

Franciszek PLEWA, Grzegorz STROZIK, Rafał JENDRUŚ
Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW WŁASNOŚCI REOLOGICZNYCH MIESZANIN WYBRANYCH ODPADÓW DROBNOFRAKCYJNYCH NA PARAMETRY ICH PRZEPIYU PRZEZ GRUZOWISKO ZAWAŁOWE W ŚWIETLE WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

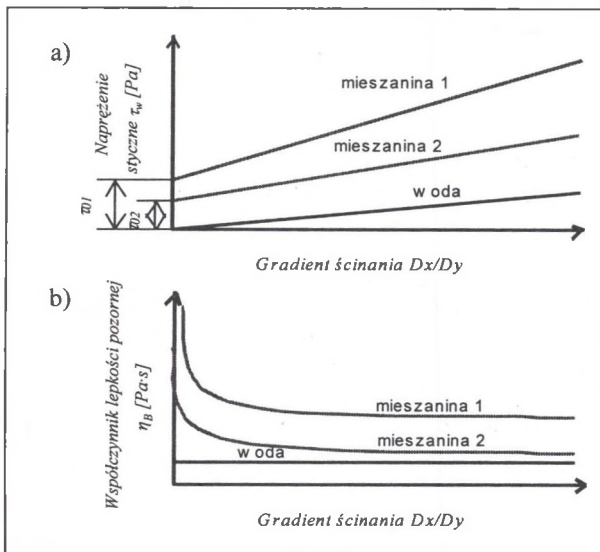
Streszczenie. Doszczelnianie zrobów zawałowych z użyciem drobnofrakcyjnych mieszanin popiołów lotnych jest technologią powszechnie stosowaną w górnictwie podziemnym, w celu poprawy warunków wentylacyjnych, eliminacji zagrożenia pożarowego, zmniejszenia deformacji powierzchni, ograniczenia migracji wód podziemnych czy osiągnięcia innych celów technologicznych lub ekologicznych. Pomimo znacznej ilości doświadczeń przemysłowych i bogatego dorobku naukowo-badawczego w tej dziedzinie, brak jest do tej pory efektywnych metod, pozwalających na prognozowanie przebiegu procesu doszczelniania zrobów w oparciu o podstawowe własności fizyczne, w tym w szczególności reologiczne, mieszanin i geometryczne parametry gruzowiska zawałowego. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań nad opracowaniem modelu przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych w zrobach zawałowych, w oparciu o badania laboratoryjne wykonane na modelu gruzowiska zawałowego.

THE INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SLURRIES FROM SELECTED FINEGRAINED WASTE ON FLOW PARAMETERS THROUGH ROCK FALL ZONE IN THE LIGHT OF LABORATORY EXPERIMENTS

Summary. Grouting of roof fall rock zones with fine-grained slurries made with fly ash is widely spread technology in underground mining applied often in aim to improve ventilation, control spontaneous ignition of coal, reduce surface subsidence, or to achieve other technical or ecological goals. In spite of significant industrial experience and reach scientific bibliography related to this subject, there is a still lack of effective methods for design of grouting process parameters on the basis of basic physical, especially rheological, properties of slurries and geometry of roof rock fall zone. The paper reports selected research results on evaluation of a model of fine-grained grouting slurries flow through roof fall rock zone, based on laboratory measurements of flow in a model of rock fall zone.

1. Własności mieszanin drobnofrakcyjnych

Mieszaniny wody materiałów o bardzo drobnym uziarnieniu, takich jak: popioły lotne i cement, których ziarna nie przekraczają 0,1 mm, mogą być w rozważaniach dotyczących rozwiązywania problemów inżynierskich, traktowane jak ciecze quasi-jednorodne. W miarę wzrostu koncentracji części stałych w mieszaninie, wzrasta jej gęstość oraz parametry reologiczne. Charakterystykę reologiczną cieczy przedstawiają wykresy naprężenia stycznego na ścianie przewodu w funkcji gradientu ścinania – krzywe płynięcia. Przykład krzywych płynięcia wody oraz dwóch przykładowych mieszanin przedstawiono na rys. 1a.



Rys. 1. Przykładowe zależności naprężenia stycznego (a) i lepkości (b) od gradientu ścinania dla cieczy newtonowskiej (woda) i binghamowskiej (miesz. 1 i 2)

Fig. 1. Illustration of shear stress (a) and viscosity relations versus shear rate for Newtonian (water) and Non-newtonian (mixture 1 and 2) fluids

Niektóre rodzaje cieczy, w tym woda reprezentują ciecze newtonowskie. Charakteryzują się one liniowym przebiegiem krzywej płynięcia, która przebiega przez początek układu współrzędnych. Obecność fazy stałej zmienia charakterystykę reologiczną cieczy. Oprócz wzrostu lepkości obserwuje się przede wszystkim występowanie granicy płynięcia (τ_0), tj. minimalnego naprężenia, poniżej którego ciecz pozostaje nieruchoma. Ciecze posiadające niezerową granicę płynięcia i prostoliniowy przebieg krzywej płynięcia spełniają warunki modelu reologicznego Bingham'a. Ciecze nienewtonowskie charakteryzują się zmienną lepkością [2] (rys. 1b), dlatego np. w modelu Bingham'a drugim parametrem, oprócz granicy

płynięcia, jest współczynnik lepkości pozornej (η_B). Charakterystyki reologiczne cieczy i mieszanin mogą być bardziej złożone, jednak model Binghamu pozwala na wystarczająco dokładny, dla celów praktycznych, opis mieszanin sporządzanych z wody i popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego.

Własności reologiczne mieszaniny mają decydujący wpływ na przebieg rozptywu mieszanin drobnofrakcyjnych w gruzowisku zawałowym. Lepkość wpływa w większym stopniu na natężenie przepływu mieszaniny przez zroby, natomiast granica płynięcia na zasięg jej rozptywu w gruzowisku [3].

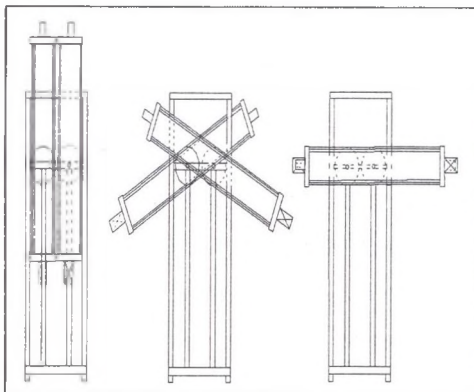
W miarę oddalania się mieszaniny od wylotu z rurociągu zmieniają się także jej własności reologiczne. Prędkość ruchu mieszaniny stopniowo maleje, co sprzyja sedymentacji ziaren części stałych i powoduje wypełnianie wolnych przestrzeni. Zmniejszająca się koncentracja części stałych w płynącej przez zroby mieszaninie, wywołuje z kolei znaczące zmiany jej parametrów płynięcia przez dalsze partie zrobów, co ilustrują przykładowe krzywe płynięcia na rys. 1. Mieszanina dostarczana do zrobów (mieszanina 1 na rys. 1.) charakteryzuje się wyższymi wartościami parametrów reologicznych niż mieszanina w pewnej odległości od wylotu rurociągu (mieszanina 2).

2. Model gruzowiska zawałowego i metodyka pomiarów

Schemat stanowiska badawczego do pomiaru parametrów przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych przez gruzowisko zawałowe przedstawiono na rys. 2. i 3. Głównym elementem stanowiska jest rura o długości 1500 mm i średnicy wewnętrznej 172 mm, wypełniona bryłami skał stropowych o uziarnieniu od 60 do 120 mm, w taki sposób, aby uzyskać porowatość gruzowiska $n = 50\%$. Umocowanie na obrotowej podstawie umożliwia uzyskanie dowolnego kąta nachylenia modelu gruzowiska zawałowego (pomiaru wykonywano przy nachyleniu równym 5, 10, 15 i 30 stopni). Na obu końcach znajdują się zawory oraz króćce, umożliwiające podawanie mieszaniny do modelu gruzowiska i odbiór mieszaniny odpływającej.

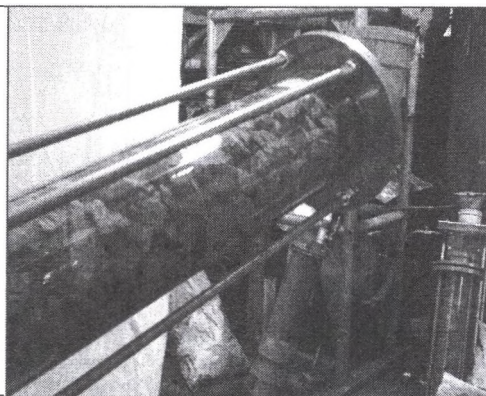
Mieszanina podawana jest do modelu ze stałym ciśnieniem, równym 200 mm wysokości słupa mieszaniny przez okres 1 minuty. W tym czasie mierzona jest objętość mieszaniny odebranej po stronie wylotowej modelu, co pozwala określić objętościowe natężenie przepływu mieszaniny przez modelowe gruzowisko. Dla każdej badanej mieszaniny określa się: gęstość, rozlewność (metodą kubka Forda) oraz parametry reologiczne (przy użyciu

wiskozymetru rotacyjnego FANN 35 SA). Gęstość oraz parametry reologiczne mierzone są przed i po przepływie przez gruzowisko w celu określenia ewentualnych zmian własności mieszaniny, w wyniku przepływu przez gruzowisko. Ponadto, wykonywano analizy składu ziarnowego fazy stałej poszczególnych badanych mieszanin – wytworzonych i po przepływie przez model gruzowiska zawałowego.



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych przez gruzowisko zawałowe

Fig. 2. Schematic diagram of the laboratory stand for testing of fine-grained slurries flow through roof rock fall zone



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska do badań przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych przez gruzowisko zawałowe

Fig. 3. General view of the laboratory stand for testing of fine-grained slurries flow through roof rock fall zone

3. Wyniki i analiza badań przepływu mieszanin drobnofrakcyjnych przez modelowe gruzowisko zawałowe

Do badań wykorzystano popioły lotne ze spalania węgla kamiennego bez produktów odsiarczania spalin (symbol „B”) oraz zawierające produkty półsuchej metody odsiarczania spalin (symbol „P”) z dwóch wybranych elektrowni (symbole „R” i „Ł”). Mieszanki popiołowo-wodne sporządzano w zmiennych proporcjach dla uzyskania stałych wartości rozlewności, dla poszczególnych rodzajów popiołów lotnych wynoszących 180, 210 i 250 mm. Zastosowanie kryterium stałej rozlewności pozwala na uzyskanie mieszanin o zbliżonych własnościach przepływowych, sporządzonych z różnych rodzajów popiołu.

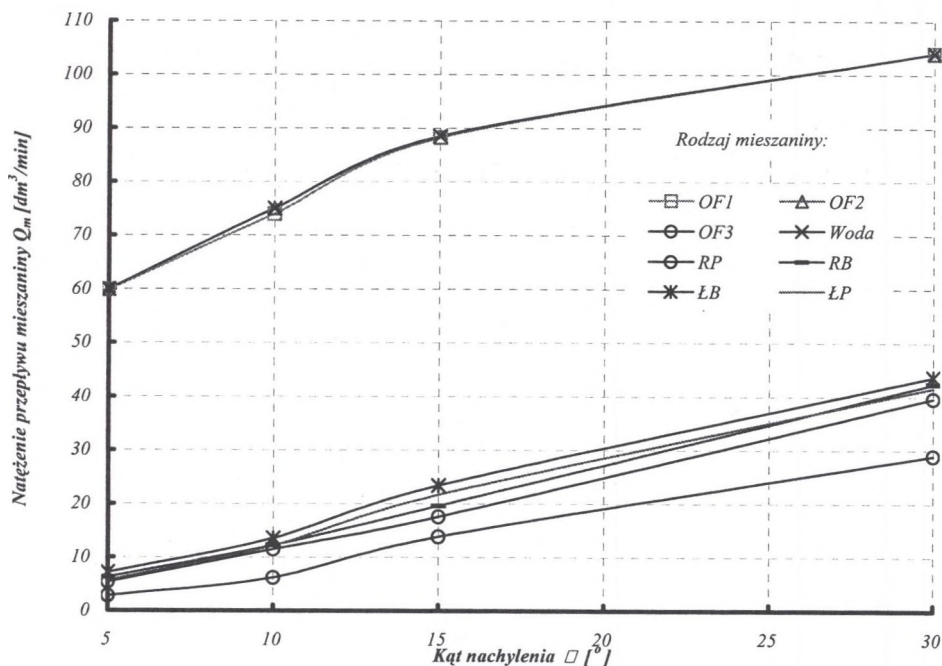
W przypadku mieszanin odpadów flotacji, koncentracje mieszanin odpadów flotacji węgla (symbole OF1 i OF2) są równe tym, jakie zarejestrowano w układach transportowych odpowiednich kopalń. Odpad o symbolu OF3 stanowi odpad flotacji rud Zn-Pb. Podstawowe własności mieszanin popiołowo-wodnych, wykorzystywanych do badań przepływu przez modelowe gruzowisko zawałowe, zestawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Podstawowe parametry fizyczne mieszanin popiołowo-wodnych użytych w badaniach przepływu przez model gruzowiska zawałowego

Popiół	Gęstość popiołu ρ_s [kg/m ³]	Rozlewność R [mm]	Gęstość mieszaniny ρ_m [kg/m ³]	Koncentracja obj. C_v [-]	Proporcja masowa P : W	Granica płynięcia τ_0 [Pa]	Współcz. lepkości η_B [Pa·s]
OF1	2300	440	1045	0,035	0,083 : 1	0,960	0,0029
OF2	2300	440	1035	0,027	0,064 : 1	0,086	0,00272
OF3	3000	180	1880	0,440	2,36 : 1	16,0	0,064
RP	2340	180	1560	0,418	1,68 : 1	5,7	0,0965
		210	1490	0,366	1,35 : 1	4,9	0,0878
		250	1460	0,343	1,22 : 1	3,1	0,0522
RB	2170	180	1520	0,444	1,73 : 1	5,3	0,0595
		210	1450	0,385	1,36 : 1	4,1	0,0166
		250	1390	0,333	1,08 : 1	2,0	0,0080
ŁB	2100	180	1490	0,445	1,68 : 1	4,1	0,0488
		210	1430	0,391	1,35 : 1	3,6	0,0288
		250	1380	0,345	1,11 : 1	2,2	0,0194
ŁP	2160	180	1520	0,448	1,75 : 1	7,7	0,0600
		210	1460	0,396	1,42 : 1	4,2	0,0315
		250	1430	0,371	1,27 : 1	2,6	0,0266

Na wykresie na rys. 4. przedstawiono uzyskane zależności natężenia przepływu przez gruzowisko zawałowe o porowatości $n = 50\%$ od kąta nachylenia modelu dla badanych mieszanin popiołowo-wodnych. Mieszaniny z udziałem popiołów lotnych oraz odpadu flotacji rud Zn-Pb (OF3) sporządzono przy rozlewności $R = 180$ mm. Najmniejsze natężenie przepływu wykazuje mieszanina odpadu flotacji z ZG „Trzebieńka” (OF3). Mieszaniny popiołowo-wodne, ze wszystkich rodzajów popiołów lotnych, wykazują zbliżony przebieg zależności natężenia przepływu od kąta nachylenia. W zakresie kątów do 10° , wartości natężenia przepływu mieszanin popiołowo-wodnych są do siebie zbliżone; przedział ich zmienności wzrasta przy większym nachyleniu modelu. Przy kącie nachylenia do 10° , wielkości natężenia przepływu mieszanin popiołowo-wodnych są zbliżone do wyników uzyskanych dla emulsji, jednak już od kąta nachylenia modelu równego 15° natężenie przepływu mieszanin popiołowo-wodnych jest nieznacznie większe niż dla emulsji.



Rys. 4. Porównanie przebiegu zmienności natężenia przepływu w zależności od kąta nachylenia modelu gruzowiska o porowatości $n = 50\%$ dla wybranych mieszanin odpadów flotacyjnych, popiołowo-wodnych i wody. Mieszanina OF3 oraz popiołowo-wodne (RP, RB, LP i LB) o rozlewności 180 mm

Fig. 4. Variability of flow rate as a function of inclination angle by flow of selected slurries through the rock fall zone model with porosity $n = 50\%$. Slurry OF3 and fly ash – water slurries (RP, RB, LP i LB) with spill radius of 180 mm

Wykres na rys. 4. ilustruje także znaczące podobieństwo wyników pomiaru natężenia przepływu mieszanin odpadów flotacji węgla kamiennego (OF1 i OF2) oraz wody. Jedynie przy kącie nachylenia modelu wynoszącym 5° zaobserwowano nieznacznie mniejsze wartości natężenia przepływu mieszanin OF1 i OF2, w porównaniu z wartością zaobserwowaną przy przepływie wody.

4. Analiza zmian własności mieszanin drobnofrakcyjnych zachodzących w trakcie przepływu przez model gruzowiska zawalowego

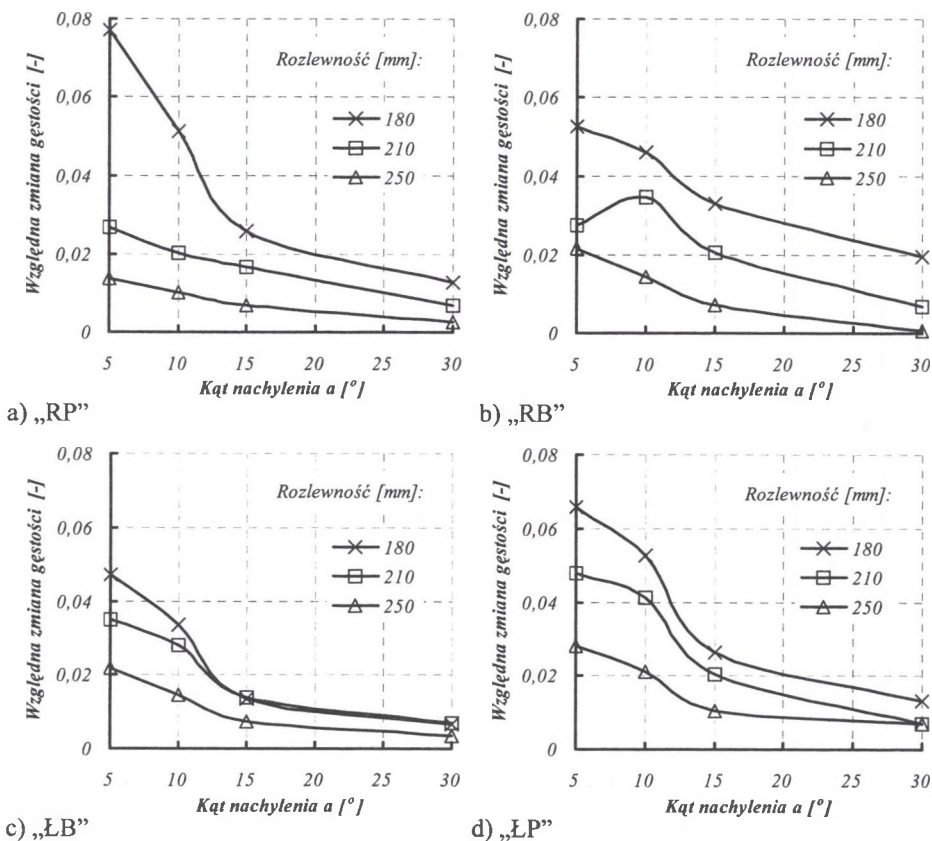
Podczas przepływu mieszaniny drobnofrakcyjnej przez zroby zawalowe, pustki w gruzowisku ulegają stopniowemu wypełnianiu przez osiadające ziarna części stałych, kłępując możliwość dalszego ruchu mieszaniny, przy czym następuje spadek koncentracji

części stałych i zmiany własności reologicznych mieszaniny. W warunkach badań na modelu gruzowiska zawałowego, efektem wypełniania wolnych przestrzeni jest spadek koncentracji części stałych w mieszaninie wypływającej z modelu. W zależności od szeregu czynników zmienia się natężenie przepływu mieszaniny przez model oraz następuje spadek gęstości i koncentracji objętościowej mieszaniny. Zmniejszenie zawartości części stałych w mieszaninie oraz zmiany składu ziarnowego transportowanego materiału powodują zmiany własności reologicznych mieszaniny.

W odniesieniu do przepływu mieszanin odpadów flotacji węgla, które charakteryzowały się niską gęstością (1045 i 1030 kg/m³) nie było możliwe ustalenie zmian gęstości wypływającej mieszaniny w zależności od kąta nachylenia modelu.

Na wykresach na rys. 5. przedstawiono zależność względnego spadku gęstości mieszaniny popiołów lotnych od kąta nachylenia modelu, przy stałej porowatości gruzowiska zawałowego $n = 50\%$. Jak wynika z przedstawionych danych, największe spadki gęstości mieszaniny popiołowo-wodnej występują dla mieszanin o rozlewności $R = 180$ mm, tj. mieszanin o największej koncentracji części stałych. Gęstość mieszanin popiołowo-wodnych o rozlewności $R = 180$ mm zmienia się od 0,67%, dla mieszaniny sporządzonej z popiołu „LP” przy nachyleniu gruzowiska równym 30°, do 7,69% dla mieszaniny z zastosowaniem popiołu „RP” przy kącie nachylenia 5°. Zwiększenie rozlewności mieszanin do 210 mm wiąże się ze spadkiem koncentracji części stałych i obniżeniem lepkości mieszaniny, co prowadzi do wzrostu natężenia przepływu przez model zrobów i zmniejszenia spadku gęstości, następującego w wyniku przepływu przez zroby. Spadek gęstości mieszaniny wynosi w tym przypadku od 0,68% (przy kącie nachylenia 30°) do 4,79% przy nachyleniu modelu 5°, przy czym obie wartości skrajne dotyczą mieszaniny sporządzonej z popiołu „LB”.

Dalsze ograniczanie koncentracji części stałych w mieszaninie, wyrażające się obniżeniem rozlewności do $R = 250$ mm prowadzi do dalszego zmniejszenia się wartości spadku gęstości mieszaniny, następującego w wyniku przepływu przez gruzowisko. Zakres spadku gęstości mieszaniny, zachodzący na skutek przepływu przez model gruzowiska mieszaniny o rozlewności $R = 250$ mm, wynosi od 0,07% dla mieszaniny sporządzonej z popiołu „RB” przy nachyleniu modelu 30°, do 2,80% przy nachyleniu 5° dla mieszaniny z popiołu „LB”. Bez względu na rodzaj popiołu lotnego i rozlewność sporządzonej mieszaniny największy spadek gęstości obserwuje się dla małych kątów nachylenia, do 15°.

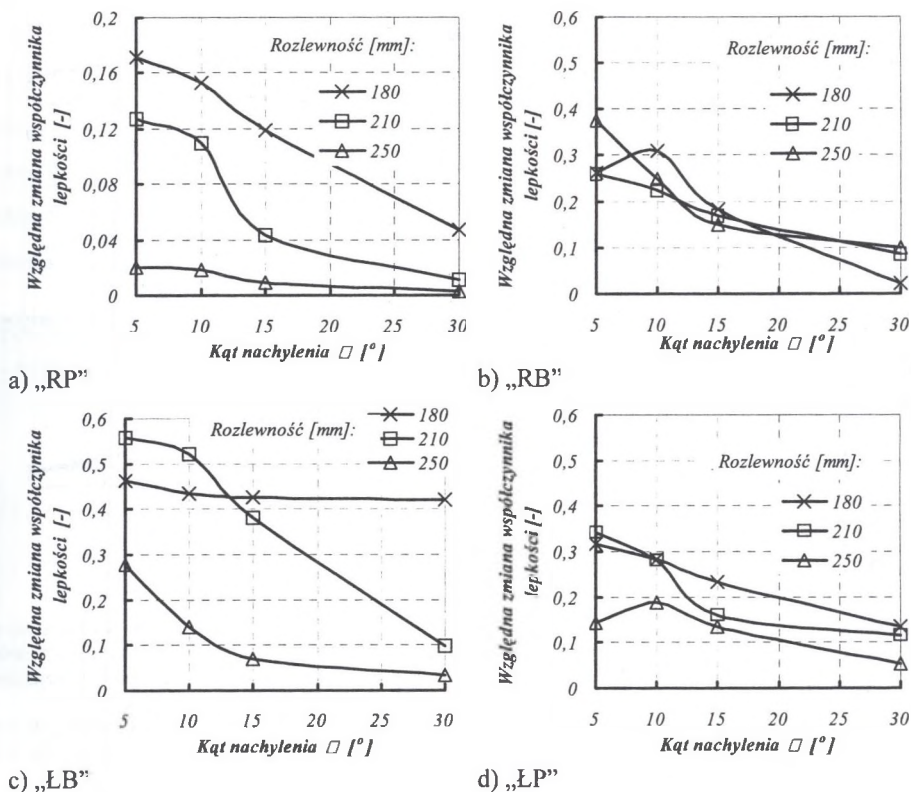


Rys. 5. Względna zmiana gęstości mieszaniny popiołowo-wodnej w wyniku przepływu mieszaniny przez model gruzowiska zawałowego, w zależności od kąta nachylenia modelu gruzowiska i rozlewności mieszaniny, dla mieszanin sporządzonych z poszczególnych rodzajów popiołów lotnych (opis oznaczeń w tekście)

Fig. 5. Relative change of density of fly ash – water slurry resulted from the flow through the model of roof rock fall zone as a function of inclination angle of the model and spill radius of the slurry. Symbols of slurries described in text

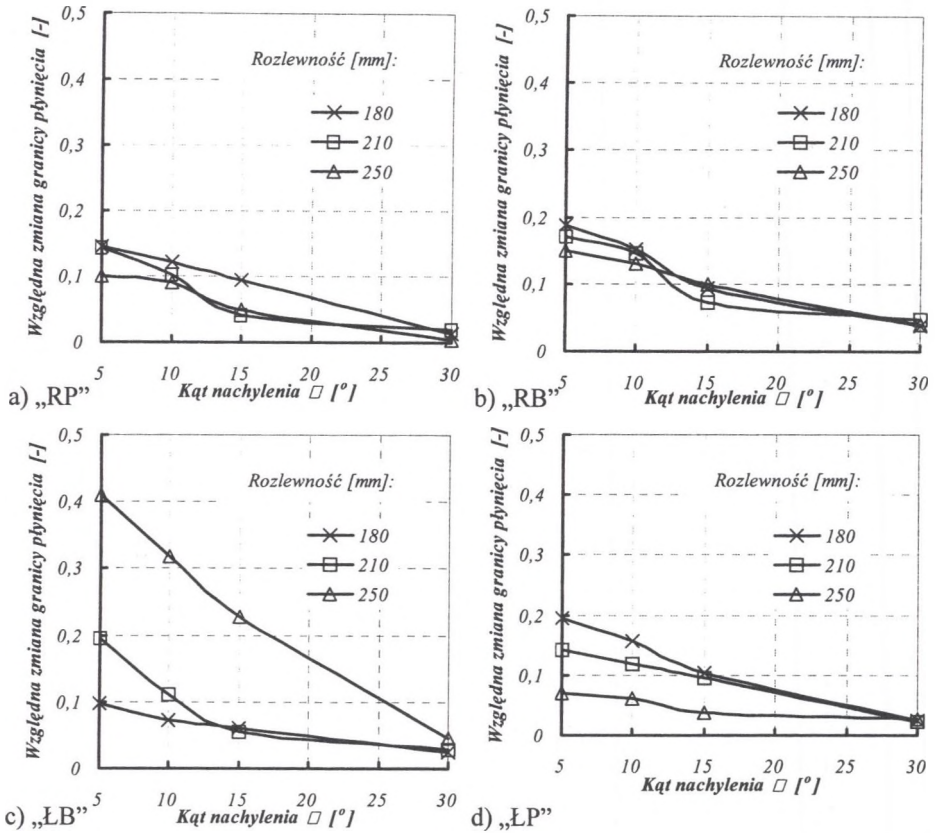
W wyniku przepływu przez zroby zawałowe, wraz ze spadkiem gęstości mieszaniny popiołowo-wodnej, następują także zmiany ich własności reologicznych. Na rys. 6 przedstawiono przebieg spadku lepkości badanych mieszanin popiołowo-wodnych, jakie zachodziły w nich w wyniku przepływu przez model gruzowiska zawałowego. Kolejne wykresy, rys. 7., przedstawiają zaobserwowane zmiany wartości granicy płynięcia. Jak wynika z przedstawionych wykresów, skala zmian wartości parametrów reologicznych, będących skutkiem spadku zawartości części stałych w mieszaninach popiołowo-wodnych, zachodzących podczas przepływu przez model gruzowiska są zróżnicowane i zależą zarówno od rozlewności mieszanin i kąta nachylenia modelu gruzowiska, jak i od rodzaju popiołu lotnego. Najmniejsze zmiany wartości parametrów reologicznych obserwuje się dla mieszanin

z udziałem popiołu „RP” – rys. 6a. i rys. 7a., dla których spadek współczynnika lepkości wynosi maksymalnie około 17% dla mieszaniny o rozlewności $R = 180$ mm i 12,7%, dla mieszaniny o rozlewności $R = 210$ mm, przy kącie nachylenia gruzowiska wynoszącym 5° . Dla mieszaniny o rozlewności $R = 250$ mm zmiany wartości współczynnika lepkości są znikome i wynoszą maksymalnie około 2%.



Rys. 6. Względna zmiana współczynnika lepkości mieszaniny popiołowo-wodnej w wyniku przepływu mieszaniny przez model gruzowiska zawalowego, w zależności od kąta nachylenia modelu gruzowiska i rozlewności mieszaniny, dla mieszanin sporządzonych z poszczególnych rodzajów popiołów lotnych (opis oznaczeń w tekście)

Fig. 6. Relative change of coefficient of viscosity of fly ash – water slurry resulted from the flow through the model of roof rock fall zone as a function of inclination angle of the model and spill radius of the slurry. Symbols of slurries described in text



Rys. 7. Względna zmiana granicy płynięcia mieszaniny popiołowo-wodnej w wyniku przepływu mieszaniny przez model gruzowiska zawałowego, w zależności od kąta nachylenia modelu gruzowiska i rozlewności mieszaniny, dla mieszanin sporządzonych z poszczególnych rodzajów popiołów lotnych (opis oznaczeń w tekście)

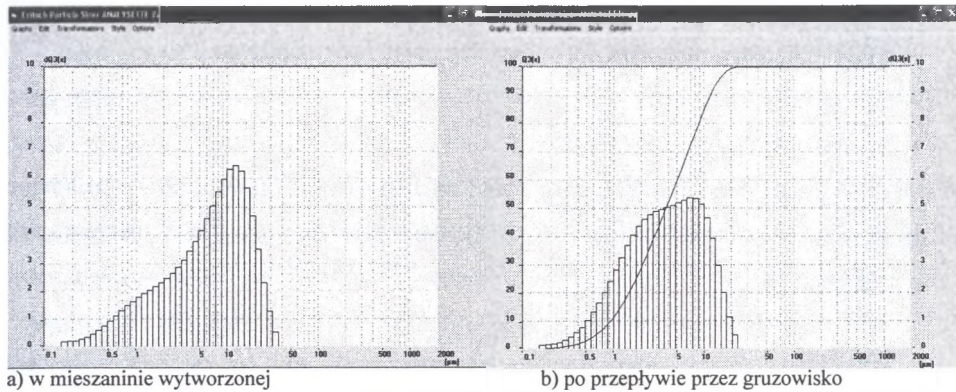
Fig. 7. Relative change of yield stress of fly ash – water slurry resulted from the flow through the model of roof rock fall zone as a function of inclination angle of the model and spill radius of the slurry. Symbols of slurries described in text

Największe zmiany wartości współczynnika lepkości obserwuje się dla mieszanin sporządzonych z popiołu lotnego „LB”. Przy kącie nachylenia modelu 5°, spadki wartości współczynnika lepkości wynoszą od około 28%, dla mieszaniny o rozlewności $R = 250$ mm, do nieco ponad 46% dla mieszaniny o rozlewności $R = 180$ mm (rys.6c).

Również zmiany wartości granicy płynięcia są największe dla mieszanin z udziałem popiołu „LB” – rys. 7c. W szczególności mieszanina o rozlewności $R = 250$ mm charakteryzuje się znaczną zmiennością granicy płynięcia, która ulega zmniejszeniu o około 41%, przy nachyleniu modelu równym 5° i 4,5%, przy nachyleniu 30°. Dla mieszanin o mniejszej rozlewności oraz dla mieszanin sporządzonych z innych rodzajów popiołów lotnych obserwowane wielkości spadku granicy płynięcia są mniejsze i nie przekraczają 20%, przy

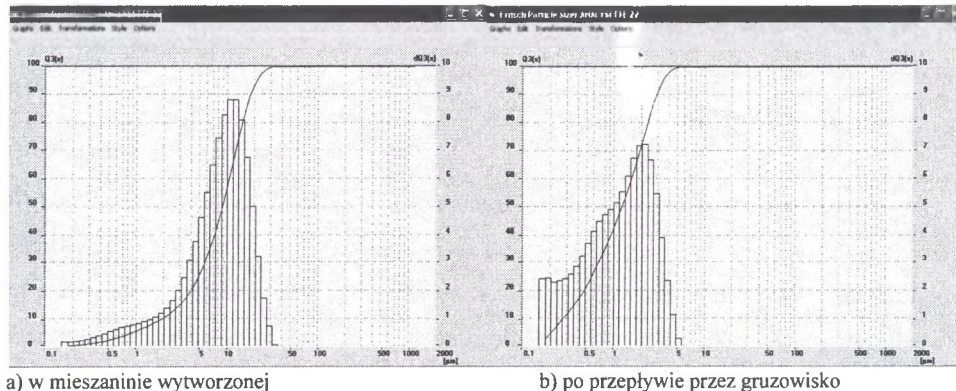
najmniejszym kącie nachylenia modelu gruzowiska. Ogólnie można stwierdzić, że zmiany koncentracji mieszaniny wywierają większy wpływ na zmianę lepkości mieszaniny niż na wielkość granicy płynięcia. Zmiany te, w większości przypadków, są bardziej intensywne w zakresie mniejszych kątów nachylenia – do 15° .

Jak już wspomniano wcześniej, zmianom koncentracji części stałych w mieszaninie towarzyszą także zmiany składu ziarnowego, transportowanego materiału. Przykładowe wyniki analiz składu ziarnowego dla odpadu flotacji OF2 oraz popiołu lotnego RB przedstawiono na wykresach na rys. 8 i 9. Jak wynika z przebiegu krzywych składu ziarnowego, wykonanych dla części stałych mieszanin z udziałem odpadu flotacji OF2 i popiołu lotnego RB przed i po przepływie przez model gruzowiska, ziarna części stałych unieruchomione w gruzowisku reprezentują przede wszystkim najgrubsze frakcje ziarnowe danego rodzaju odpadu.



Rys. 8. Wyniki analizy składu granulometrycznego odpadu flotacji OF2

Fig. 8. Grain-size distribution of flotation tailing OF2 (a – in prepared slurry, b – after flow through the rock fall zone)



Rys. 9. Wyniki analizy składu granulometrycznego popiołu lotnego RB

Fig. 9. Grain-size distribution of RB fly ash (a – in prepared slurry, b – after flow through the rock fall zone)

5. Wpływ parametrów mieszaniny drobnofrakcyjnej na natężenie przepływu przez gruzowisko zawałowe

W wyniku analizy statystycznej wyników pomiarów przepływu mieszanin popiołowo-wodnych uzyskano (drogą poszukiwania optymalnej funkcji regresji) następującą zależność empiryczną, zapewniającą największy współczynnik korelacji wartości estymowanych z mierzonymi:

$$Q = n^{e_1} R^{e_2} \Delta p^{e_3} \rho_2^{e_4} \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_w} \right)^{e_5} + e_6 \quad [\text{dm}^3/\text{min}], \quad (1)$$

gdzie:

- n – porowatość modelu gruzowiska,
- R – rozlewność wytworzonej mieszaniny, mm,
- ρ_2 – gęstość mieszaniny po przepływie, kg/m^3 ,
- η_1 i η_2 – współczynnik lepkości mieszaniny przed i po przepływie, Pa·s,
- η_w – lepkość wody, Pa·s.
- $e_1 \div e_6$ – współczynniki.

Jednostkowy spadek ciśnienia Δp uwzględnia wysokość słupa mieszaniny w kolumnie zasilającej, różnicę wysokości między wlotem i wylotem oraz zmianę gęstości mieszaniny na drodze przepływu:

$$\Delta p = \frac{\rho_1 g h_p + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} g L \sin \alpha}{L} \quad [\text{Pa}/\text{m}] \quad (2)$$

gdzie:

- ρ_1 – gęstość mieszaniny przed przepływem (wytworzonej), kg/m^3 ,
- h_p – wysokość rury wlotowej, m,
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,
- α – kąt nachylenia modelu gruzowiska, °,
- L – długość modelu gruzowiska, m.

Postać równania (1) wskazuje, że na natężenie przepływu mieszanin popiołowo-wodnych przez gruzowisko zawałowe istotny wpływ wywierają lepkość mieszaniny i jej rozlewność. Wpływ zmian własności mieszaniny na skutek sedymentacji części stałych w pustkach na natężenie przepływu ujęty jest poprzez uwzględnienie zmiany gęstości i lepkości mieszaniny. Jakości estymacji nie zwiększa uwzględnienie granicy płynięcia mieszaniny, co jest zgodne z wynikami badań innych badaczy. Według [3], granica płynięcia mieszaniny wywiera wpływ

na zasięg rozprywu mieszaniny w gruzowisku, natomiast lepkość wpływa na natężenie przepływu.

Wykorzystanie zależności (1) jest jednak mało przydatne w praktyce, z uwagi na konieczność pomiaru gęstości i własności reologicznych mieszaniny wpływającej ze zrobów. Dla uniknięcia tych niedogodności wyznaczono uproszczoną zależność w postaci:

$$Q = \sqrt[3]{\Delta p \sqrt{nR}} + e, \quad [\text{dm}^3/\text{min}] \quad (3)$$

W funkcji określonej równaniem (3) przyjęto, że do obliczenia wartości jednostkowego spadku ciśnienia zastosować można uproszczenie, polegające na przyjęciu, że $\rho_1 = \rho_2$. W ten sposób zmienność natężenia przepływu Q uzależniona jest jedynie od parametrów mieszaniny wytworzonej (przed przepływem). Ponadto, zredukowano liczbę współczynników do jednego. Funkcja w postaci (3) charakteryzuje się nieznacznie gorszą jakością estymacji, w porównaniu z funkcją w postaci (1) i wymaga jedynie znajomości prostych do określenia parametrów mieszaniny, tj. jej rozlewności i gęstości.

Istotnym spostrzeżeniem wydaje się być, że do opisu własności reologicznych mieszaniny popiołowo-wodnej wystarcza znajomość rozlewności mieszaniny. Spostrzeżenie to stoi w zgodzie z tezami zawartymi w pracy [1] i innych opracowaniach z zakresu reometrii mieszanin drobnofrakcyjnych, sugerujących, że stosowanie klasycznych wiskozymetrów rotacyjnych do pomiaru własności reologicznych takich mieszanin prowadzi do błędów pomiarowych. Test rozlewności wykonywany przy użyciu kubka wiskozymetrycznego nie zastępuje w pełni pomiaru reometrycznego, natomiast dostarcza informacji na temat reologii badanej mieszaniny, wystarczającej do przeprowadzenia wyżej opisanych obliczeń.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania przepływu mieszaniny wybranych rodzajów odpadów drobnofrakcyjnych przez model gruzowiska zawałowego pozwalają stwierdzić, że możliwe jest uzyskanie empirycznej zależności pozwalającej na wyznaczanie wielkości natężenia objętościowego przepływu mieszaniny przez zroby, w oparciu o znajomość podstawowych własności fizycznych mieszanin i parametrów gruzowiska zawałowego.

Na dotychczasowym etapie badań stwierdzić można, że największy poziom zgodności modelu matematycznego z wynikami pomiarów zapewniają równania uwzględniające zmiany gęstości i lepkości mieszaniny, zachodzące na drodze przepływu przez gruzowisko.

W przypadku braku możliwości wykonania badań wiskozymetrycznych mieszaniny pobranej w pewnej odległości od miejsca wypływu, istnieje możliwość wykonania obliczeń o nieco mniejszej dokładności, jedynie w oparciu o wyniki pomiarów gęstości i rozlewności wytworzonej mieszaniny, przed jej wprowadzeniem do zrobów.

W odniesieniu do przepływu mieszanin odpadów flotacji o małej koncentracji części stałych, można stwierdzić, że ich zależności natężenia przepływu od parametrów geometrycznych gruzowiska w znacznym stopniu są zgodne z odpowiednimi zależnościami dla przepływu wody.

Stosowanie różnych rodzajów popiołów lotnych do wytwarzania mieszanin do doszczelniania zrobów zawałowych powoduje daleko idące zróżnicowanie parametrów przepływu i efektywności procesu doszczelniania. Zastosowanie kryterium stałej rozlewności do sporządzania mieszanin z różnych odpadów drobnofrakcyjnych zapewnia zbliżone warunki przepływu w rurociągach transportowych, natomiast optymalizacja warunków przepływu i rozprywu mieszaniny w gruzowisku, w każdym przypadku wymaga uwzględnienia wyników badań laboratoryjnych mieszanin z przewidzianym do zastosowania rodzajem odpadu.

LITERATURA

1. Ferraris C.F., Brower L.E.: Comparison of Concrete Rheometers. *Concrete International*, Vol. 25, No. 8, pp. 41-47, August 2003.
2. Hollinderbäumer E.W., Mez W.: Viscosity Controlled Production of High Concentration Backfill Pastes. *Proceedings of Sixth International Symposium on Mining with Backfill*, Brisbane, Australia, 19 – 23 April 1998, pp. 43 – 47.
3. Lombardi G.: The Role of The Cohesion in Cement Grouting of Rock. *15th Congress on Large Dams*, Lausanne, Switzerland, Q.58.–R.13., 1985, pp. 235–260.
4. Plewa F., Mysłek Z.: *Zagospodarowanie odpadów przemysłowych w podziemnych technologiach górniczych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Czaja, prof. nadzw. AGH