

Wojciech BABCZYŃSKI, Marcin POPCZYK

## WPLYW ZASOLONYCH WÓD DOŁOWYCH NA PODSTAWOWE PARAMETRY GRAWITACYJNEGO TRANSPORTU MIESZANIN POPIOŁOWO-WODNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczące wpływu zasolenia wód dołowych stosowanych do wytwarzania podsadzki samozestalającej na podstawowe parametry grawitacyjnego transportu mieszanin podsadzki samozestalającej. Przeanalizowano również możliwość stosowania teoretycznych wzorów znanych z literatury na obliczanie parametrów przepływu w zakresie ruchu laminarnego na podstawie znajomości krzywej płynięcia mieszanin.

## THE INFLUENCE OF SALINE MINE WATERS ON THE GENERAL PARAMETERS OF GRAVITATIONAL TRANSPORTATION OF SLURRIES

**Summary.** The paper present results of laboratory tests concerned the influence of salinity of mine water that is used for preparation of stabilized backfill on the general parameters of their gravitational flow. The usefulness of theoretical equations for derivation of flow parameters from flow curves, known well from the literature related to laminar flow has been also examined.

### 1. Wstęp

W trakcie sporządzania podsadzki samozestalającej ilość wody w mieszaninie podsadzkowej powinna być taka, aby z jednej strony mieszanina charakteryzowała się dobrymi własnościami transportowymi, w instalacji grawitacyjnej, a z drugiej - aby proces zestalania mieszaniny odbywał się bez oddawania wody. Wynika z tego, że mieszanina popiołowo-wodna powinna posiadać maksymalne zagęszczenie, na jakie pozwala hydrotransport grawitacyjny [1],[2].

W strefie laminarnego przepływu parametry reologiczne mieszaniny oraz jednostkowe opory przepływu można określić korzystając z krzywej płynięcia wyznaczonej na podstawie pomiarów w wiskozymetrze rotacyjnym lub kapilarnym [5],[6] oraz przyjmując odpowiedni model reologiczny.

Parametry hydraulicznego transportu mieszanin zagęszczonych w strefie przepływu turbulentnego można wyznaczyć korzystając z pomiarów jednostkowych oporów przepływu w funkcji prędkości.

## 2. Podstawy teoretyczne przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych w rurociągach

Podstawowym problemem przy określaniu parametrów hydraulicznego transportu mieszanin drobnofrakcyjnych jest prawidłowe wyznaczenie jednostkowych oporów przepływu. Warunkiem prawidłowego określenia jednostkowych strat energetycznych przepływu cieczy ni-newtonowskich, do których należy zaliczyć mieszaniny popiołowo-wodne o dużym zagęszczeniu, jest znajomość parametrów reologicznych.

Parametry reologiczne można określić wyznaczając krzywą płynięcia w strefie laminarnego przepływu i dobierając odpowiedni model reologiczny [4].

Do opisu parametrów płynięcia mieszanin drobnofrakcyjnych najczęściej są stosowane następujące modele reologiczne:

- model Bingham'a

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{dv}{dy}$$

- model Cassona

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_c \frac{dv}{dy}}$$

- model Ostwalda - de Waele'a

$$\tau = k \left( \frac{dv}{dy} \right)^n$$

- model Herschela - Bulkleya

$$\tau = \tau_y + K \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n$$

gdzie:  $\tau$  - naprężenie styczne, Pa

$\tau_0, \tau_y$  - granica płynięcia, Pa,

$\eta, \eta_c$  - współczynnik lepkości, Pa s,

$dv/dy$  - prędkość ścinania,  $s^{-1}$ ,

$k, K$  - współczynnik konsystencji,  $Pa \cdot s^n$

$n$  - parametr modelu.

Model Ostwalda - de Waele'a nie posiada granicy płynięcia, w przeciwieństwie do pozostałych modeli.

Krzywe płynięcia mieszanin drobnofrakcyjnych wyznacza się korzystając z pomiarów naprężeń stycznych w możliwie szerokim zakresie prędkości ścinania w wiskozymetrach kapilarnych lub rotacyjnych. Znając przebieg krzywej płynięcia oraz dobierając model reologiczny można wyznaczyć parametry reologiczne i jednostkowe opory przepływu mieszaniny w strefie przepływu laminarnego.

W strefie przepływu burzliwego, gdzie część energii mieszaniny jest rozpraszana na chaotyczne ruchy cząstek stałych i wody, parametry przepływu, w tym i jednostkowe opory przepływu, jak już wspomniano, najwygodniej wyznaczać na podstawie pomiarów parametrów przepływu mieszanin w instalacjach laboratoryjnych.

### 3. Wyznaczanie natężenia przepływu mieszaniny popiołowo-wodnej na podstawie znajomości jej parametrów reologicznych

- Model Binghama

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{dv}{dy}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot \frac{\tau_w}{\eta_p} \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right]$$

gdzie:  $Q$  - natężenie przepływu,  $m^3/s$

$D$  - średnica rurociągu, m,

$\tau_w$  - maksymalne naprężenia przy ścianie rury, Pa,

$$\tau_w = \frac{D \cdot \Delta p}{4 \cdot L}$$

$\Delta p$  - ciśnienie rozporządzalne,  $\Delta p = H \cdot \rho_m \cdot g$

$H$  - różnica wysokości między wlotem i wylotem rurociągu, m,

$L$  - długość rurociągu, m,

$\rho_m$  - gęstość mieszaniny,  $\text{g}/\text{dm}^3$ ,

$g$  - przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

- Model Cassona

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_c \frac{dv}{dy}}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot \tau_w}{84 \cdot \eta_c} \cdot \left[ 21 - 48 \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_w}} + 28 \cdot \frac{\tau_0}{\tau_w} - \left(\frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^4 \right]$$

- Model Ostwalda - de Waele'a

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$$

$$Q = \pi \cdot \left(\frac{\tau_w}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{3 \cdot n + 1} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

- Model Herschela - Bulkleya

$$\tau = \tau_y + K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$$

$$Q = \frac{4 \cdot n}{K^{\frac{1}{n}} \cdot \tau_w^3} \cdot (\tau_w - \tau_y)^{\frac{n+1}{n}} \cdot \left[ \frac{(\tau_w - \tau_y)^2}{1 + 3 \cdot n} + \frac{2 \cdot (\tau_w - \tau_y)}{1 + 2 \cdot n} + \frac{\tau_y^2}{1 + n} \right] \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{32}$$

#### 4. Charakterystyka materiałów użytych do badań

Badaniami objęto mieszaniny popiołowo-wodne sporządzone na bazie popiołów lotnych bez odsiarczania z Elektrowni "Łaziska" o proporcjach masowych popiołu do wody 1,5:1, stężeniach soli w wodzie 0, 50, 100 i 300 g/dm<sup>3</sup> i gęstościach mieszanin 1437, 1445, 1466 i 1510 kg/m<sup>3</sup>. Wodę zasoloną sporządzono rozpuszczając w wodzie wodociągowej NaCl.

Własności badanych mieszanin popiołowo-wodnych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Własności badanych mieszanin popiołowo-wodnych

Lp.	Stosunek masowy popiołów do wody P : W	Stężenie soli w wodzie [g/dm <sup>3</sup> ]	Gęstość mieszaniny [g/dm <sup>3</sup> ]	Rozlewność mierzona „kubkiem Forda” [mm]
1	1.50 : 1	0	1437	182
2	1.50 : 1	50	1445	180
3	1.50 : 1	100	1466	175
4	1.50 : 1	300	1510	162

#### 5. Badanie parametrów przepływu mieszanin popiołowo-wodnych w rurowciągach

Pomiary jednostkowych strat energetycznych przepływu mieszanin popiołowo-wodnych w funkcji prędkości przepływu przeprowadzono na instalacji laboratoryjnej o średnicy wewnętrznej rurowciągu 0.023 i 0.038 m.

Długość odcinka pomiarowego L wynosiła 6 m, a różnica poziomów wlotu i wylotu instalacji H równała się 2,1 m.

Tablica 2

Wyniki pomiarów przepływów analizowanych mieszanin popiołowo-wodnych w rurowciągu pomiarowym o średnicy 23 mm

Nr mieszaniny	Prędkość mieszaniny v [m/s]	Natężenie przepływu Q [m <sup>3</sup> /godz.]
1	0,195	0,292
2	0,144	0,215
3	0,100	0,150
4	0,067	0,100

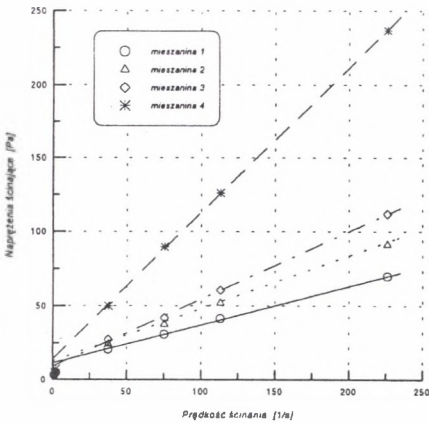
Tablica 3

Wyniki pomiarów przepływów analizowanych mieszanin popiołowo-wodnych w rurociągu pomiarowym o średnicy 38 mm

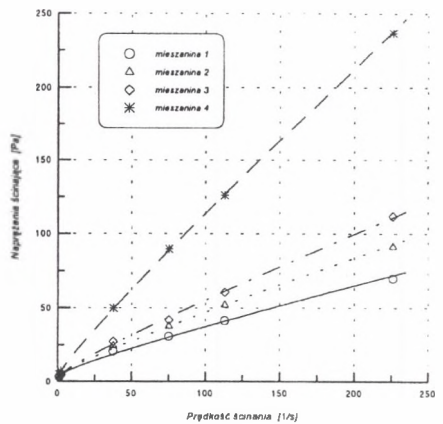
Nr mieszaniny	Prędkość mieszaniny $v$ [m/s]	Natężenie przepływu $Q$ [m <sup>3</sup> /godz.]
1	0,545	2,225
2	0,340	1,390
3	0,310	1,611
4	0,125	0,512

## 6. Wyniki badań własności reologicznych badanych mieszanin

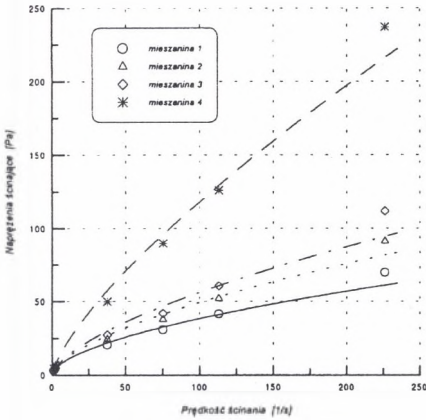
Wyniki pomiarów własności reologicznych mieszanin 1-4, dla poszczególnych modeli zamieszczono w tabelcy 4. Krzywe płynięcia tych mieszanin przedstawiono poniżej na rys. 1-4.



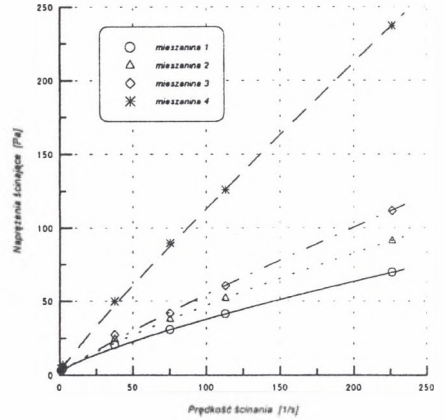
Rys. 1. Krzywe płynięcia dla modelu Bingham  
Fig.1. Flow curves for Bigham model



Rys. 2. Krzywe płynięcia dla modelu Cassona  
Fig.2. Flow curves for Casson model



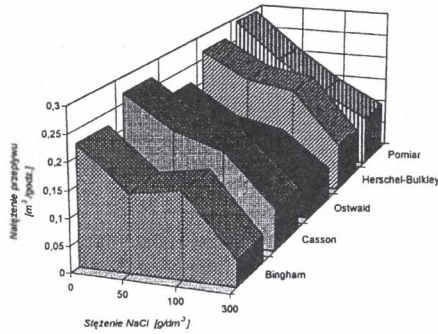
Rys. 3. Krzywe płynięcia dla modelu Ostwalda - de Waele'a  
Fig.3. Flow curves for Ostwald-de Waele model



Rys. 4. Krzywe płynięcia dla modelu Herschela - Bulkleya  
Fig.4. Flow curves for Herschley-Bulkley model

### 7. Porównanie wyników z pomiarów praktycznych z parametrami przepływu obliczonymi na podstawie własności reologicznych

Zestawienie parametrów przepływu mieszanin otrzymanych na drodze pomiarów własności reologicznych oraz z pomiarów na stanowisku laboratoryjnym przedstawiono na rys.5 i 6 oraz w tablicy 4.



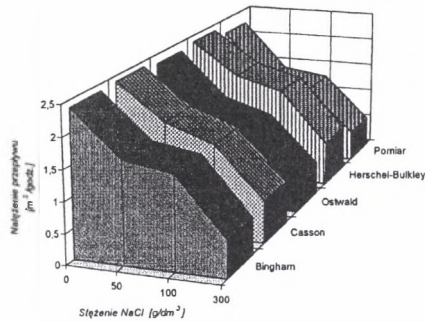
Rys. 5. Zestawienie wartości natężeń przepływu mieszanin 1 - 4 w instalacji pomiarowej o średnicy 23 mm  
Fig.5. Summary of flow rate of slurries 1 - 4 in a test loop with 23 mm pipe diameter

Tablica 4

Zestawienie parametrów przepływu mieszanin otrzymanych na drodze pomiarów własności reologicznych oraz z pomiarów na stanowisku laboratoryjnym

Nr mieszk.	Stężenie NaCl [g/dm <sup>3</sup> ]	Gęstość [g/dm <sup>3</sup> ]	Rozlewność [mm]	Parametry poszczególnych modeli reologicznych										Prędkość mieszani		Natężenie przepływu			
				Bingham		Casson		Ostwald		Herschel-Bulkley		D=23 mm	D=38 mm	D=23 mm	D=38 mm				
				$\tau_0$	$\eta$	$k_1$	$k_0$	k	n	$\tau_y$	K	n	[m/s]	[m <sup>3</sup> /godz.]					
1	0	1437	182	11,31	258									0,150	0,584	0,224	2,383		
						14,82	45,09									0,180	0,590	0,269	2,407
								2,77	0,57							0,143	0,571	0,214	2,331
										1,512	1,03	0,773				0,178	0,584	0,266	2,385
Pomiar na stanowisku laboratoryjnym																			
2	50	1445	180	12,60	355									0,098	0,407	0,146	1,661		
						17,44	42,42								0,137	0,445	0,206	1,815	
								2,83	0,62						0,104	0,384	0,155	1,569	
										1,411	0,995	0,831				0,143	0,447	0,214	1,825
Pomiar na stanowisku laboratoryjnym																			
3	100	1466	175	9,06	454									0,107	0,374	0,161	1,527		
						19,51	39,75								0,118	0,375	0,176	1,531	
								2,94	0,64						0,090	0,325	0,134	1,327	
										1,613	0,814	0,906				0,133	0,394	0,198	1,611
Pomiar na stanowisku laboratoryjnym																			
4	300	1510	162	13,95	988									0,034	0,148	0,051	0,603		
						29,9	38,10								0,054	0,169	0,080	0,691	
								3,91	0,74						0,041	0,134	0,062	0,547	
										2,016	1,588	0,922				0,061	0,182	0,091	0,741
Pomiar na stanowisku laboratoryjnym																			
													0,067	0,125	0,10	0,512			





Rys. 6. Zestawienie wartości natężeń przepływu mieszanin 1 - 4 w instalacji pomiarowej o średnicy 38 mm  
 Fig.6. Summary of flow rate of slurries 1 – 4 in a test loop with 38 mm pipe diameter

## 8. Podsumowanie

1. Zasolenie wody znacząco wpływa na właściwości mieszanin popiołowo-wodnych sporządzanych przy tym samym stosunku masowym popiołu do wody. Wzrost zasolenia od 0 do 300 [g/dm<sup>3</sup>] spowodował przyrost gęstości mieszanin od 1437 do 1510 [g/dm<sup>3</sup>] oraz zmniejszenie rozlewności mieszaniny od 182 mm do 162.
2. Wyniki obliczeń parametrów przepływu na podstawie własności reologicznych są zbliżone do wyników pomiarów praktycznych. Świadczy to o poprawności zastosowanych wzorów.
3. Najmniejszymi natężeniami przepływu charakteryzował się model Ostwalda de Waele'a. Największe prędkości i wydajności uzyskano dla modelu Herschela-Bulkleya przy stężeniach soli w wodzie 50, 100 i 300 [g/dm<sup>3</sup>] NaCl. Jedynie dla wody niezasolonej najlepszymi parametrami przepływu charakteryzował się model Cassona.
4. Przy zwiększającym się zasoleniu wody od 0 do 300 [g/dm<sup>3</sup>] NaCl wydajność instalacji obniżyła się kilkakrotnie. Jest to rezultatem sposobu sporządzania mieszanin ze stałym stosunkiem masowym popiołu do wody. Woda zasolona posiada większy ciężar właściwy od wody słodkiej. Wraz ze wzrastającym zasoleniem do każdej mieszaniny dodawano objętościowo mniej wody. Znalazło to również odzwierciedlenie w rezultatach pomiaru rozlewności.

## LITERATURA

1. Plewa F., Babczyński W., Popczyk M.: Badania laboratoryjne możliwości zagospodarowania wód silnie zasolonych w podsadce samozestalającej z wykorzystaniem popiołów z Elektrowni „Rybnik” i „Jaworzno”. Zeszyt Naukowy Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 232, 1996.
2. Plewa F., Babczyński W., Popczyk M.: Wozmożnosti ispolzowanija silno zasolennykh wod. Zapiski Gornogo Instituta, tom 2 (143), Saint-Petersburg 1997.
3. Palarski J.: Hydrotransport. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
4. Czaban S.: Wyznaczanie parametrów hydrotransportu rurowego reostabilnych mieszanin dwufazowych. Zeszyt Naukowy Akademii Rolniczej we Wrocławiu nr 60, Wrocław 1987.
5. Kłębowski Z.: Reometria płynów nienewtonowskich. WNT, Warszawa 1973.
6. Parzonka W.: Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych. Skrypt Akademii Rolniczej we Wrocławiu, nr 159, Wrocław 1997.
7. Stabla H.: Monitoring i sterowanie procesem lokowania odpadów w podziemnych wyrobiskach górniczych. Praca doktorska, Gliwice 1998.

Recenzent: Dr inż. Tadeusz Bromek

**Abstract**

Highly saline mine waters present a significant danger for the environment. Between other methods of their utilization, use of saline mine waters in preparation of stabilized backfill may be considered. The paper present results of laboratory tests concerned the influence of salinity of mine water that is used for preparation of stabilized backfill on the general parameters of their gravitational flow in laboratory conditions. The usefulness of theoretical equations for derivation of flow parameters from flow curves, known well from the literature related to laminar flow has been also examined for two-parametric (Bingham's, Casson's, Ostwald - de Waele's) and three-parametric (Herschel-Bulkley's) rheological models.