedziale 17,58–23,55%. Wartości te, jak na produkt wzbogacony, były stosunkowo duże, lecz należy pamiętać, że wzbogacanie w hydrocyklonach (HWO), podobnie jak w innych wzbogacalnikach przepływowych, zachodzi tylko do pewnej dolnej wielkości ziarna (Suresh, Vannangamundi, Rao 1990). Wyniki oznaczeń zawartości popiołu w klasach ziarnowych przelewów z poszczególnych doświadczeń zamieszczono w tablicy 5. Porównanie tych wartości z wynikami analizy ziarnowej rozdzielanej nadawy (tabl. 1) prowadzi do wniosku, że charakterystyczny „skok popiołowy” występuje przy wielkości ziarn w przedziale 0,18–0,063 mm. Jest to prawdopodobnie dolna granica wielkości ziarn, które podlegają wzbogacaniu w hydrocyklonie, praktycznie niezależna od parametrów jego pracy. Duża zawartość w przelewie ziarn młotowych o stosunkowo dużej zawartości popiołu, nie jest problemem technologicznym. Ziarna są w większości wydzielane wraz z wodą podczas odwadniania przelewu, a zawartość popiołu w produkcie koncentratowym znacznie maleje (tabl. 5).

Należy nadmienić, że celem doświadczeń nie była optymalizacja warunków pracy hydrocyklonu, ze względu na jakość produktów, lecz osiągnięcie stosunkowo szerokiego zakresu parametrów jakościowych, aby można było przeanalizować wpływ wybranych parametrów technicznych hydrocyklonu na zmianę wyników wzbogacania. Analiza danych zawartych w tablicy 4, jak również wyników analiz ziarnowo-popiołowych przelewów (tabl. 5) świadczą, że cel ten osiągnięto.

**Tablica 5.** Zawartości popiołu w klasach ziarnowych przelewów z poszczególnych doświadczeń

Klasa ziarnowa mm	Numer doświadczenia					
	1	2	3	4	5	6
	zawartości popiołu w klasach ziarnowych A <sup>a</sup> , %					
+ 1,0	31,74	3,97	2,08	3,76	4,66	18,88
1,0–0,71	17,08	3,29	2,06	4,72	4,12	14,20
0,71–0,5	14,86	2,63	2,19	3,70	4,21	9,88
0,5–0,315	12,79	2,86	2,22	4,86	4,72	13,06
0,315–0,25	14,64	3,90	3,29	5,20	6,12	9,44
0,25–0,18	14,52	3,47	3,58	6,51	7,71	10,62
0,18–0,1	17,25	5,83	5,47	9,22	10,68	12,27
0,1–0,063	18,75	9,26	9,30	13,61	16,35	17,09
0,063–0,045	21,35	16,25	20,19	19,25	20,42	22,08
0,045–0,025	25,53	22,52	23,73	38,55	33,07	35,13
–0,025	43,71	50,28	44,83	41,57	42,21	41,03
Razem	22,53	23,55	19,77	17,58	19,28	22,65

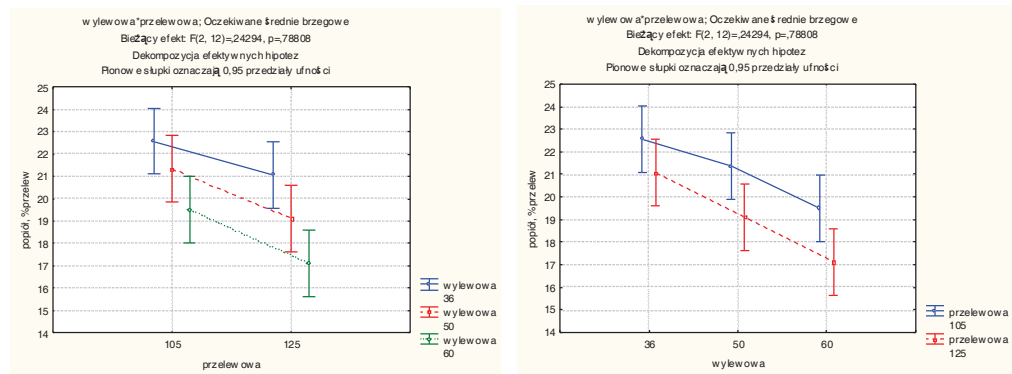
W celu określenia wpływu zmian wybranych parametrów technicznych hydrocyklonu na wyniki wzbogacania, uzyskane dane doświadczalne analizowano metodą wariancji, wykorzystując pakiet STATISTICA PL wersja 8. Metodyka analizy w przypadku każdego parametru technicznego hydrocyklonu (zmienną niezależną) była następująca: postawiono hipotezę zerową ( $H_0$ ), że zmiany parametru technicznego nie wpływają na wyniki wzbogacania, tj. zawartość popiołu lub koncentrację części stałych w przelewie lub wylewie (zmienna zależna), wobec hipotezy alternatywnej,

będącej zaprzeczeniem hipotezy zerowej. Do rozważań przyjęto 95% przedział ufności dla zmiennych oraz założono poziom istotności testów  $\alpha = 0,05$ . Dla każdej kombinacji wpływu czynników wykonano po dwa niezależne doświadczenia, tzn. liczba replikacji wynosiła 2. Sprawdzono również podstawowe założenia dotyczące zmiennych niezależnych, tj. normalność ich rozkładu i jednorodność wariancji. Sprawdzenie normalności rozkładów zmiennych niezależnych ograniczono do sprawdzenia rozkładów reszt testem Shapiro-Wilka. Jednorodność wariancji zmiennych niezależnych sprawdzano testem Levene'a. W przypadkach, gdy test Levene'a był niespełniony, wykonano dodatkowo teoretycznie słabsze testy Hartleya i Cochra. W każdym przypadku przeprowadzono analizę graficzną i wykonano test statystyczny.

### **2.1. Wpływ zmian średnic końcówek hydrocyklonu HWO na zawartość popiołu w przelewie**

Analiza zmian zawartości popiołu w przelewie, przedstawionych w tablicy 4 oraz na rysunku 2, prowadzi do wniosku, że ze zwiększaniem średnicy końcówki przelewowej z 105 do 125 mm, przy stałej średnicy końcówki wylewowej, maleje zawartość popiołu w produkcie przelewowym. Zależność ta była widoczna w przypadku wyników otrzymanych w trzech seriach pomiarowych, w których zastosowano końcówki wylewowe o średnicach 36, 50 i 60 mm. Z analizy zmian zawartości popiołu w przelewie w funkcji średnicy końcówki wylewowej wynika natomiast, że zawartość popiołu w przelewie malała wraz ze wzrostem jej średnicy. Zależność ta była widoczna w obu seriach pomiarowych, w których zastosowano końcówki przelewowe o średnicach 105 i 125 mm. Porównanie danych z wykresów (rys. 2) prowadzi do wniosku, że najmniejszą zawartość popiołu w przelewie 17,58% otrzymano w doświadczeniu 4, w którym zastosowano końcówkę przelewową o największej średnicy 125 mm i końcówkę wylewową o największej średnicy 60 mm. Prawie równoległy przebieg krzywych na rysunku może wskazywać na brak interakcji średnic końcówek lub na jej niewielką wartość. Powyższe spostrzeżenia potwierdził przeprowadzony test statystyczny, którego wyniki przedstawiono w tablicy 6. Obie zmienne, tj. średnica końcówki przelewowej i średnica końcówki wylewowej, wpływały na zawartość popiołu w przelewie, gdyż obliczone wartości parametru  $p$  (tabl. 6) były mniejsze od wartości granicznej równej 0,05. Wobec powyższego należało odrzucić hipotezę  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej, to znaczy, że zawartość popiołu w przelewie zależy od średnicy końcówek. Nie ma natomiast podstaw do odrzucenia hipotezy o braku interakcji między średnicami końcówek. Zmiana zawartości popiołu w przelewie w wyniku zmiany średnicy końcówki przelewowej była porównywalna na badanych 3 poziomach końcówki wylewowej i odwrotnie. Oznacza to, że wpływy zmian średnic obu końcówek były addytywne. Analiza rozkładu normalności reszt testem Shapiro-Wilka i jednorodności wariancji zmiennych niezależnych testem Levene'a wykazały ich spełnienie.





Rys. 2. Wpływ zmian średnicy końcówek na zawartość popiołu w przelewie  
 Fig. 2. Effect of endings diameter changes on ash content in the overflow

Tablica 6. Wyniki analizy wpływu średnicy końcówek na zawartość popiołu w przelewie

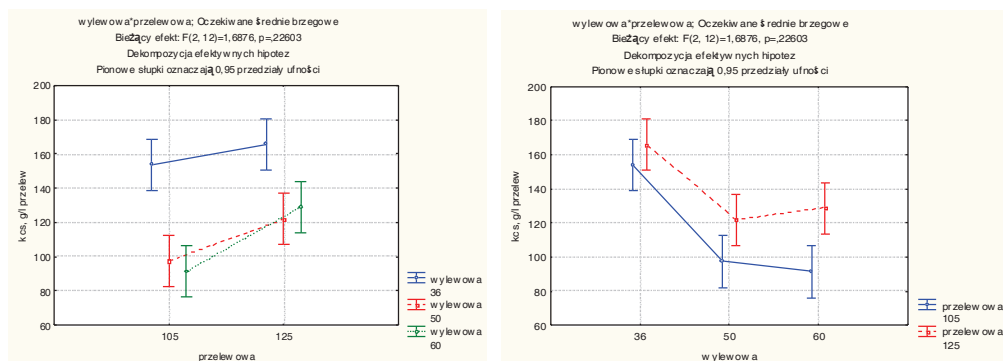
Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla popiołów, %przelew (ANOVA dane) Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	7286,257	1	7286,257	5230,143	0,000000
wylewowa	37,131	2	18,565	13,326	0,000895
przelewowa	18,911	1	18,911	13,575	0,003124
wylewowa*przelewowa	0,677	2	0,338	0,243	0,788082
Błąd	16,718	12	1,393		

## 2.2. Wpływ zmian średnic końcówek hydrocyklonu HWO na koncentrację części stałych w przelewie

Z analizy zmian koncentracji części stałych w przelewie, przedstawionych w tabelicy 4 oraz na rysunku 3, wynika, że ze wzrostem średnicy końcówki przelewowej z 105 do 125 mm, przy stałej średnicy końcówki wylewowej, koncentracja części stałych w produkcie przelewowym zwiększa się. Analiza zmian koncentracji części stałych w przelewie natomiast w funkcji średnicy końcówki wylewowej, przy stałej średnicy końcówki przelewowej, prowadzi do wniosku, że zagęszczenie w przelewie maleje ze wzrostem średnicy końcówki wylewowej. Było to szczególnie widoczne w przypadku zwiększenia średnicy końcówki wylewowej z 36 do 50 mm, w obu seriach pomiarowych. Porównanie danych z wykresów (rys. 3) prowadzi do wniosku, że najmniejszą koncentrację części stałych w przelewie  $82 \text{ g/dm}^3$  otrzymano w doświadczeniu 3 dla średnicy końcówki przelewowej 105 mm i średnicy końcówki wylewowej 60 mm. Prawie równoległy przebieg krzywych na rysunku świadczy, że nie występuje interakcja średnic końcówek lub jest ona niewielka. Powyższe spostrzeżenia potwierdził test statystyczny, którego wyniki przedstawiono w tabelicy 7. Obie zmienne, tj. średnica końcówki przelewowej i wylewowej wpływały na koncentrację części stałych w przelewie, gdyż obliczone wartości  $p$  były mniejsze od wartości granicznej 0,05. Wobec powyższego należało odrzucić  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej, to znaczy, że koncentracja części stałych w przelewie zależała od średnic



końcówek. Podobnie, jak w poprzednim przypadku, należało przyjąć hipotezę o braku interakcji wpływu średnicy końcówki wylewowej i przelewowej na koncentrację części stałych w przelewie. Analiza rozkładu normalności reszt testem Shapiro-Wilka i jednorodności wariancji zmiennych niezależnych testem Levene'a, wykazały ich spełnienie.



Rys. 3. Wpływ zmian średnicy końcówek na koncentrację części stałych w przelewie

Fig. 3. Effect of endings diameter changes on concentration of solids in the overflow

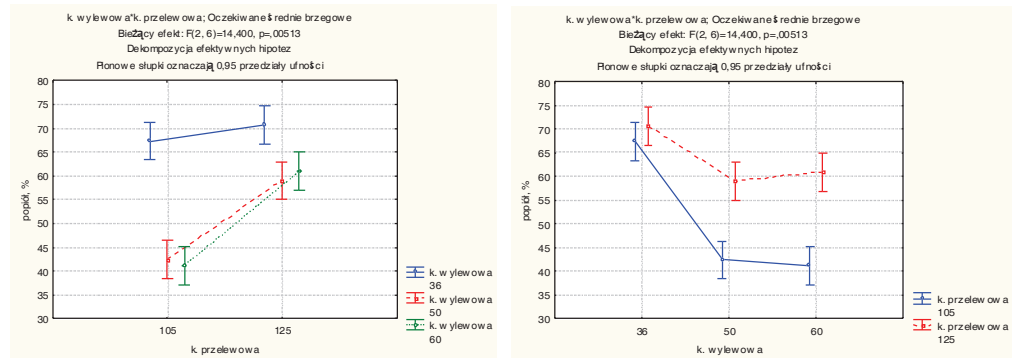
Tablica 7. Wyniki analizy średnicy końcówek na koncentrację części stałych w przelewie

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla kcs, g/l przelew (ANOVA dane) Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	287787,6	1	287787,6	2017,988	0,000000
wylewowa	9933,8	2	4966,9	34,828	0,000010
przelewowa	2738,0	1	2738,0	19,199	0,000894
wylewowa*przelewowa	481,3	2	240,7	1,688	0,226033
Błąd	1711,3	12	142,6		

### 2.3. Wpływ zmian średnic końcówek hydrocyklonu HWO na zawartość popiołu w wylewie

Analiza zmian zawartości popiołu w wylewie, przedstawionych w tablicy 4 oraz na rysunku 4, doprowadziła do wniosku, że ze wzrostem średnicy końcówki przelewowej z 105 do 125 mm, przy stałej średnicy końcówki wylewowej, wzrastała zawartość popiołu w produkcie wylewowym. Było to szczególnie widoczne w przypadku serii pomiarowych, w których średnica końcówki wylewowej wynosiła 50 lub 60 mm. Na podstawie analizy zmian zawartości popiołu w wylewie w funkcji średnicy końcówki wylewowej stwierdzono natomiast, że zawartość popiołu w wylewie malała ze wzrostem średnicy końcówki wylewowej. Było to szczególnie widoczne w przypadku zwiększenia średnicy końcówki wylewowej z 36 do 50 mm. Porównanie danych z wykresów (rys. 4) prowadzi do wniosku, że największą zawartość popiołu w wylewie 71,27%, otrzymano w doświadczeniu 6 dla średnicy końcówki przelewowej 125 mm i średnicy końcówki wylewowej 36 mm. Prawie równoległy przebieg krzywych na rysunku może świadczyć o braku interakcji średnic końcówek lub jej niewielkim charakterze. Powyższe spostrzeżenia częściowo potwierdza test statystyczny.

Z analizy wyników testu, zamieszczonych w tablicy 8, wynika, że obie zmienne wpływały na zawartość popiołu w przelewie, gdyż wartości parametru  $p$  były znacznie mniejsze od wartości granicznej 0,05. Wobec powyższego należało odrzucić  $H_0$  na rzecz hipotezy alternatywnej, to znaczy, że zawartość popiołu w wylewie zależała od średnicy końcówek. Test wykazał interakcję wpływu średnicy końcówki wylewowej i przelewowej na zawartość popiołu w wylewie. Oznacza to, że wpływ średnicy końcówki przelewowej zależał od średnicy końcówki wylewowej i odwrotnie. Z powyższego wynika, że wpływy obu średnic nie były addytywne. Analiza rozkładu normalności reszt testem Shapiro-Wilka wykazała jego spełnienie. Test Levene'a wykazał brak jednorodności wariancji danych wejściowych, co osłabiało moc testu. Wykonane dodatkowo, teoretycznie słabsze testy Hartleya i Cochra na nie dały podstaw do odrzucenia tezy o jednorodności wariancji danych wejściowych.



Rys. 4. Wpływ zmian średnicy końcówek na zawartość popiołu w wylewie

Fig. 4. Effect of endings diameter changes on ash content in the outflow

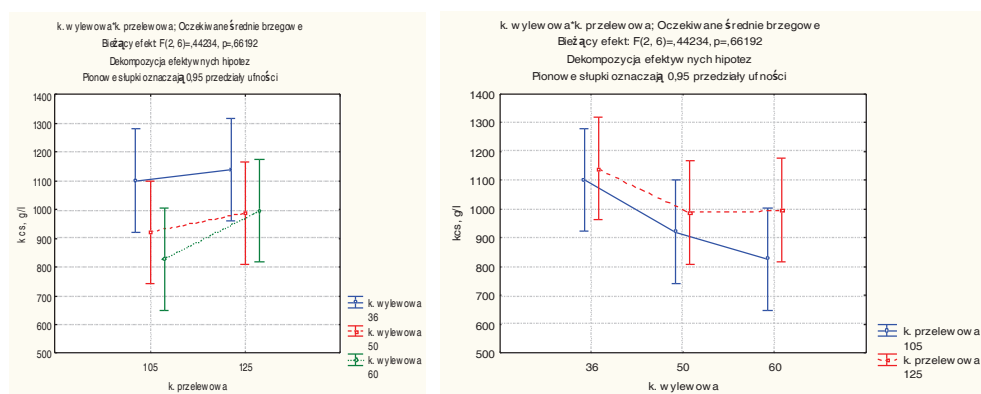
Tablica 8. Wyniki analizy średnicy końcówek na zawartość popiołu w wylewie

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla popiołu, % (ANOVA dane) Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	38894,58	1	38894,58	7374,148	0,000000
k. wylewowa	870,81	2	435,41	82,550	0,000043
k. przelewowa	524,31	1	524,31	99,405	0,000059
k. wylewowa*k. przelewowa	151,91	2	75,95	14,400	0,005125
Błąd	31,65	6	5,27		

#### 2.4. Wpływ zmian średnic końcówek hydrocyklonu HWO na koncentrację części stałych w wylewie

Na podstawie analizy zmian koncentracji części stałych wylewu, przedstawionych w tablicy 4 oraz na rysunku 5, stwierdzono, że ze wzrostem średnicy końcówki przelewowej z 105 do 125 mm wzrasta koncentracja części stałych w produkcie wylewowym. Tendencja taka była widoczna w przypadku wszystkich trzech serii pomiarowych, w których średnica końcówki wylewowej wynosiła 36, 50 lub 60 mm. Z analizy zmian koncentracji części stałych w wylewie w funkcji średnicy końcówki

wylewowej, przy stałej średnicy końcówki przelewowej natomiast wynika, że zagęszczenie w przelewie malało ze wzrostem średnicy końcówki wylewowej. Porównanie danych z wykresów (rys. 5) prowadzi do wniosku, że najmniejszą koncentrację części stałych w przelewie otrzymano w doświadczeniu 3 dla średnicy końcówki przelewowej 105 mm i średnicy końcówki wylewowej 60 mm. Prawie równoległy przebieg krzywych na rysunku może świadczyć, że nie występuje interakcja średnic końcówek lub jest ona niewielka. Powyższych spostrzeżeń nie potwierdził jednak przeprowadzony test statystyczny (tabl. 9), gdyż obliczone wartości parametru  $p$  były większe od wartości i granicznej 0,05. Test statystyczny nie pozwolił na jednoznaczne odrzucenie hipotezy  $H_0$ , że oznaczone koncentracje części stałych w wylewie z poszczególnych doświadczeń są statystycznie równe. Oznacza to, że ze statystycznego punktu widzenia zarówno średnica końcówki wylewowej, jak i przelewowej, praktycznie nie wpływały na koncentrację części stałych wylewu. Test potwierdził również brak interakcji wpływu średnic obu końcówek na koncentrację części stałych wylewu. Analiza rozkładu normalności reszt testem Shapiro-Wilka wykazała jego spełnienie. Test Levene'a wykazał natomiast brak jednorodności wariancji danych wejściowych, co osłabiło moc testu. Wykonane dodatkowo, teoretycznie słabsze testy Hartleya i Cochraha nie dały podstaw do odrzucenia tezy o jednorodności wariancji danych wejściowych.



Rys. 5. Wpływ zmian średnicy końcówek na koncentrację części stałych w wylewie

Fig. 5. Effects of endings diameter changes on concentration of solids in the outflow

Tablica 9. Wyniki analizy średnicy końcówek na koncentrację części stałych w wylewie

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla kcs, g/l (ANOVA dane) Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	11890252	1	11890252	1114,285	0,000000
k. wylewowa	97616	2	48808	4,574	0,062142
k. przelewowa	25300	1	25300	2,371	0,174537
k. wylewowa*k. przelewowa	9440	2	4720	0,442	0,661916
Błąd	64024	6	10671		

**PODSUMOWANIE – WNIOSKI**

Wyniki przeprowadzonych badań z zakresu wzbogacania mialu z wykorzystaniem hydrocyklonu (HWO 300) oraz wykonane testy statystyczne dla wyników wzbogacania w funkcji wybranych parametrów konstrukcyjnych hydrocyklonu, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

1. Dolna granica wielkości ziarn podlegających wzbogacaniu w HWO, waha się w przedziale 0,18–0,063 mm. Wartości te uzyskano w szerokim zakresie wartości parametrów jakościowych wylewu i przelewu, co oznacza że granica ta praktycznie nie zależy od parametrów technicznych pracy hydrocyklonu.
2. Wielkości średnic końcówek przelewowej i wylewowej wpływają na zawartość popiołu w przelewie. Wraz ze wzrostem średnic końcówek przelewowej i wylewowej zawartość popiołu w przelewie maleje. Test statystyczny wykazał brak interakcji średnic obu końcówek, co oznacza, że wpływ końcówek jest addytywny.
3. Wielkości średnic końcówek przelewowych i wylewowych wpływają na zawartość popiołu w wylewie. Wpływ ten nie jest addytywny, to znaczy, że wielkość wpływu średnicy końcówki wylewowej zależy od średnicy końcówki przelewowej i odwrotnie. Wraz ze wzrostem średnicy końcówki przelewowej zawartość popiołu w wylewie wzrasta. Wraz ze wzrostem średnicy końcówki wylewowej zawartość popiołu w wylewie maleje. Jest to szczególnie widoczne przy zwiększeniu średnicy końcówki wylewowej z 36 do 50 mm.
4. Wielkości średnic końcówek przelewowej i wylewowej wpływają na koncentrację części stałych w przelewie. Podobnie, jak w przypadku popiołu, test nie wykazał interakcji wpływu średnicy końcówki wylewowej i przelewowej na koncentrację części stałych w przelewie. Zwiększenie średnicy końcówki przelewowej powoduje wzrost koncentracji części stałych w przelewie. Zagęszczenie przelewu maleje wraz ze zwiększaniem średnicy końcówki wylewowej. Jest to szczególnie widoczne przy zmniejszeniu średnicy końcówki wylewowej z 36 do 50 mm.
5. Z analizy statystycznej wynika, że wielkości średnic końcówek przelewowej i wylewowej praktycznie nie wpływają na koncentrację części stałych w wylewie.

**Literatura**

1. Błaszczński S. (1972): Badania nad wzbogacaniem mułów węglowych w hydrocyklonach z potrójnym kątem zbieżności stożka. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 48.
2. Błaszczński S., Ołás A., Świerkot-Kopała A. (1977): Odsiarczanie węgla w hydrocyklonie. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo z. 86, s. 21–27.
3. Jachna W. (1993): Hydrocyklony wzbogacające i klasyfikująco-zagęszczające Komag i Separko. XXV Konferencja naukowo-techniczna przeróbki kopalni i surowców mineralnych, Kraków, AGH, s. 59–70.
4. Nowak Z. (1970): Hydrocyklony w przeróbce mechanicznej kopalni. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
5. Określenie parametrów konstrukcyjnych i technologicznych cyklonów HWO dla uzyskania niskopopiołowych koncentratów węglowych. Praca GIG. Katowice 1995 (niepublikowana).
6. Suresh N., Vannangamundi N., Rao T.C. (1990): „Water-Only” Cyclones. Mining Magazine 4, s. 266–268.
7. Sztaba K. (2000): Inżynieria mineralna. Inżynieria Mineralna nr 1, s. 3–14.

**Recenzent:** dr Leokadia Róg