

Franciszek PLEWA, Grzegorz STROZIK

BADANIA LABORATORYJNE WPLYWU KONCENTRACJI NA PARAMETRY HYDRAULICZNEGO TRANSPORTU WYBRANYCH MIESZANIN ODPADÓW GÓRNICZYCH I ENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów przepływu mieszanin sporządzonych z popiołów lotnych z elektrowni węglowych i grubofrakcyjnych odpadów górniczych w rurowej instalacji doświadczalnej. Dokonano próby doboru wybranych modeli przepływu cytowanych w literaturze hydrotransportu do opisu uzyskanych zależności. Specjalną uwagę poświęcono ocenie wpływu koncentracji poszczególnych frakcji materiałowych na charakterystykę oporów przepływu mieszaniny w rurociągu podsadzkowym. Przedstawiono wnioski uwzględniają uwarunkowania górnicze procesu hydraulicznego wypełniania pustek poeksploatacyjnych z wykorzystaniem odpadów przemysłowych drobno- i gruboziarnistych.

LABORATORY RESEARCH ON THE INFLUENCE OF CONCENTRATION ON PARAMETERS OF HYDRAULIC TRANSPORTATION OF SELECTED SLURRIES MADE FROM MINING AND HEAT POWER GENERATION WASTE

Summary. The paper presents selected results of flow measurements made on a test loop for slurries which contain fly ashes from power plants and coarse mine waste. The results have been compared with selected models cited in the bibliography of the hydrotransport. A special attention has been given to the influence of both material fractions on the flow properties of slurry in a fill pipeline. The conclusion comprises some comments related to hydraulic filling of mine voids with fine and coarse-grained industrial waste from the point of mining technology.

1. Wstęp

Hydrotransport stanowi tani i efektywny środek transportu materiałów do wypełniania pustek poeksploatacyjnych i likwidowanych wyrobisk górniczych w górnictwie podziemnym. Część polskich kopalń węgla kamiennego wyposażona jest w grawitacyjne instalacje pod-sadzkowe, projektowane do transportu mieszanin podsadzki hydraulicznej sporządzonych z piasku z ewentualnym dodatkiem skruszonych skał płonnych lub żużli. Współcześnie zużycie tradycyjnych materiałów podsadzkowych uległo znacznemu ograniczeniu, natomiast kopalnie są w coraz większym stopniu zainteresowane wykorzystaniem materiałów odpadowych, zwłaszcza energetycznych i górniczych, do wypełniania zrobów poeksploatacyjnych i likwidacji zbędnych wyrobisk górniczych.

Wypełnianie zbędnych pustek podziemnych odpowiednio dobranymi materiałami przynosi zarówno korzystne efekty z górniczego (poprawa warunków wentylacyjnych, obniżenia zagrożenia pożarowego, ograniczenie deformacji górotworu i powierzchni), jak i z ekologicznego punktu widzenia (zagospodarowanie materiałów odpadowych o niekorzystnym oddziaływaniu na środowisko).

Materiały odpadowe z energetyki (popioły lotne) i górnictwa (odpady przeróbcze, skały płonne) charakteryzują się bardzo zróżnicowanymi własnościami fizykochemicznymi, zaś mieszaniny sporządzone z ich udziałem wykazują dużą zmienność parametrów przepływu w zależności od licznych czynników, co w praktyce uniemożliwia zastosowanie procedur obliczeniowych wypracowanych dla innych rodzajów materiałów bez weryfikacji za pomocą badań eksperymentalnych przeprowadzonych z użyciem rozpatrywanych mieszanin. Stosunkowo nową dla praktyki górniczej jest propozycja stosowania mieszanin popiołowodnych z udziałem skruszonych skał płonnych. Rozwiązanie takie umożliwi kopalniom utylizację własnych odpadów górniczych równoległe z odpadami z energetyki, w odpowiednich warunkach górniczo-technicznych.

W pracy zostaną przedstawione wyniki badań i analiz parametrów przepływu mieszanin sporządzonych z popiołu lotnego pochodzącego z instalacji suchego odsiarczania spalin w Elektrowni „Rybnik” oraz tych mieszanin zawierających dodatek frakcji gruboziarnistych (skruszonych skał płonnych) w instalacji badawczej z rurociągami pomiarowymi o średnicy 100 i 200 mm.

2. Pomiary oporów przepływu mieszanin w instalacji doświadczalnej

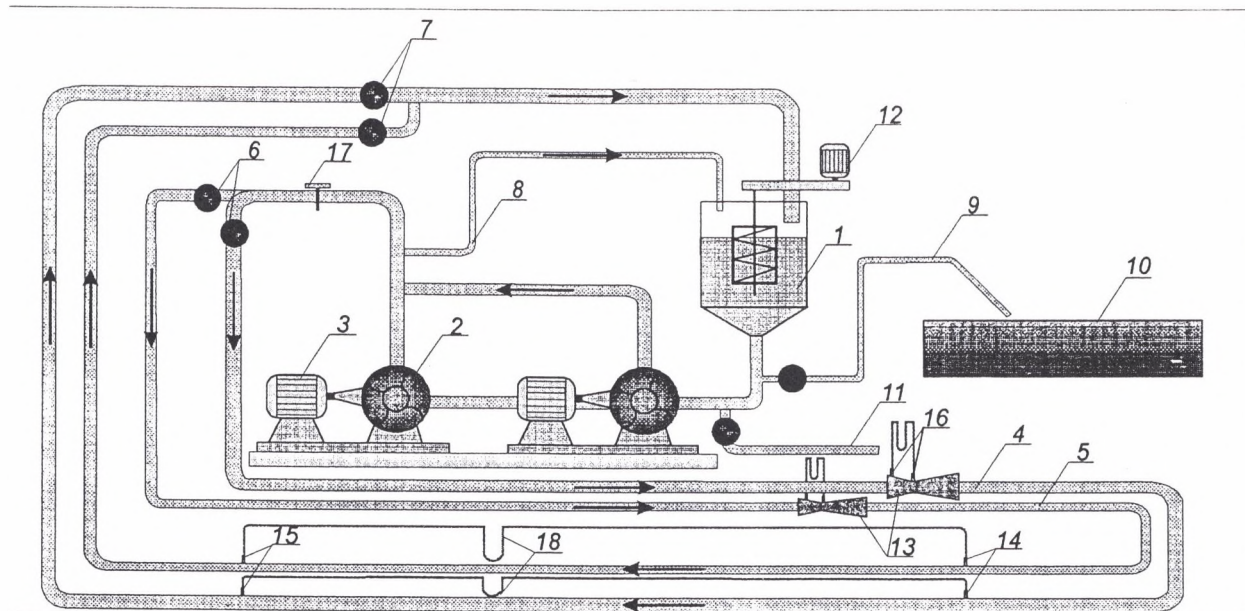
Schemat instalacji do pomiaru charakterystyk przepływu mieszanin przedstawiono na rys.1. Instalacja posiada dwa odcinki pomiarowe zbudowane z rur o średnicy 100 i 200 mm. Układ zasilania stanowią dwie pompy wirowe ZK – 250 pozwalające na uzyskanie prędkości przepływu w zakresie do około 5 m/s. Maksymalna gęstość przepływającej w instalacji mieszaniny wynosi około 1650 kg/m^3 . Warunki przepływu pozwalają więc symulować pracę instalacji kopalnianych. Parametry badanych mieszanin zestawiono w tabelicy 1. Uzyskane charakterystyki oporów przepływu badanych mieszanin podano na rys.2 i 3 (mieszaniny popioło-wodne) oraz na rys. 4 i 5 (mieszaniny z dodatkiem frakcji gruboziarnistych). Jako materiału gruboziarnistego w badaniach użyto gysu granitowego o uziarnieniu $11 \div 16 \text{ mm}$ dla uniknięcia nadmiernej degradacji ziaren podczas pracy instalacji.

Tabela 1

Parametry mieszanin badanych w instalacji doświadczalnej

Lp.	Proporcja masowa części stałych do wody	Udział masowy składników stałych [%]		Gęstość [kg/m^3]		Koncentracja objętościowa [-]	
		Popiół	Grys	Mieszaniny ρ_m	Cieczy nośnej ρ_{cn}	Części stałych C_v	Ziaren grubych C_{vG}
1	0,660 : 1	81,5	18,5	1277,6	1226,4	0,230	0,035
2	0,745 : 1	82,2	17,8	1310,9	1226,4	0,249	0,048
3	1,514 : 1	87,5	12,5	1482,4	1430,0	0,410	0,042
4	1,653 : 1	80,1	19,9	1518,1	1430,0	0,428	0,070
5	0,5 : 1	100,0	0,0	1213,5	-	0,191	-
6	1,2 : 1	100,0	0,0	1407,6	-	0,365	-
7	1,9 : 1	100,0	0,0	1521,8	-	0,467	-

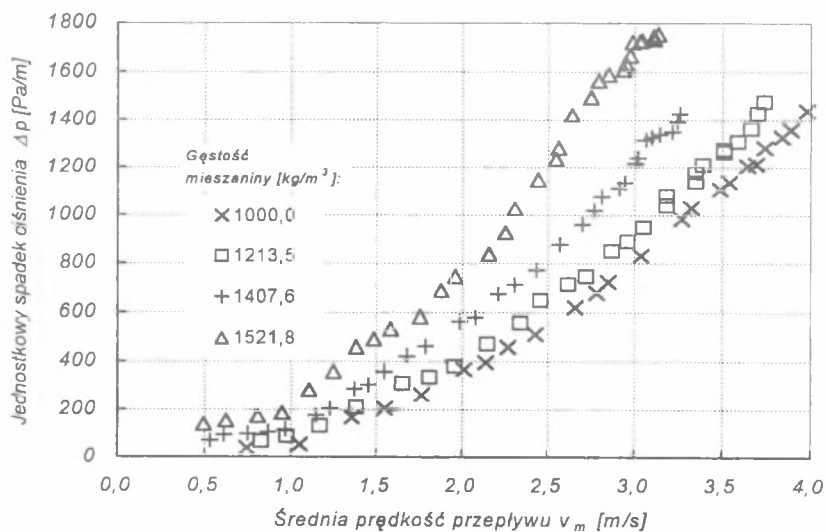
Ze względu na dużą ilość danych pomiarowych w niniejszym opracowaniu ograniczono się do przedstawienia podstawowych wykresów przedstawiających zbiory charakterystyk przepływu mieszanin w zależności od obecności frakcji grubych i średnicy rurociągu.



LEGENDA:

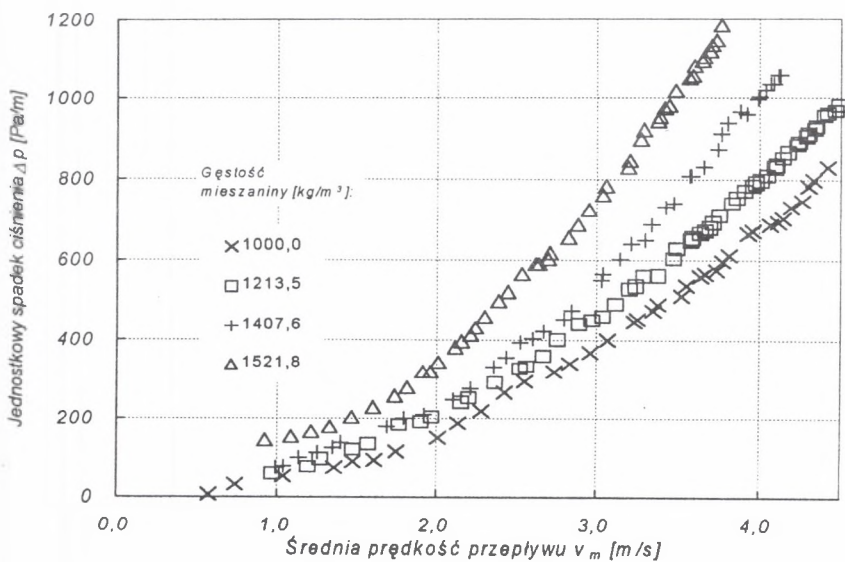
- 1 - Zbiornik mieszanki $V = 4 \text{ m}^3$, 2 - pompa Z2K250, 3 - silnik 34 kW, 4 - rurociąg $D = 200 \text{ mm}$, 5 - rurociąg $D = 100 \text{ mm}$, 6 - zawory wlotowe, 7 - zawory wylotowe, 8 - odpływ boczny do pomiaru gęstości mieszanki, 9 - rurociąg spustowy mieszanki, 10 - zbiornik na odpady, 11 - króciec upustowy wody, 12 - mieszalnik z napędem, 13 - zwężki Venturiego, 14, 15 - punkty pomiar spadku ciśnienia, 16 - punkty pomiaru różnicy ciśnienia na zwężce Venturiego, 17 - zasuwa (dławica), 18 - manometry różnicowe.

Rys.1. Schemat instalacji do badań oporów przepływu mieszanin do wypełniania wyrobisk górniczych
 Fig.1. A scheme of the tekst loop for measurements of head loses in pipes



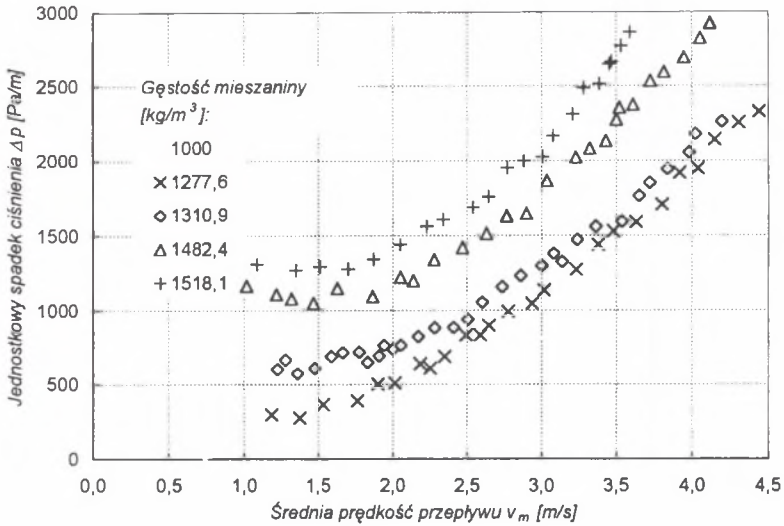
Rys.2. Wyniki pomiarów spadków ciśnienia w funkcji prędkości przepływu dla mieszanin popiołowo-wodnych w instalacji o średnicy 100 mm

Fig.2. Head loss as a function of flow velocity for fly ash-water slurries measured in a 100 mm pipe



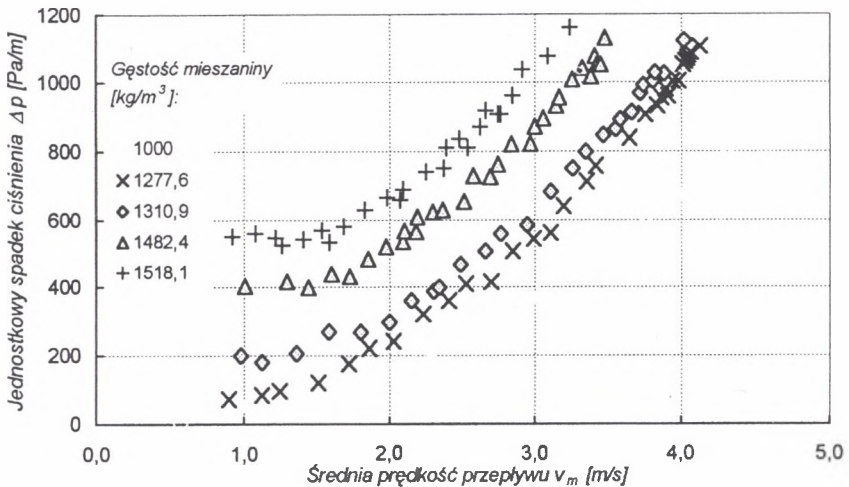
Rys.3. Wyniki pomiarów spadków ciśnienia w funkcji prędkości przepływu dla mieszanin popiołowo-wodnych w instalacji o średnicy 200 mm

Fig.3. Head loss as a function of flow velocity for fly ash-water slurries measured in a 200 mm pipe



Rys.4. Wyniki pomiarów spadków ciśnienia w funkcji prędkości przepływu mieszanin popiołowo-wodnych z dodatkiem grysu w instalacji o średnicy 100 mm

Fig.4. Head loss as a function of flow velocity measured in $D = 100$ mm pipe for fly ash-water-coarse grains slurries



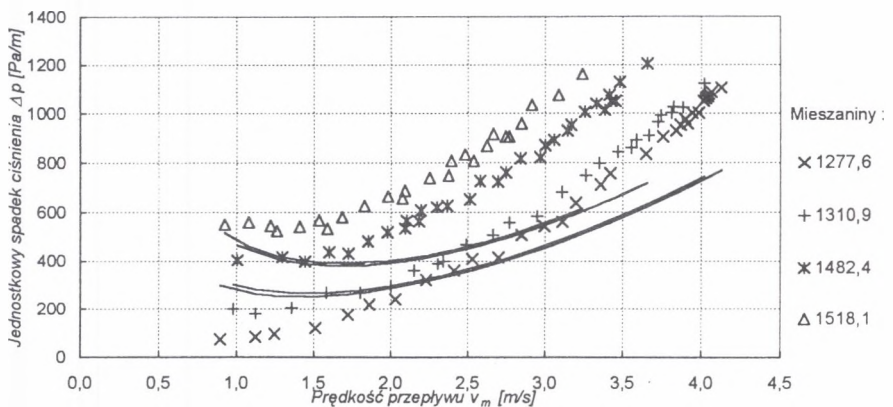
Rys.5. Wyniki pomiarów spadków ciśnienia w funkcji prędkości przepływu mieszanin popiołowo-wodnych z dodatkiem grysu w instalacji o średnicy 200 mm

Fig.5. Head loss as a function of flow velocity measured in $D = 200$ mm pipe for fly ash-water-coarse grains slurries

3. Analiza wyników badań

W trakcie opracowywania wyników przeprowadzonych badań podjęto próbę weryfikacji wybranych modeli przepływu zaczerpniętych z literatury hydrotransportu [7]. Jej celem była ocena przydatności spotykanych w literaturze równań do opisu zależności jednostkowych spadków ciśnienia od prędkości przepływu dla badanych mieszanin. Do analizy wybrano wzory i procedury obliczeniowe proponowane m.in. przez Silina [4], Smołydięwa [5], Sobotę [6] oraz model do obliczeń podsadzki hydraulicznej stosowany w Instytucie Eksploatacji Złóż [2], za pomocą których wyznaczono teoretyczne przebiegi zależności jednostkowych oporów przepływu od prędkości przepływu w rurociągu o średnicy 200 mm dla mieszanin popiołowo-wodnych z dodatkiem frakcji gruboziarnistych (mieszanki 1 ÷ 4, tabela 1). Przykłady porównania krzywych uzyskanych z pomiarów z obliczonymi według wzoru Silina i modelu podsadzki hydraulicznej IEZ przedstawiono na rys. 6 i 7.

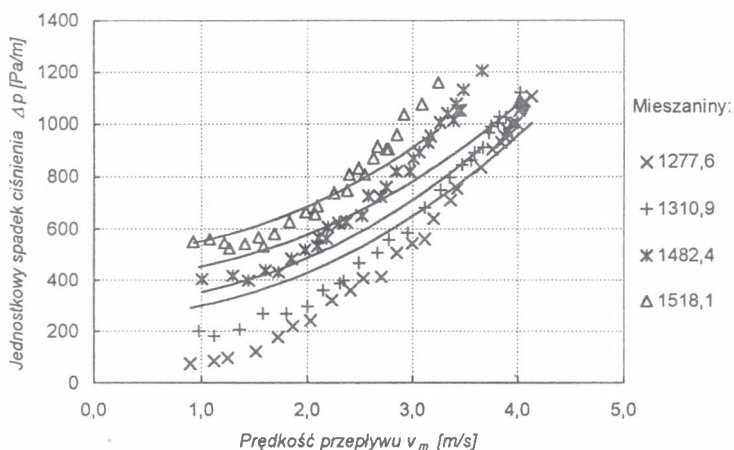
Już pobieżna analiza uzyskanych zależności wykazała, że wzory te nie mogą być stosowane nawet do zgrubnego prognozowania warunków przepływu rozpatrywanych mieszanin.



Rys.6. Porównanie wyników pomiarów ciśnienia z wartościami przewidywanymi modelem Silina w rurociągu o średnicy 200 mm dla mieszanin scharakteryzowanych w tabelicy 1

Fig.6. Comparison of experimental data with theoretical model by Silin. Pipe diameter $D = 200$ mm, slurries as described in Table 1

Zaistniała zatem konieczność opracowania modelu przepływu uwzględniającego specyficzne własności rozpatrywanych mieszanin. Uznano za celowe opracowanie zależności, która ujmowałaby nie tylko statystyczną zgodność wyników doświadczalnych z prognozami, ale także stanowiłaby koncepcję fizycznej interpretacji zjawiska [3].



Rys.7. Porównanie wyników pomiaru spadków ciśnienia z wartościami przewidywanymi modelem przepływu podsadzki hydraulicznej w rurociągu o średnicy 200 mm dla mieszanin scharakteryzowanych w tablicy 1
 Fig.7. Comparison of experimental data with theoretical model of backfill flow. Pipe diameter 200 mm, slurries as described in Table 1

Dla opracowania modelu przepływu mieszanin sporządzonych z udziałem odpadów o drobnym uziarnieniu (popiołów lotnych) zawierających dodatek (do około 15% części stałych) ziaren grubych przyjęto następujące założenia:

- mieszanina popiołowo-wodna stanowi ciecz pseudojednorodną,
- opory przepływu mieszaniny popiołowo-wodnej rosną wraz ze wzrostem koncentracji ziaren, proporcjonalnie do wzrostu lepkości i gęstości mieszaniny,
- mieszaninę popiołowo-wodną z udziałem frakcji grubych można traktować jako mieszaninę grubych ziaren w pseudojednorodnej cieczy nośnej utworzonej przez wodę i ziarna drobne,
- straty energetyczne przepływu z tytułu transportowania ziaren grubych są proporcjonalne do ich średnicy i koncentracji w mieszaninie,
- obliczenia parametrów przepływu mieszanin będą dotyczyły instalacji grawitacyjnych, w których należy zapewnić odpowiednio dużą prędkość przepływu, dlatego

można przyjąć za uzasadnione założenie, że przepływ odbywać się będzie w turbulentnej strefie ruchu, z prędkością zapewniającą unoszenie grubych ziaren transportowanego materiału.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia, na podstawie analizy wyników pomiarów Autorzy zaproponowali równanie strat energetycznych przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych z dodatkiem frakcji grubych w postaci:

$$\Delta p_m = \Delta p_c \left(\frac{\mu_m}{\mu_c} \right)^a \left(\frac{\rho_m}{\rho_c} \right)^b + cd_g C_{vg} g \rho_w \frac{W_o}{v_m} \quad (1)$$

gdzie:

- Δp_m - jednostkowy spadek ciśnienia mieszaniny, Pa
- Δp_c - jednostkowy spadek ciśnienia cieczy nośnej, Pa
- μ_m - współczynnik lepkości dynamicznej mieszaniny, Pa·s
- μ_c - współczynnik lepkości dynamicznej cieczy nośnej, Pa·s
- ρ_m - gęstość mieszaniny, kg/m³
- ρ_c - gęstość cieczy nośnej, kg/m³
- a, b, c - współczynniki modelu,
- d_g - średnica ziaren grubych, m
- C_{vg} - koncentracja objętościowa ziaren grubych,
- g - przyspieszenie ziemskie, m/s²
- ρ_w - gęstość wody, kg/m³,
- W_o - prędkość opadania ziaren grubych w cieczy nośnej, m/s
- v_m - prędkość przepływu mieszaniny, m/s.

Wartości współczynników modelu wyznaczono na podstawie badań laboratoryjnych przepływu mieszanin w zależności od rodzaju transportowanych materiałów. Dla mieszanin z popiołów lotnych po suchym odsiarczaniu spalin z dodatkiem do 15% skruszonych skał płonnych, które były przedmiotem badań, wartości współczynników określono za pomocą następujących zależności:

$$a = \text{const} = 0,019$$

$$b = 38,2C_{vz} \left(\frac{D}{d_g}\right)^{0,0051} \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right)^4 - 22,06 \left(\frac{D}{d_g}\right)^{0,0051} \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right) + 8413 \left(\frac{D}{d_g}\right)^{0,0051} - 144C_{vz} - 8392 \quad (2)$$

$$c = 35987C_{vz} \left(\frac{D}{d_g}\right)^{-0,38} \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right)^{-11,51} + 739,4 \left(\frac{D}{d_g}\right)^{-0,38} \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right)^3 - 417,5 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w}\right) \quad (3)$$

Równania (2) i (3) są, jak widać, bezwymiarowymi funkcjami stosunku średnicy rurociągu do uziarnienia frakcji grubych, względnej gęstości mieszaniny i koncentracji objętościowej frakcji gruboziarnistej.

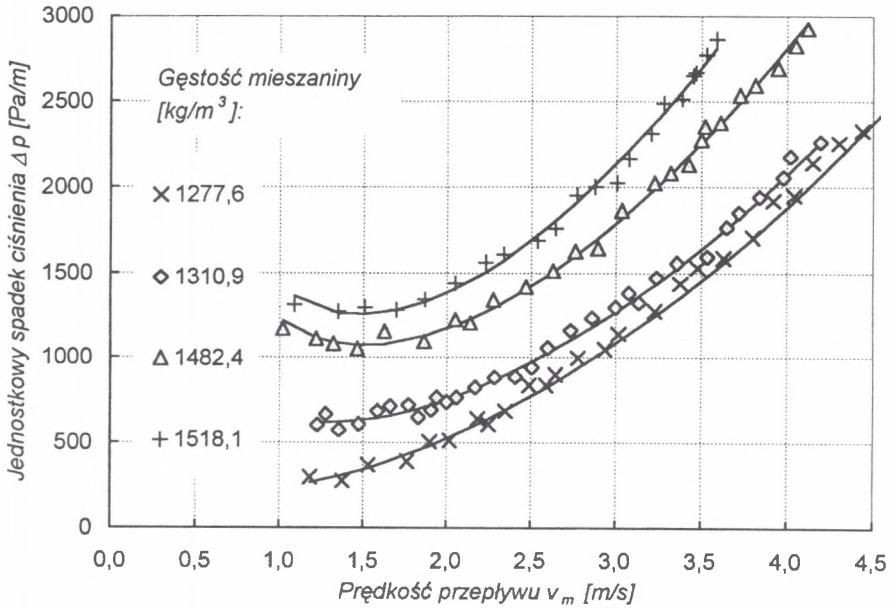
Wartości dynamicznego współczynnika lepkości μ_m ustalane są na podstawie empirycznie określonej funkcji koncentracji objętościowej mieszaniny, podanej przez Thomasa [1, 6], a następnie modyfikowanej przez licznych badaczy dla konkretnych rodzajów mieszanin.

Estymacje z udziałem przedstawionego modelu przepływu zapewniają uzyskanie wartości udziału wariancji wyjaśnionej w zakresie od 99,20 do 99,74% dla zbioru danych z pomiarów na instalacji doświadczalnej.

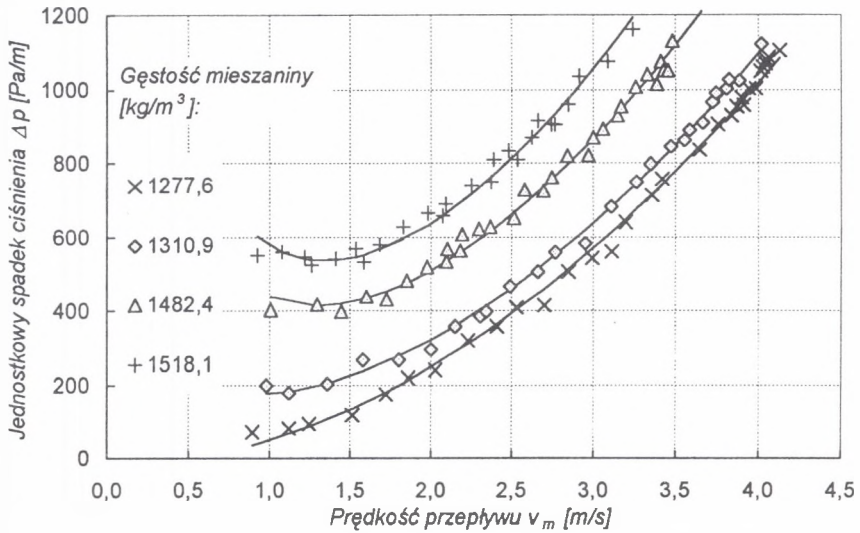
Rezultaty aproksymacji krzywych pomiarowych dla mieszanin 1 ÷ 4 (tablica 1) uzyskanych na rurociągu o średnicy $D = 100$ mm za pomocą opracowanego modelu przedstawiono na rys.8, a na rys.9 wyniki z pomiarów na rurociągu o średnicy $D = 200$ mm.

4. Wnioski

W pracy zaprezentowano wyniki badań parametrów przepływu mieszanin popiołowo-wodnych sporządzonych z popiołów po suchym odsiarczaniu spalin w zakresie gęstości od około 1278 do 1522 kg/m³, zawierających od 0 do 19,9% skruszonych skał płonnych (w stosunku do suchej masy składników). Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono weryfikację wielu równań literaturowych oraz opracowano model przepływu dla wyżej opisanych mieszanin. Weryfikacja równań literaturowych wykazała, że wyznaczone z ich użyciem zależności spadków ciśnienia od prędkości przepływu mieszanin dalece odbiegają od zależności uzyskanych na instalacji pomiarowej. Brak korelacji obliczeń z wynikami doświadczalnymi wynika z braku możliwości ujęcia wszystkich własności fizycznych i chemicznych różnych rodzajów materiałów stosowanych do sporządzania mieszanin, które mają wpływ na ich opory przepływu w rurociągu.



Rys.8. Aproksymacja wyników pomiarów przepływu mieszanin jak w tablicy 1 za pomocą proponowanego modelu. Rurociąg o średnicy D = 100 mm
 Fig.8. An approximation of measurement data with proposed model for slurries as described in Table 1. Pipe diameter D = 100 mm



Rys.9. Aproksymacja wyników pomiarów przepływu mieszanin jak w tablicy 1 za pomocą proponowanego modelu. Rurociąg o średnicy D = 200 mm
 Fig.9. An approximation of measurement data with proposed model for slurries as described in Table. Pipe diameter D = 200

Badania oporów przepływu mieszanin sporządzonych z wyżej wymienionych składników badania przeprowadzono na instalacji wyposażonej w rurociągi pomiarowe o średnicy 100 i 200 mm, odpowiadające średnicom rurociągów stosowanych w instalacjach przemysłowych.

Opracowany przez autorów model obliczeniowy zapewnia w ponad 99% zgodność obliczeń z wynikami pomiarowymi. Wykorzystanie do sporządzania mieszanin wypełniających innych rodzajów popiołów lotnych wymaga każdorazowo przeprowadzenia laboratoryjnych pomiarów przepływu celem ustalenia wartości współczynników modelu.

Wyniki przedstawionych w pracy badań umożliwiają prognozowanie jednostkowych oporów przepływu w instalacjach przemysłowych mieszanin sporządzonych z popiołów lotnych po suchym odsiarczeniu spalin z dodatkiem skruszonych skał płonnych w ww. zakresie gęstości i składu mieszanin.

LITERATURA

1. Durand R., Condolios E.: Etude experimentale du refoulement des materiaux en conduites, en particulier des produits de dragage et des schlamms. Compte rendu des Deuxiemes Journees de l'Hydraulique, Grenoble 1952.
2. Palarski J.: The Use of Fly Ash, Tailings, Rock and Binding Agents in Consolidated Backfilling in Coal Mines, 5th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill 93, Johannesburg 1993.
3. Plewa F., Sobota J., Strozik G.: Influence of Coarse Particles on Rheology of Fly Ash Slurry, Int. Conf. On Problems in Fluid Mechanics and Hydrology. Prague, Czech Rep., 23-26.06.1999.
4. Silin N.A., Kobernik S.G.: Reżimy raboty krupnych ziemlnosnyh snariadow i truboprowodow. Izdatielstwo AN USRR, Kijów 1962.
5. Smoldyriew A.E.: Gidro- i pnewmotransport. Mietełurgia, Moskwa 1975.
6. Sobota J.: Hydraulika przepływu mieszanin newtonowskich w rurociągach. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawnictwo PAN, 1998.
7. Strozik G.: Optymalizacja parametrów przepływu i składu mieszanin do likwidacji wyrobisk górniczych. Dysertacja doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1999.

Abstract

Filling of underground mine voids with heat power generation waste and mining waste becomes more and more widely used practice due to encouraging ecological and mining engineering effects. Hydraulic transportation of fill slurries in pipeline systems must be precisely designed in aim to meet two opposite conditions: no risk of pipe blockage and possible high density of slurry (low water contents). Already existed models of mixtures flow based on different experimental data sets cannot be uncritical applied for specific materials and their mixtures due their unique properties (Fig.6, 7). In the discussed research program a set of slurries made with a fly ash and coarse mining waste (Table 1) has been tested on a test loop (Fig.1). As a result of measurements flow curves have been obtained for different densities of slurry, presence of coarse grains, and pipe diameter (Fig. 2 ÷ 5). A model of flow of such kinds of slurries have been proposed (Eq. 1 ÷ 3). It allows to estimate the head losses of fly ash – water slurries with addition of coarse grains in pipe lines with diameter ranging from 100 up to 200 mm, and flow velocities between approximately 2 and 6 m/s.