

Beata Malczewska, Stanisław Czaban, Robert Głowski, Robert Świerzko, Tadeusz Kiwacz, Jerzy Sobota

## Badania liniowych strat ciśnienia podczas przepływu mieszaniny dwufazowej w rurociągu na przykładzie mieszaniny popiołowo-wodnej

Zagospodarowanie substancji poprodukcyjnych z przemysłu energetycznego stanowi istotny problem badawczy, wynikający z rosnących wymagań związanych z utylizacją odpadów. W wielu krajach popioły traktowane są jako cenny surowiec do produkcji betonu, cementu czy wypełniania odkrywek po wyrobiskach kopalnianych [1–4]. Na ogół popioły transportowane są za pomocą rurociągów na składowisko, z którego następnie kierowane są do dalszej utylizacji. Praktyka inżynierska pokazała, iż jest to forma transportu o znikomym wpływie na środowisko naturalne, co więcej, umożliwia zmniejszenie zużycia energii. Wadą tego typu transportu jest znaczne zużycie wody, gdyż w przypadku transportu rurowego materiałów sypkich cieczą nośną jest zwykle woda. Zwiększenie gęstości transportowanych rurami mieszanin może przyczynić się do znacznego ograniczenia zużywanych ilości wody. Z drugiej strony większa gęstość transportowanego materiału związana jest ze zmianą lepkości. Dodatkowo na proces płynięcia takich układów mają wpływ rozmiar i kształt cząstek. W badaniach właściwości reologicznych układów dyspersyjnych, jakimi są mieszaniny wysokozagęszczone, stosuje się dwie podstawowe metody – metodę teorii strukturalnych, w których właściwości reologiczne układów dyspersyjnych uzależnia się od właściwości ich składników oraz metodę modeli reologicznych, które przedstawiają makroskopowy przebieg zjawiska. W zależności od rodzaju cieczy stosuje się różne wzory matematyczne opisujące jej zachowanie się podczas przepływu w rurociągach. Do opisu właściwości reologicznych mieszanin dwufazowych wykorzystuje się następujące modele cieczy: newtonowskie, pseudoplastyczne (Ostwalda de Waelle), zagęszczone ścinaniem, liniowe plastycznolepkie (binghamowskie) i nieliniowe plastycznolepkie (Cassona, Herschela-Bulkleya). Podstawowymi problemami związanymi z przepływem cieczy nienewtonowskich jest prawidłowe określenie oporów przepływu cieczy,

zużycia energii podczas mieszania i skuteczności mieszania, a także zagadnienia związane z przewodnictwem cieplnym podczas przepływu i mieszania [5]. W pracach [6, 7] zaproponowano określenie strat ciśnienia w rurociągach przemysłowych jedynie na podstawie badań wiskozymetrycznych. Badania wielu autorów wykazały, że przy hydrotransportie mieszanin zawierających drobne cząstki ( $0,05 \div 0,01$  mm i mniejsze), może występować asymetria rozkładu ich lokalnej zawartości, uziarnienia i lepkości pozornej, co komplikuje opis zjawiska uogólnionym modelem. Prace dotyczące optymalizacji modeli transportu rurowego mieszanin prowadzono w wielu krajach [7]. Mieszaniny dwufazowe transportowane w rurociągach mogą mieć właściwości reologiczne materiałów newtonowskich lub nienewtonowskich, co utrudnia jednoznacznie określenie właściwego modelu opisującego ich przepływ. Podczas przepływu cieczy w przewodzie powstają dwa rodzaje strat hydraulicznych. Jedne wywołane są oporami liniowymi i są związane z tarcieniem strumienia lepkiej cieczy o ścianki rurociągu, natomiast opory miejscowe powstają na skutek przepływu strumienia przez elementy konstrukcyjne rurociągu, które powodują lokalne geometryczne odkształcenia strumienia [8].

Zmniejszenie oporów przepływu zagęszczonych mieszanin w rurociągu jest jednym z priorytetów podczas transportu mieszanin dwufazowych, gdyż ogranicza nakłady energetyczne na transport, a tym samym wpływa na wydłużenie czasu pracy pomp [9]. Opracowanie modeli opisujących przepływ wysokozagęszczonych mieszanin w rurociągach powinno być oparte w większości przypadków na wynikach badań laboratoryjnych, które umożliwiają prawidłowe określenie zależności strat ciśnienia od prędkości przepływu oraz średnicy rurociągu i zawartości części stałych w mieszaninie.

Głównym celem pracy było określenie właściwości płynięcia zagęszczonych mieszanin popiołowo-wodnych za pomocą odpowiedniego modelu reologicznego. W kolejnym kroku obliczono straty ciśnienia przy przepływie analizowanej mieszaniny na podstawie dobranej modelu, a następnie przeprowadzono weryfikację otrzymanych rezultatów obliczeń z wynikami badań półtechnicznych przeprowadzonych w instalacji doświadczalnej.

### Zakres i metodyka badań

Podstawowy zakres pracy obejmował dopasowanie właściwego modelu przepływu do badanej mieszaniny, wykorzystując metody matematyczne oszacowania błędu. Następnie określono liniowe straty ciśnienia zgodnie

Dr inż. B. Malczewska, prof. dr hab. inż. S. Czaban, dr inż. R. Głowski: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Inżynierii Wodnej i Hydrotransportu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, [beata.malczewska@up.wroc.pl](mailto:beata.malczewska@up.wroc.pl), [stanislaw.czaban@up.wroc.pl](mailto:stanislaw.czaban@up.wroc.pl), [robert.glowski@up.wroc.pl](mailto:robert.glowski@up.wroc.pl)

Dr inż. R. Świerzko: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Mechaniki i Konstrukcji Inżynierskich, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław [robert.swierzko@up.wroc.pl](mailto:robert.swierzko@up.wroc.pl)

Mgr inż. T. Kiwacz: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Laboratorium Geotechniczne, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, [tadeusz.kiwacz@up.wroc.pl](mailto:tadeusz.kiwacz@up.wroc.pl)

Prof. dr hab. inż. J. Sobota: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław [jerzy.sobota@up.wroc.pl](mailto:jerzy.sobota@up.wroc.pl)

z metodyką podaną w pracy [10] oraz porównano obliczone wartości strat ciśnienia według wybranych modeli z wartościami uzyskanymi z pomiarów przeprowadzonych w doświadczalnej instalacji rurowej.

Zakres reologicznych badań laboratoryjnych obejmował pomiary krzywych płynięcia. Do określenia cech reologicznych mieszaniny wody i popiołu zastosowano viskozometr rotacyjny firmy HAAKE, złożony z dwóch współosiowych cylindrów, wewnętrznego ruchomego cylindra pomiarowego oraz nieruchomego zewnętrznego, stanowiącego zarazem pojemnik na badaną próbkę mieszaniny. Zarówno kontrola systemu, jak i akwizycja danych pomiarowych były realizowane z poziomu komputera.

Do otrzymania założonego stosunku wagowego składników mieszaniny odważono odpowiednie ilości popiołu i połączono je z wodą w proporcjach wagowych 0,7:1,0, 0,8:1,0, 0,9:1,0 i 1,3:1,0. W każdej tak przygotowanej próbce określono zawartość substancji stałych metodą wagową ( $C_s$ ), która zmieniała się w zakresie od 0,41% do 0,59%, przy czym gęstość mieszaniny wynosiła od 1377 kg/m<sup>3</sup> do 1628 kg/m<sup>3</sup>. Zakres badań obejmował wykonanie pomiarów przepływu mieszaniny popiołowo-wodnej w rurociągu przy możliwie dużej zawartości popiołu.

Aby zaobserwować zmiany właściwości reologicznych mieszaniny w czasie, krzywe płynięcia zmierzono z zadanyim krokiem czasowym ( $t$ ) równym: 0 min, 5 min, 15 min, 30 min, 60 min i 90 min od momentu przygotowania mieszaniny. Pomiędzy pomiarami obserwowano zjawisko sedimentacji grubszych frakcji popiołu na dnie naczynia.

Instalacja doświadczalna była wyposażona w przyrządy umożliwiające pomiar średniej prędkości przepływającej mieszaniny, strat ciśnienia na długości rurociągu, temperatury mieszaniny oraz granicznej prędkości sedimentacji popiołu. Straty ciśnienia wyznaczono w następujących warunkach:

- długość rurociągu  $l=8000$  m,
- średnica zewnętrzna rurociągu  $d_z=219,1$  mm,
- grubość ścianek rurociągu  $g=11$  mm,
- średnica wewnętrzna rurociągu  $d=197,1$  mm,
- średnia prędkość przepływu  $v=1,82$  m/s,
- geometryczna wysokość podnoszenia 75 m,
- chropowatość ścianek rurociągu  $k=1$  mm.

Pomiar oporów przepływu przeprowadzono mierząc różnicę ciśnień na długości odcinka pomiarowego, po czym wyniki przeliczono na 2 mb długości rurociągu, w którym przeprowadzono pomiary.

### Interpretacja wyników badań laboratoryjnych

Pomiary reologiczne przeprowadzono w warunkach przepływu laminarnego z pominięciem strefy ściskania bliskiej zera [9, 11–16]. Rezultaty pomiarów otrzymano w postaci krzywych płynięcia, będących funkcją zależnością naprężeń ścinających od zadanej prędkości ścinania. Do opisu krzywych płynięcia wybrano model jednoparametrowy (Newtona), dwa modele dwuparametrowe (potęgowej Ostwalda de Waele'a oraz Bingham'a) oraz jeden model trójparametrowy (Herschela-Bulkleya).

Model jednoparametrowy Newtona opisuje zależność:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

w której:

- $\tau$  – naprężenia styczne, Pa
- $\eta$  – lepkość plastyczna, Pa·s
- $\dot{\gamma}$  – prędkość ścinania, 1/s

Model potęgowej Ostwalda de Waele'a ma następującą postać:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

w której:

- $k$  – współczynnik konsystencji, Pa·s<sup>n</sup>
- $n$  – wskaźnik płynięcia

Model dwuparametrowy Bingham'a jest opisany zależnością:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

w której:

$\tau_0$  – próg płynięcia, Pa

Model trójparametrowy Herschela-Bulkleya często jest stosowany do opisu mieszanin dwufazowych, gdzie występuje wyraźny próg płynięcia (po przekroczeniu którego następuje początek płynięcia mieszaniny):

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

Do oceny poprawności doboru modelu reologicznego zastosowano średni błąd kwadratowy zgodnie z metodyką opisaną w pracy [10]. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, iż badane mieszaniny dobrze opisywał jednowymiarowy model Newtona. Wyznaczone parametry najlepiej dopasowanego modelu reologicznego (modelu Newtona) mieszaniny o stosunku wagowym popiołu do wody 1,3:1,0 przedstawiono w tabeli 1.

Badane mieszaniny miały właściwości tiksotropowe. Tiksotropia jest to proces ciągłego zmniejszania lepkości pozornej w warunkach ścinania wraz z późniejszym odzyskaniem lepkości w warunkach spoczynku [12, 13, 17]. W przypadku zawiesin ceramicznych tiksotropię określa się za pomocą pomiarów powierzchni pół pętli histerezy krzywych lepkości i krzywych płynięcia, a także za pomocą pomiarów wskaźnikowych. Ze względu na tiksotropowy charakter analizowanych mieszanin, parametry reologiczne modeli wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów w przypadku krzywej wznoszącej i opadającej. Analizowane mieszaniny pozostawione w spoczynku przez 1 h charakteryzowały się tendencją do sedimentacji cząstek stałych oraz częściową odbudową struktury tiksotropowej.

Tabela 1. Parametry reologiczne mieszaniny przy stosunku popiołu do wody 1,3:1,0  
Table 1. Rheological parameters of ash-water mixture at the ratio of 1.3:1.0

t, min	Model Newtona $\eta$ , Pa·s
część wznosząca	
0	0,5319
5	0,5897
15	0,5473
30	0,5619
60	0,8179
część opadająca	
0	0,5319
5	0,5897
15	0,5473
30	0,6220
60	0,5874

Przy laminarnym przepływie cieczy współczynnik oporów liniowych ( $\lambda$ ) jest funkcją liczby Reynoldsa ( $Re$ ), natomiast przy przepływie turbulentnym współczynnik ten zależy od chropowatości rurociągu [10]. W przypadku cieczy nienewtonowskich liczba Reynoldsa jest różnie definiowana, a znaczna liczba wzorów doświadczalnych utrudnia wybór odpowiedniej zależności [11]. Obliczenie liniowych strat ciśnienia (tab. 2) wykonano zgodnie z metodą podaną w pracy [10]. Znając parametry modelu reologicznego przy znanym strumieniu objętości mieszaniny i średnicy rurociągu można obliczyć średnią prędkość przepływu oraz straty liniowe. W przypadku mieszaniny o stosunku wagowym popiołu do wody równym 0,7:1,0 liniowe straty ciśnienia wyniosły od 26,1 bar do 28,2 bar w zależności od czasu przygotowania mieszaniny. Obliczone liniowe straty ciśnienia w przypadku mieszaniny o stosunku wagowym popiołu do wody równym 0,9:1,0 mieściły się w zakresie od 31,8 bar do 35,5 bar. Przepływ mieszaniny o stosunku wagowym popiołu do wody 1,3:1,0 w rurociągu charakteryzował ruch laminarny, a liniowe straty ciśnienia gwałtownie rosły do 64 bar, przy czym po upływie 90 min analizowana mieszanina zmieniła charakter płynięcia, tj. stała się niepłynąca (tab. 1). Dlatego też w dalszych obliczeniach przyjęto czasy do 60 min od momentu przygotowania mieszaniny (tab. 2).

Tabela 2. Liniowe straty ciśnienia podczas przepływu mieszaniny przy stosunku popiołu do wody 1,3:1,0 ( $v=1,82$  m/s,  $\rho=1628$  kg/m<sup>3</sup>)

Table 2. Linear pressure losses for ash-water mixture at the ratio of 1.3:1.0 ( $v=1.82$  m/s,  $\rho=1628$  kg/m<sup>3</sup>)

Część wznosząca						
t min	$\eta$ Pa·s	Re	$\lambda$	Strata liniowa		$H_c$ bar
				mH <sub>2</sub> O	bar	
0	0,5319	1098	0,0583	399,4	39,4	51,5
5	0,5897	990	0,0646	442,8	43,7	55,8
15	0,5473	1067	0,0600	411,0	40,6	52,6
30	0,5619	1039	0,0616	422,0	41,6	53,7
60	0,8179	714	0,0896	614,2	60,6	72,7
część opadająca						
0	0,5907	989	0,0647	443,6	43,8	55,8
5	0,6121	954	0,0671	459,7	45,4	57,4
15	0,6121	954	0,0671	459,7	46,1	57,4
30	0,6220	939	0,0682	467,1	43,5	58,1
60	0,5874	994	0,0644	441,1	64,3	55,6

t – czas; min,  $\eta$  – lepkość plastyczna, Pa·s; Re – liczba Reynoldsa  
 $\lambda$  – współczynnik oporów liniowych,  $H_c$  – ciśnienie w pompie, bar

## Interpretacja wyników badań półtechnicznych

Po napełnieniu instalacji wodą i uruchomieniu pomp wprowadzono do instalacji założoną ilość popiołu. Następnie wykonano pomiar liniowych strat ciśnienia w funkcji prędkości przepływu mieszaniny oraz pobrano próbki do wyznaczenia zawartości oraz gęstości popiołu. W ramach przeprowadzonych badań wykonano dziesięć pomiarów w zakresie założonej prędkości średniej. Spadek hydrauliczny przy przepływie mieszanin wielofrakcyjnych w rurociągu będzie wypadkową wpływu cząstek grubych i drobnych [7, 10], który można opisać następującą zależnością:

$$I_m = I_c + \Delta I_n + \Delta I_p = I_n + \Delta I_p \quad (5)$$

w której:

$I_m$  – spadek hydrauliczny mieszaniny wielofrakcyjnej

$I_c$  – spadek hydrauliczny podczas przepływu cieczy (wody) z tą samą prędkością co mieszanina

$\Delta I_n$  – spadek hydrauliczny powodowany obecnością drobnych ziaren

$\Delta I_p$  – dodatkowy spadek hydrauliczny wynikający z obecności grubych ziaren w strumieniu cieczy i powodowany poślizgiem międzyfazowym

$I_n$  – spadek hydrauliczny mieszaniny złożonej z wody i bardzo drobnych ziaren

Elementami decydującymi o wartości spadku hydraulicznego są ciecz nośna, poślizg międzyfazowy i rozkład gęstości w przekroju poprzecznym rurociągu [7]. Z przekształconego wzoru Darcy-Weisbacha do wyznaczenia liniowych strat ciśnienia przy przepływie cieczy newtonowskiej obliczono wartości współczynnika oporów liniowych. W przypadku analizowanych próbek liniowe straty ciśnienia wynosiły od 0,01848 mH<sub>2</sub>O/mb do 0,08701 mH<sub>2</sub>O/mb. Obliczony współczynnik oporów liniowych zmienił się w zakresie od 0,0227 do 0,0247. W trakcie prowadzonych badań liczba Reynoldsa zmieniała się w przedziale od 360 899 do 816 719. Liniowe straty ciśnienia przy przepływie mieszaniny z prędkością średnią 1,82 m/s przedstawiono w tabeli 3. Pomiary półtechniczne pokazały, że mieszanina o założonym udziale popiołu do wody równym 1,3:1,0 była płynąca, pomimo iż podczas pomiarów viskozymetrycznych wystąpiły problemy z określeniem jej płynięcia (po 60 min od momentu przygotowania).

Znajomość właściwości fizycznych i reologicznych hydromieszanin jest niezbędna przy wyznaczaniu wartości strumienia objętości w grawitacyjnych instalacjach transportowych powszechnie wykorzystywanych przy odzysku tych odpadów w kopalniach węgla kamiennego [4]. Według niektórych doniesień literaturowych rozpatrujących właściwości tego typu mieszanin w aspekcie urabialności wynika, że zachowują się one jak lepkoplastyczne ciało Bingham'a [18]. Z chwilą, gdy naprężenia przekroczą granicę płynięcia, nastąpi płynięcie mieszanki z prędkością proporcjonalną do lepkości plastycznej. Im mniejsza będzie lepkość plastyczna mieszanki, tym większa będzie prędkość jej płynięcia [19]. W pracy [14] zaproponowano model potęgowy do opisu przepływu mieszanin popioło-wodnych.

Tabela 3. Liniowe straty ciśnienia podczas przepływu mieszanin popioło-wodnych przy średniej prędkości 1,82 m/s

Table 3. Linear pressure losses for ash-water mixtures at the average velocity of 1.82 m/s

Popiół:Woda	Czas min	Strata liniowa mH <sub>2</sub> O/mb	Strata liniowa na całej długości rurociągu mH <sub>2</sub> O
0,7:1,0	0	0,0254	203,52
0,7:1,0	90	0,0254	203,52
0,8:1,0	0	0,0263	210,66
0,8:1,0	90	0,0263	210,66
0,9:1,0	0	0,0307	245,93
0,9:1,0	90	0,0307	245,93
1,3:1,0	0	0,0457	365,81
1,3:1,0	90	0,0830	664,19

## Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych przepływu mieszaniny dwufazowej oraz analizy uzyskanych rezultatów wynika, że do opisu strat ciśnienia znajdują zastosowanie modele newtonowskie. Liniowe straty ciśnienia istotnie zależały od gęstości mieszaniny. W czasie przepływu mieszaniny o udziale popiołu do wody równym 1,3:1,0 stwierdzono zdecydowany wzrost wartości liniowych strat ciśnienia. Straty te wynikały ze wzrostu zawartości popiołu w czasie (niewłaściwe mieszanie popiołu z wodą przy jego dużej zawartości), a także z prawdopodobnych reakcji chemicznych zachodzących pomiędzy popiołem i wodą. Przy przepływie mieszaniny z prędkością 1,82 m/s jej temperatura wzrosła o 6°C. Minimalizacja czasu przygotowania mieszaniny może przyczynić się do polepszenia warunków jej płynięcia.

Analizowane mieszaniny popiołowo-wodne miały właściwości cieczy newtonowskiej, a jedynie w nielicznych przypadkach, przy małych prędkościach przepływu, podczas przepływu mieszaniny o największej zawartości fazy stałej, wystąpiły właściwości nienewtonowskie. Badane mieszaniny charakteryzowały się strukturą tiksotropową. Wyniki badań wiskozymetrycznych mogą stanowić podstawę do obliczeń liniowych strat ciśnienia w trakcie przepływu mieszaniny przez rurociąg o przekroju kołowym. Projektowanie instalacji do transportu mieszaniny popiołowo-wodnej powinno być uzupełnione badaniami modelowymi, co pozwoli na uzyskanie pełnych informacji o wpływie składu popiołu na właściwości jej płynięcia.

*Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu nr 7553/B/T02/2011/40 pt. „Transport rurowy wysokozagęszczonych mieszanin”.*

## LITERATURA

1. H. HUTH, R. KUBISA: Wykorzystanie odpadów z elektrowni na bazie energetyki niemieckiej. Mat. konf. „Produkty uboczne spalania węgla w energetyce jako pełnowartościowy surowiec”, Steinmüller, Świnoujście 1996.
2. F. PLEWA, M. POPCZYK: Badanie parametrów reologicznych hydromieszanin wytwarzanych na bazie odpadów energetycznych. *Polityka energetyczna* 2008, t. 11, z. 1, ss. 375–384.
3. J. JUDYCKI, J. ALENOWICZ, I. STRUGAŁA, W. CYSKE: Zastosowanie popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego do budowy dróg na przykładzie eksperymentalnej drogi dojazdowej do elektrociepłowni „EC III” w Gdyni. Mat. konf. „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”, Zespół Elektrowni Dolna Odra, Świnoujście 1994.
4. F. PLEWA, M. POPCZYK, A. ZAJĄC, P. PIERZYNA: Analiza możliwości wykorzystania odpadu energetycznego z mokrego odsiarczania spalin (10 01 05) w mieszaninach zestalających w kopalniach węgla kamiennego. *Polityka energetyczna* 2012, t. 15, z. 3, ss. 147–157.
5. R. WIŚNIEWSKI, K. SKRZYPASZEK: Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich. *Wiertnictwo Nafta Gaz* 2006, t. 23/1, ss. 523–532.
6. M.M. SOZAŃSKI: Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
7. J. SOBOTA: Hydraulika przepływu mieszanin newtonowskich w rurociągach. Wydawnictwo PAN, Zakład im. Ossolińskich, Wrocław–Warszawa–Kraków 1998.
8. P. WICHOWSKI, T. SIWIEC, M. KALENIK, D. MORAWSKI: Badania zakresu stosowania wzoru Colebrooka-White’a do obliczania liniowych oporów hydraulicznych w kanalizacji ciśnieniowej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2011, nr 7, ss. 53–66.
9. M. JANIK, K. KUŚ: Analiza możliwości poprawy parametrów transportu hydraulicznego osadów z oczyszczania wody. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 3, ss. 53–57.
10. S. CZABAN: Wyznaczanie parametrów hydrotransportu rurowego reostabilnych mieszanin dwufazowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu* 1987, nr 60.
11. S. CZABAN: Parametry przepływu reostabilnych mieszanin dwufazowych. *Archiwum Hydrotechniki* 1990, t. XXXVII, nr 1–2, ss. 113–135.
12. J. FERGUSON, Z. KEMBŁOWSKI: Reologia stosowana płynów. Wydawnictwo MARCUS, Łódź, 1995.
13. T. KILJAŃSKI, M. DZIUBIŃSKI, J. SĘK, K. ANTOSIK: Wykorzystanie pomiarów właściwości reologicznych płynów w praktyce inżynierskiej. Wydawnictwo EKMA, Warszawa 2009.
14. P.K. SENAPATI, B.K. MISHRA, A. PARIDA: Modeling of viscosity for power plant ash slurry at higher concentrations: Effect of solids volume fraction, particle size and hydrodynamic interactions. *Powder Technology* 2010, Vol. 197, No. 1–2, pp. 1–8.
15. P. VLASAK, Z. CHARA: Laminar and turbulent flow experience with yield-power law slurries. *Powder Technology* 1999, Vol. 104, pp. 200–206.
16. W.L. WILKINSON: Ciecze nienewtonowskie. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1960.
17. M. DZIUBIŃSKI, T. KILJAŃSKI, J. SĘK: Podstawy reologii i reometrii płynów. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2009.
18. J. SZWABOWSKI: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
19. J. GOŁASZEWSKI, T. PONIKIEWSKI: Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego oraz zbrojenia rozproszonego na wybrane charakterystyki fibrobetonów samozagęszczalnych. *Civil and Environmental Engineering/Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2011, t. 2, ss. 281–288.

**Malczewska, B., Czaban, S., Głowski, R., Świerzko, R., Kiwacz, T., Sobota, J. Analyses of Linear Pressure Losses in Pipeline Carrying Two-Phase Mixture in the Example of an Ash-Water Mixture. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 2, pp. 69–72.**

**Abstract:** Results of experimental studies presented enable determination of pressure losses in the flow of ash-water mixture at solid to water ratios ranging from 0.7:1.0 to 1.3:1.0. Two-phase mixtures analyzed demonstrated properties of Newtonian fluids. Only in a few cases, at low velocities for high solid content mixture flow, non-Newtonian

fluid properties were established. The ash-water mixtures were shown to possess thixotropic characteristics. Furthermore, it was demonstrated that viscometric study results could serve as a bases for linear pressure loss calculations for circular cross-section pipeline flow of the discussed mixtures. Finally, the linear hydraulic losses for the two-phase mixture flow, calculated based on different rheological models, were compared to the values received in the semi-technical scale experiments.

**Keywords:** Hydrotransport, rheology, viscosity, shear stress.