

Marek LENARTOWICZ  
Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice  
Jerzy SABLIK  
Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## ROZKŁAD NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO ZWILŻANIA ZIAREN WĘGLOWYCH W PRODUKTACH WZBOGACANIA MASZyny FLOTACYJNEJ TYPU IZ

**Streszczenie.** Badano napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren węglowych flotujących w wybranych przestrzeniach wirnikowych wzbogalnika flotacyjnego typu IZ. Do wyznaczenia wartości napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren węglowych wykorzystano metodę frakcjonowanej flotacji powierzchniowej (film flotation). Potwierdzono, że występuje ścisła zależność między aktywnością flotacyjną a krytycznym napięciem powierzchniowym zwilżania węgla, także kiedy proces flotacji prowadzony jest w dużych wzbogalnikach przemysłowych. Zastosowanie metody FFP i analiza wyników rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania umożliwia ocenę sprawności technologicznej wzbogalnika.

## THE DISTRIBUTION OF SURFACE TENSION OF WETTING OF COAL PARTICLES IN WASHING PRODUCTS OF IZ TYPE FLOTATION MACHINE

**Summary.** Surface tension of wetting of coal particles flotating in successive rotor spaces of an IZ type flotation machine has been investigated. The film flotation method has been used in order to appoint the values of surface tension of wetting of coal particles. The dependence between surface tension of wetting of coal particles and flotation response of coal has been confirmed also for the flotation process conducted in industrial flotation machines. This allows to apply the film flotation as a method for evaluation the work performance of flotation machines.

## 1. Wstęp

Flotacja jest jednym z podstawowych procesów wzbogacania bardzo drobnych ziaren węglowych. Proces flotacji wykorzystuje różnice we właściwościach powierzchniowych ziaren węglowych i części płonnych, a w głównej mierze różnice w hydrofobowości, której miarą może być napięcie powierzchniowe zwilżania.

W górnictwie węgla kamiennego wzbogacanie bardzo drobnych ziaren prowadzi się między innymi w korytowych wzbogacalnikach mechaniczno-pneumatycznych typu IZ stosowanych najliczniej w zakładach wzbogacania węgla w Polsce. Doskonalenie pracy tych maszyn wymaga znajomości przebiegu procesu wzbogacania wzdłuż całej maszyny.

Opracowana w latach osiemdziesiątych XX w. przez Fuerstenaua i współpracowników [Fuerstenau i in. 1991; Diao, Fuerstenau 1991] metoda frakcjonowanej flotacji powierzchniowej (FFP) umożliwia wyznaczenie wartości napięcia powierzchniowego zwilżania niskoenergetycznych ciał stałych, a także ilościowy opis tego zjawiska.

We wcześniejszych pracach wykazano ścisły związek między aktywnością flotacyjną węgla a wartościami jego krytycznego napięcia powierzchniowego zwilżania [Sablik, Wierzchowski 1992, 1994; Sablik 1997]. W pracy Lenartowicza i Sablika [2001] wykazano, że występuje zależność między aktywnością flotacyjną węgla oznaczoną metodą Della a napięciem powierzchniowym zwilżania wyznaczonym metodą FFP. Zmniejszającej się aktywności flotacyjnej węgla towarzyszy wzrost napięcia powierzchniowego zwilżania. Warunkiem aktywności flotacyjnej węgla jest większa od zera wartość granicznego kąta zwilżania jego powierzchni. W pracy Sablika [2003] wykazano, że kąt graniczny zwilżania powierzchni węgla osiąga wartość zero, kiedy napięcie powierzchniowe zwilżania osiąga wartość  $\gamma_{c(\theta=0)} = 57,87 \text{ mJ/m}^2$ .

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badania napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren węglowych flotujących w przestrzeniach wirnikowych 1, 3 oraz 6 wzbogacalnika flotacyjnego typu IZ [Sablik 1998]. Analizowano z tego punktu widzenia także powstające w tym procesie odpady.

## 2. Charakterystyka materiału użytego do badań

Próbki do badań w postaci zawiesin nadawy i produktów wzbogacania pobrano w czasie pracy flotownika typu IZ. Skróconą charakterystykę wzbogacanego węgla przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Charakterystyka węgla użytego do badań

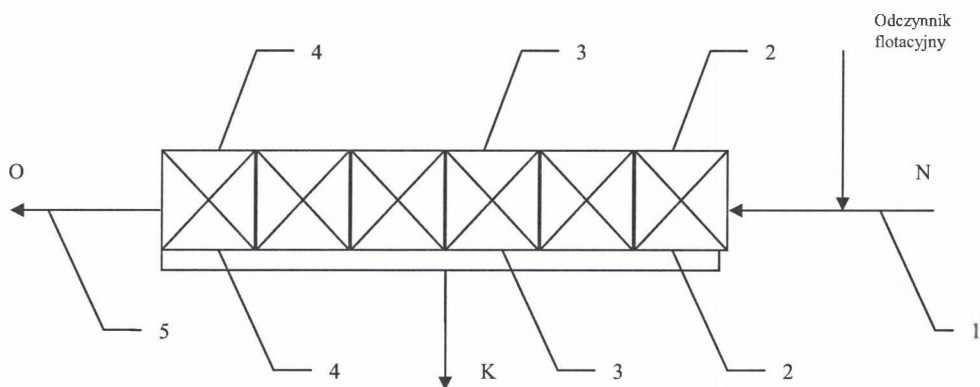
Rodzaj węgla	Typ węgla	Zawartość popiołu, $A^a$ [%]	Zawartość węgla, $C^{daf}$ [%]	Zawartość popiołu w nadawie, [%]
Węgiel energetyczny	32	8,87	80,5	33,87

Badano węgiel energetyczny o zawartości popiołu 8,87% i zawartości węgla pierwiastkowego  $C^{daf}$  równej 80,5%. Zawiesina węglowa stanowiąca nadawę do maszyny flotacyjnej zawierała 33,87% popiołu.

## 3. Metodyka badań

Wstępnym etapem badań było opróbowanie pracującej w warunkach przemysłowych maszyny flotacyjnej typu IZ. Schemat maszyny z zaznaczeniem miejsc pobrania próbek przedstawiono na rys. 1.

W wyniku opróbowania maszyny uzyskano jedną próbkę nadawy, trzy próbki koncentratu flotującego w wytypowanych przestrzeniach wirnikowych wzbogacalnika oraz jedną próbkę odpadów.



Rys.1. Schemat opróbowania flotownika IZ

Fig.1. The scheme of sampling places in IZ type flotation machine

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Miejsce pobrania nadawy          | 1. Place of feed sampling            |
| 2. Miejsce pobrania koncentratu I   | 2. Place of concentrate I sampling   |
| 3. Miejsce pobrania koncentratu II  | 3. Place of concentrate II sampling  |
| 4. Miejsce pobrania koncentratu III | 4. Place of concentrate III sampling |
| 5. Miejsce pobrania odpadów         | 5. Place of tailings sampling        |

Pobrane próbki odwadniają, suszą w temperaturze otoczenia, a następnie wysiewano z nich klasy ziarnowe 0,2 – 0,3 mm, z których przygotowywano naważki do badań metodą frakcjonowanej flotacji powierzchniowej (film flotation).

Ziarna o wymiarach 0,2 – 0,3 mm wydzielone z poszczególnych produktów opróbowania rozdzielano następnie metodą FFP [Fuerstenau i in. 1991; Diaó, Fuerstenau 1991]. Rozdział ww. ziaren prowadzono na powierzchni roztworów metanol – woda o napięciach powierzchniowych od 22 do 72,8 mJ/m<sup>2</sup> oraz 2–molowego i 5–molowego roztworu NaCl o napięciach powierzchniowych odpowiednio 76 mJ/m<sup>2</sup> i 81 mJ/m<sup>2</sup>. Masa próbki poddawanej rozdziałowi wynosiła 0,2 g. Każdy pomiar powtarzano trzykrotnie, a wyniki zestawione w tabeli i na rysunku są średnią arytmetyczną tych pomiarów. Następnie obliczano wartości średniego krytycznego napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren węgla oraz odchylenie standardowe od wartości średniej, będące miarą niejednorodności energetycznej powierzchni ziaren, według równań [Diaó, Fuerstenau 1991]:

$$\bar{\gamma} = \int_{\gamma_{c \min}}^{\gamma_{c \max}} \gamma_c f(\gamma_c) d\gamma_c \quad (1)$$

$$\sigma_{\gamma_c} = \sqrt{\int_{\gamma_{c \min}}^{\gamma_{c \max}} (\gamma_c - \bar{\gamma})^2 f(\gamma_c) d\gamma_c} \quad (2)$$

gdzie:

- $\gamma_c$  - napięcie powierzchniowe zwilżania,
- $\gamma_{c \min}$  - napięcie powierzchniowe roztworu zwilżającego wszystkie ziarna,
- $\gamma_{c \max}$  - napięcie powierzchniowe roztworu nie zwilżającego żadnych ziaren,
- $\bar{\gamma}_c$  - średnie krytyczne napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren,
- $f(\gamma_c)$  - funkcja gęstości (histogram) napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren,
- $\sigma_{\gamma_c}$  - niejednorodność energetyczna w zbiorze ziaren.

Wyznaczono również udział ziaren hydrofilowych, których powierzchnie mają napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren  $\gamma_c$  równe lub większe od napięcia powierzchniowego zerowego kąta zwilżania  $\gamma_{c(\theta=0)} = 57,87 \text{ mJ/m}^2$  [Sablik 2003, Sablik i Wierzchowski 2004] w poszczególnych produktach wzbogacania.

#### 4. Wyniki badań i ich omówienie

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń napięcia powierzchniowego zwilżania (1) i niejednorodności energetycznej powierzchni ziaren (2) oraz zawartości popiołu  $A^a$  i udział ziaren hydrofilowych w poszczególnych produktach, na rys. 2 przedstawiono krzywe rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren węgla z ww. produktów.

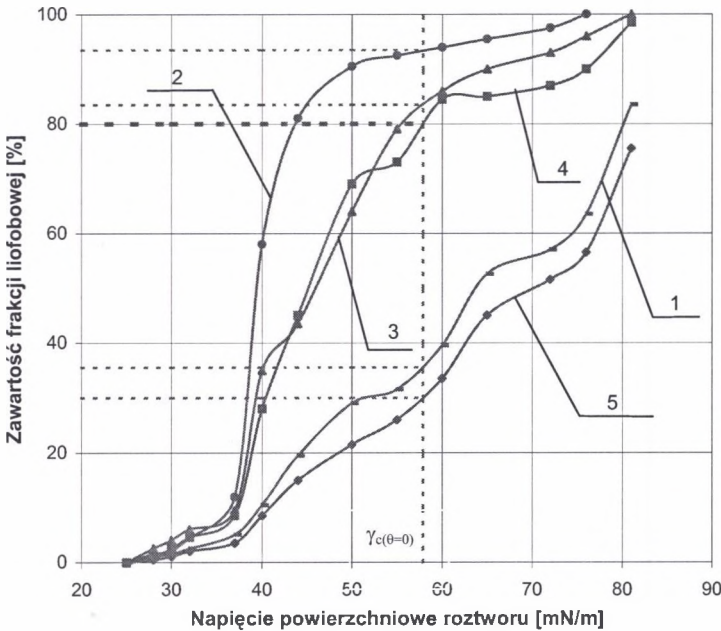
W przypadku nadawy zawierającej 33,87% popiołu napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren obliczono po ekstrapolacji wykresu krzywej (1, rys.2); przyjmuje ono wartości od 25 do 86  $\text{mJ/m}^2$ . Średnie napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren wynosi 62,40  $\text{mJ/m}^2$ , niejednorodność energetyczna 17,37  $\text{mJ/m}^2$ . Udział ziaren hydrofilowych ( $\gamma_{c(\theta=0)} = 57,87 \text{ mJ/m}^2$ ) wynosi ok. 65%.

Tabela 2

Napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren węglowych oraz zawartość popiołu i udział ziaren hydrofilowych w produktach uzyskanych w maszynie flotacyjnej IZ

Materiał	Napięcie powierzchniowe zwilżania [mJ/m <sup>2</sup> ]			Niejednorodność energetyczna powierzchni ziaren $\sigma_{\gamma_c}$ [mJ/m <sup>2</sup> ]	Popiół A <sup>a</sup> [%]	Udział ziaren $\gamma_{c(\theta=0)}$ , %
	minim. $\gamma_{c \min}$	śred. $\overline{\gamma_c}$	max. $\gamma_{c \max}$			
Nadawa	25	62,40	86*	17,37	33,87	ok. 65
Koncentrat I	25	42,42	76	9,21	4,89	ok. 6,5
Koncentrat II	25	47,26	81	12,03	12,43	ok. 16,5
Koncentrat III	25	49,50	82*	13,68	16,04	ok. 20
Odpady	25	65,58	88*	17,87	52,28	ok. 70

\* Wielkości uzyskano ekstrapolując graficznie krzywe 1, 4 i 5 (rys. 2).



Rys. 2. Krzywe rozkładów napięcia powierzchniowego zwilżania węgla w produktach uzyskanych w maszynie flotacyjnej IZ: 1 – nadawa, 2 – koncentrat I, 3 – koncentrat II, 4 – koncentrat III, 5 – odpady

Fig. 2. Distributions for surface tension of wetting distribution for product obtained in IZ type flotation machine: 1 – feed, 2 – concentrate I, 3 – concentrate II, 4 – concentrate III, 5 – tailings

W przypadku ziaren koncentratu I, gdzie zawartość popiołu wynosi 4,89%, napięcie powierzchniowe zwilżania przyjmuje wartości od 25 do 76 mJ/m<sup>2</sup>, a wartość średniego



$\overline{\gamma_c}$  wynosi 42,42 mJ/m<sup>2</sup>. Niejednorodność energetyczna powierzchni ziaren wynosi 9,21 mJ/m<sup>2</sup>, a udział ziaren hydrofilowych wynosi ok. 6,5%. W pierwszym przedziale wimikowym flotuje zatem czysty węgiel, a do koncentratu przedostaje się także niewielka ilość ziaren hydrofilowych, prawdopodobnie na zasadzie wynoszenia mechanicznego. W koncentracie II (zawartość popiołu 16,02 %), napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren przyjmuje wartości od 25 do 81 mJ/m<sup>2</sup>, a  $\overline{\gamma_c}$  wynosi 47,26 mJ/m<sup>2</sup>, zaś  $\sigma_{\gamma_c}$  jest równe 12,03 mJ/m<sup>2</sup>. Udział ziaren hydrofilowych  $\gamma_{c(\theta=0)} \geq 57,87$  mJ/m<sup>2</sup> wynosi już ok. 16,5 %. Dla ziaren koncentratu III i odpadów zawierających odpowiednio 18,22 % i 52,87 % popiołu, napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren obliczono po ekstrapolacji wykresów krzywych (4 i 5, rys.2). Dla koncentratu III wartości te wynoszą od 25 do 82 mJ/m<sup>2</sup>, a dla odpadów od 25 do 88 mJ/m<sup>2</sup>. Średnie napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren wynosi odpowiednio 49,50 i 65,58 mJ/m<sup>2</sup>, a niejednorodność energetyczna  $\sigma_{\gamma_c}$  13,68 i 17,87 mJ/m<sup>2</sup>. Udział ziaren o napięciu powierzchniowym zwilżania powyżej 57,87 mJ/m<sup>2</sup> wynosi w koncentracie III ok. 20 %, a w odpadach już ok. 70%. Różnica między wartościami średniego napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren koncentratu I a ziaren odpadów wynosi 23,16 mJ/m<sup>2</sup>, natomiast między wartościami  $\sigma_{\gamma_c}$  8,86 mJ/m<sup>2</sup>.

Ziarna flotujące w pierwszej kolejności charakteryzują się najniższym średnim napięciem powierzchniowym zwilżania i najmniejszą niejednorodnością energetyczną  $\sigma_{\gamma_c}$  natomiast ziarna, które flotują w dalszych badanych przestrzeniach wimikowych wzbogacalnika, zawierają coraz więcej popiołu i charakteryzują się wyższymi wartościami  $\overline{\gamma_c}$  i  $\sigma_{\gamma_c}$ , co jest równoznaczne ze zmniejszeniem się hydrofobowości i aktywności flotacyjnej tych ziaren. Do odpadów przechodzi około 30% ziaren, których powierzchnie są hydrofobowe, a równocześnie zawartość popiołu w tym produkcie jest mała (52,87%). Dowodzi to, że proces flotacji w badanym wzbogacalniku nie jest wystarczająco efektywny, co prowadzi do zmniejszenia uzysku substancji palnej.

Wyniki uzyskanych badań rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren węglowych w produktach wzbogacania przemysłowej maszyny flotacyjnej typu IZ potwierdziły, że podobnie jak w przypadku badania aktywności flotacyjnej metodą Della we wzbogacalniku laboratoryjnym [Lenartowicz, Sablik 2001] metoda FFP może być stosowana do oceny technologicznej flotownika przemysłowego.

## 5. Wnioski

Omówione wyżej wyniki badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badanie rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren dowodzi, że w kolejnych produktach uzyskiwanych z maszyny flotacyjnej IZ hydrofobowość powierzchni ziaren jest coraz mniejsza.
2. W przebadanych przedziałach wirnikowych maszyny do koncentratu przechodzą obok ziaren hydrofobowych także hydrofilowe, prawdopodobnie wynoszone mechanicznie; celowe by było określenie, jak ziarna te wpływają na jakość koncentratu węglowego.
3. Do odpadów przedostaje się około 30% ziaren o powierzchniach hydrofobowych, co prawdopodobnie powoduje stosunkowo małą (52,87%) zawartość popiołu w tym produkcie; może to być powodowane niedostatecznym kontaktem tych ziaren z odczynnikiem zbierającym w procesie technologicznym we wzbogacalniku.
4. Analiza rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania węgla w produktach flotacji uzyskanych w przemysłowym wzbogacalniku typu IZ może być wykorzystana do oceny sprawności pracy tej maszyny.

## LITERATURA

1. Diao I., Fuerstenau D.W., 1991: Characterisation of the wettability of solid particles by film flotation, Part II: Theoretical analysis. *Colloids and Surfaces*, 60, 145-160.
2. Fuerstenau D.W., Diao I., Williams M.C., 1991: Characterisation of the wettability of solid particles by film flotation, Part I: Experimental investigation. *Colloids and Surfaces*, 60, 127 – 144.
3. Lenartowicz M., Sablik J., 2001: Napięcie powierzchniowe zwilżania ziarn węglowych z frakcji wydzielonych w procesie flotacji metodą Della, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 17, 143 – 151.
4. Sablik J., 1997: Flotowalność mułów węglowych jako funkcja krytycznej energii powierzchniowej zwilżania, *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 31, 235 – 240.
5. Sablik J., 1998: *Flotacja węgla kamiennych*, Wyd. GIG, Katowice.



6. Sablik J., 2003: Zależność między granicznym kątem zwilżania a średnim krytycznym napięciem powierzchniowym zwilżania węgla o różnym stopniu zmetamorfizowania. Inżynieria Mineralna, nr 2(7).
7. Sablik J., Wierzchowski K., 1992: Evaluation of the influence of flotation reagents on the hydrophobicity of coal using the film flotation method, Fuel, 71, 4, 474 – 475.
8. Sablik J., Wierzchowski K., 1994: The effect of pre – wetting with flotation reagents on the surface energy of coals, Coal Preparation, vol. 15, 25 – 34.
9. Sablik J., Wierzchowski K., 2004: Wpływ odczynników technologicznych na wartości granicznych kątów zwilżania węgla w zbiorze ziarn mułowych, Górnictwo i Geoinżynieria, Wyd. Specjalne, AGH, Kraków.
10. Wierzchowski K., 1993: Praca doktorska, GIG, Katowice.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Ślącza  
Profesor Politechniki Śląskiej

## Abstract

Surface tension of wetting of coal particles flotating in successive rotor spaces of an IZ type flotation machine has been investigated. The film flotation method has been used in order to appoint the values of surface tension of wetting of coal particles. It has been found that the growths of the ash content in successive washing product (4,86; 12,43; 16,04; 52,28 %) go together with the growths of values of the mean critical surface tension of wetting of coal particles (42,42; 47,26; 49,50; 65,58 mJ/m<sup>2</sup>). What is more, the share of hydrophilic particles in these products increases as well (6,5, 16,5, 20, 70%).

The particles flotating in the first order possess lower value of the mean critical surface tension of wetting and lower energetic nonhomogeneity of coal particles. Moreover, particles flotating in other rotor spaces of the IZ type flotation machine include more and more ash content and the particles hold higher value of surface tension of wetting and energetic nonhomogeneity, which leads to a decrease of their hydrophobicity and flotation response. To sum up, the dependence between surface tension of wetting of coal particles and flotation response of coal has been confirmed also for the flotation process conducted in industrial flotation machines. This allows to apply the film flotation as a method for evaluation the work performance of flotation machines.