

Roksana MUZYKA, Jolanta ROBAK, Karina IGNASIAK

e-mail: rmuzyka@ichpw.zabrze.pl

Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

Charakterystyka reologiczna skoncentrowanych zawiesin węglowo-wodnych

Wstęp

Zawiesiny węglowo-wodne CWS (Coal Water Slurry), CWM Coal Water Mixture) są paliwami komponentowymi, w skład których wchodzi mocno rozdrobniony węgiel, woda oraz dodatki modyfikujące. Zawartość węgla w tego rodzaju paliwie, bezpośrednio rzutuująca na jego wartość opałową, powinna być możliwie jak największa, a w zależności od kierunku wykorzystania może się mieścić w zakresie 50÷70% [Laskowski, 1991; Kubica i Smolka, 2000; Robak, 2010]. Zawiesiny węglowo-wodne są między innymi stosowane jako paliwo w dynamicznie rozwijających się technologiach zgazowania np. GE Energy/Texaco lub ConocoPhillips/E-Gas [Chmielniak i Ściążko, 2008].

Jakość paliwa zawiesinowego ocenia się między innymi na podstawie takich parametrów, jak: stężenie, zdolność płynięcia i stabilność [Ignasiak i in., 2012]. Z technologicznego punktu widzenia bardzo istotne są również właściwości reologiczne paliw zawiesinowych (lepkość, tiksotropia), które wpływają na możliwość ich magazynowania oraz transportowania.

Lepkość zawiesiny węglowo-wodnej jest parametrem decydującym o możliwości jej transportu rurociągami oraz aplikacji do reaktora. Wysoka wartość lepkości zawiesiny zwiększa energochłonność transportu oraz powoduje ścieranie się wewnętrznych ścianek rurociągu, prowadząc w konsekwencji do erozji instalacji transportującej.

Zjawisko tiksotropii wynika ze zniszczenia struktury badanego medium, wywołanego czynnikami mechanicznymi i jest przemianą odwracalną [Ferguson i Kembłowski, 1995; Schramm, 1998], a lepkość cieczy tiksotropowych uzależniona jest zarówno od czasu, jak i szybkości ścinania. Przyczyną występowania zjawiska tiksotropii są tożsame z przyczynami wywołującymi zjawisko rozrzedzenia ścinaniem płynów reostabilnych, jednakże w przypadku płynów tiksotropowych osiągnięcie stanu równowagi reologicznej dla danej szybkości ścinania jest wolniejsze, co umożliwia jego śledzenie w czasie [Kembłowski, 1973]. Ze względu na potencjalną aplikację przemysłową otrzymywanych zawiesin węglowo-wodnych uznano, że konieczne jest uwzględnianie zjawiska tiksotropii podczas operacji ich przygotowania, transportowania i magazynowania.

W pracy przedstawiono wyniki badań reologicznych zawiesin węglowo-wodnych, otrzymanych z polskich węgla energetycznych, które stanowią potencjalną bazę surowców do procesu zgazowania.

Badania doświadczalne

Materiały

Materiałem stosowanym w badaniach były zawiesiny węglowo-wodne o różnych stężeniach fazy stałej, otrzymane w warunkach laboratoryjnych z polskich węgla energetycznych ZG Janina oraz KWK Wieczorek. Jako dodatek modyfikujący wykorzystano dyspergator fazy stałej w postaci pochodnych kwasów naftalenosulfonowych (Dyspergator NNOS E), zastosowany w wytwarzanych zawiesinach węglowych w stężeniach 0,10; 0,20 i 0,30% mas. substancji czynnej w odniesieniu do suchej masy węgla. Sposób komponowania i preparowania zawiesin o określonym stężeniu został zaprezentowany w pracach [Ignasiak i in., 2012; Robak i in., 2013].

O podatności węgla na wytwarzanie z nich stabilnych w sensie sedymentacyjnym zawiesin węglowo-wodnych (*slurrability*) decydują przede wszystkim hydrofobowe właściwości ich powierzchni. Takimi właściwościami charakteryzują się węgle o wyższym stopniu metamorfizmu. Zastosowane w badaniach węgle są węglami nisko uwęglonymi o hydrofilowym charakterze powierzchni, niesprzyjającym tworzeniu

trwałych dyspersji w środowisku wodnym, o czym świadczy porównanie ich właściwości fizykochemicznych z właściwościami pożądanymi [Kubica i Smolka, 2000; Miller, 2005] zaprezentowane w tab. 1.

Tab. 1. Wybrane właściwości fizykochemiczne węgla wykorzystanych do otrzymywania badanych zawiesin węglowo-wodnych

Oznaczenie	Właściwości węgla		Pożądane zakresy parametrów
	z ZG Janina	z KWK Wieczorek	
Zawartość popiołu A ^a , % mas.	15,3	16,0	< 10
Zawartość węgla C _t ^a , % mas.	58,0	68,6	85 - 91
Zawartość tlenu O _d ^a , % mas.	11,04	8,06	< 4,55*
Stosunek C/O	5,25	8,51	> 20
Refleksyjność wityrytu R, %	0,39	0,77	1 lub nieco powyżej

* na podstawie przeliczenia wymagań dla zawartości węgla i stosunku C/O

Aparatura

Do badań reologicznych wykorzystano reometr obrotowy typu CR Haake VT550 z regulowaną szybkością ścinania wyposażony w układ pomiarowy złożony z cylindrów współosiowych typu SV-DIN z oprogramowaniem RheoWin 4.30.

Zakres pomiarów i metodyka

Krzywe płynięcia wyznaczono dla wzrastających i malejących wartości szybkości ścinania, przy czym wszystkie pomiary przeprowadzono w temperaturze 25°C przy zachowaniu następujących kroków zmiany szybkości ścinania:

- początek – poddanie układu stałej szybkości ścinania wynoszącej 10 s⁻¹ w czasie 30s (czas i wartość szybkości ścinania została dobrana eksperymentalnie);
- zmiana szybkości ścinania od 10 do 500 s⁻¹ w czasie 90 s;
- poddanie układu stałej szybkości ścinania o wartości 500 s⁻¹ w czasie 60 s;
- zmiana szybkości ścinania od 500 do 10 s⁻¹ w czasie 90 s;
- zakończenie przy szybkości ścinania wynoszącej 10 s⁻¹ w czasie 30 s.

Zachowanie we wszystkich zrealizowanych pomiarach tych samych warunków (temperatury i kroku zmian szybkości ścinania), umożliwia wykorzystanie metody testu pętli histerezy jako wskaźnika charakteryzującego ilościowo tiksotropię. Lepkość badanych zawiesin oznaczono przy szybkości ścinania wynoszącej 500 s⁻¹.

Ocena właściwości badanych zawiesin, poza parametrami reologicznymi, obejmowała oznaczenie zdolności płynięcia (czas niewymuszonego wypływu 60 cm³ zawiesiny z lejka o średnicy wypływu 6 mm bez zrywania strugi na wysokości 20 cm, s) i stabilności (stosunek wysokości płynnej warstwy zawiesiny do całkowitej wysokości zawiesiny wraz ze zwartą warstwą sedymentu, %) [Ignasiak i in., 2012; Robak i in., 2013].

Wyniki badań i analiza

Zdolność płynięcia i stabilność w siódmej dobie od wytworzenia badanych zawiesin w zależności od stężenia *c* (zdefiniowanego jako udział masy węgla w stanie suchym w masie zawiesiny [% mas.]) przedstawiono w tab. 2 [Robak i in., 2013]. Stabilność oznaczono jedynie dla zawiesin o maksymalnym stężeniu danego węgla, przy którym wykazywały one jeszcze zdolność płynięcia.

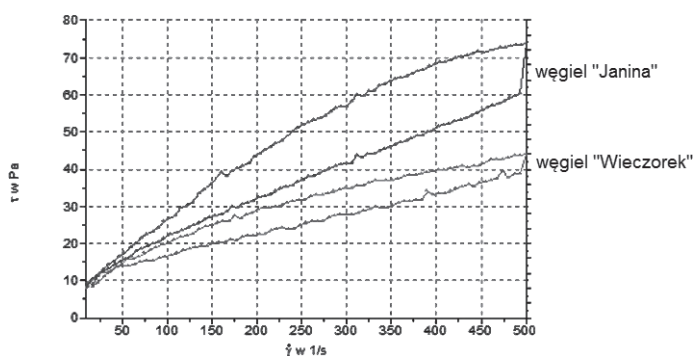
Efektom przeprowadzonych badań reometrycznych było wyznaczenie dla badanych zawiesin krzywych płynięcia, czyli zależności naprężenia stycznego τ od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ oraz wartości lepkości badanych zawiesin.

Tab. 2. Zdolność płynięcia [s] i stabilność [%] zawiesin węglowo-wodnych stosowanych w badaniach [Robak i in., 2013]

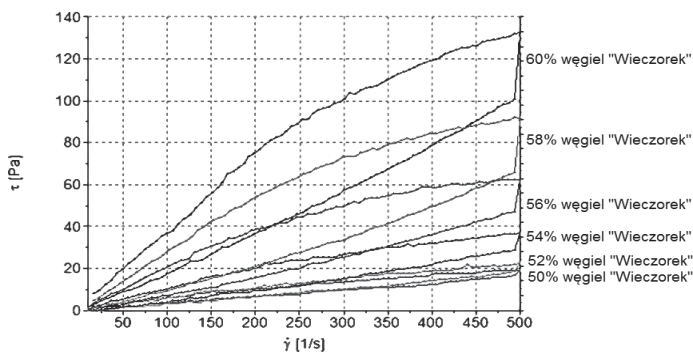
c, % mas.	Zdolność płynięcia / Stabilność							
	Węgiel z ZG Janina				Węgiel z KWK Wieczorek			
	Stężenie dyspergatora, % mas.							
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,00	0,10	0,20	0,30
50	7/20,9	7/16,3	6	6	9/100	2	2	3
52	*	*	13/18,6	12/18,6	*	3	3	3
54	*	*	*	*	*	7	6	6
56	*	*	*	*	*	11	13	11
58	*	*	*	*	*	20/88,4	19/88,4	18/83,7
60	*	*	*	*	*	*	*	*

*) utrata płynności zawiesiny

Na rys. 1 przedstawiono krzywe płynięcia zawiesin węgla z ZG Janina i KWK Wieczorek o stężeniu 50 % mas., uzyskanych bez dodatku dyspergatora. Rys. 2 przedstawia przykładowe krzywe płynięcia zawiesin węglowych o różnej zawartości węgla z KWK Wieczorek.



Rys. 1. Krzywe płynięcia zawiesin węgla z ZG Janina i KWK Wieczorek bez dodatku dyspergatora [Ignasiak i in., 2012]



Rys. 2. Przykładowe krzywe płynięcia zawiesin otrzymanych przy rosnącym stężeniu węgla z KWK Wieczorek z dodatkiem 0,3% mas. dyspergatora NNOS E

Wszystkie uzyskane w trakcie pomiarów reometrycznych krzywe płynięcia charakteryzowały się obecnością pętli histerezy. Malejącej szybkości ścinania odpowiadały wartości naprężenia ścinającego mniejsze, niż wartości uzyskane przy wzrastającej szybkości ścinania, co potwierdza informacje o tiksotropowym charakterze węglowo-wodnych paliw zawiesinowych [Harmadi i in., 2002; Liu i in., 2012].

Miaram wielkości zjawiska tiksotropii jest pole powierzchni pętli histerezy tworzone przez krzywe płynięcia. Pole to odzwierciedla ilość energii dostarczonej do badanej zawiesiny, która spowodowała częściowy rozpad jego struktury (energia tiksotropowa) [Adamczyk i in., 2012]. Obliczone przy wykorzystaniu oprogramowania RheoWin 4.30 energie tiksotropowe [Pa·s⁻¹] badanych zawiesin węgla z ZG Janina i KWK Wieczorek zaprezentowano w tab. 3.

Wyższym zawartościom węgla w badanych zawiesinach towarzyszył wzrost powierzchni pętli histerezy, świadczący o wyższym zapotrzebowaniu tych zawiesin na energię w celu zburzenia ich struktury i upłynienia, przy czym dyspersje na bazie węgla z ZG Janina wykazują silniej tiksotropowy charakter, niż dyspersje z węgla KWK Wieczorek.

Tab. 3. Energia tiksotropowa [Pa·s⁻¹] zawiesin węgla z ZG Janina i KWK Wieczorek z dodatkiem dyspergatora NNOS E

c, % mas.	Węgiel z ZG Janina				Węgiel z KWK Wieczorek			
	Stężenie dyspergatora, % mas.							
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,00	0,10	0,20	0,30
50	8594	11200	9762	7184	5731	1181	1540	1679
52	-	16030	14330	13750	-	4022	2728	2088
54	-	16500	16401	14880	-	5159	5062	4569
56	-	-	41040	22760	-	10260	10020	9543
58	-	-	-	-	-	14640	14320	14230
60	-	-	-	-	-	21000	20040	16760

Dodatek dyspergatora, wpływający na zwiększenie odległości pomiędzy ziarnami węgla w zawieszynie, zwiększa ich stabilność reologiczną, której miarą jest poziom tiksotropii. Wyższym wartościom energii tiksotropowej odpowiadały także wyższe wartości lepkości (Tab. 4).

Tab. 4. Lepkości zawiesin węgla [Pa·s] przy szybkości ścinania wynoszącej 500 s⁻¹ z ZG Janina i KWK Wieczorek z dodatkiem dyspergatora NNOS E

c, % mas.	Węgiel z ZG Janina				Węgiel z KWK Wieczorek			
	Ilość dyspergatora, % mas.							
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,00	0,10	0,20	0,30
50	0,091	0,091	0,078	0,073	0,061	0,034	0,035	0,036
52	-	0,120	0,116	0,112	-	0,046	0,047	0,040
54	-	0,272	0,165	0,184	-	0,077	0,067	0,065
56	-	-	0,295	0,318	-	0,114	0,115	0,107
58	-	-	-	-	-	0,170	0,158	0,152
60	-	-	-	-	-	0,301	0,264	0,231

Analiza doświadczalnych krzywych płynięcia na rys. 1 i 2 pozwala stwierdzić, że badane zawiesiny w analizowanym zakresie szybkości ścinania są płynami tiksotropowymi wykazującymi granicę płynięcia, zależną od stężenia zawiesiny. W celu określenia poziomu zmian wartości granicy płynięcia w zależności od zawartości węgla w zawieszynie uzyskane krzywe płynięcia opisano modelem *Herschela-Bulkley'a* (1) [Schramm, 1998]. Model ten dotyczy cieczy reostabilnych (a więc nie cieczy tiksotropowych), jednak stosując go uzyskano – w porównaniu z innymi modelami reologicznymi – najlepsze dopasowanie reprezentowane liczbowo przez współczynnik determinacji między modelem a doświadczalną krzywą (R^2).

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

gdzie:

- k – współczynnik konsystencji, [Pa·sⁿ]
- n – wskaźnik płynięcia, [-]
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, [s⁻¹]
- τ – naprężenie styczne, [Pa]
- τ_0 – granica płynięcia, [Pa]

W tab. 5 zestawiono parametry charakterystyki reologicznej wg modelu *Herschela-Bulkleya* dla zawiesin zaprezentowanych na rys. 2 przy rosnącej szybkości ścinania.

Tab. 5. Charakterystyka reologiczna zawiesin węgla z KWK Wieczorek z dodatkiem dyspergatora – model *Herschela-Bulkley'a*

c, [% mas.]	τ_0 [Pa]	k [Pa·s ⁿ]	n [-]	R^2
50	0,28	0,2191	0,75	0,9976
52	0,70	0,2874	0,69	0,9964
54	1,07	1,452	0,55	0,9956
56	2,51	6,091	0,53	0,9934
58	3,21	6,329	0,46	0,9928
60	5,37	6,953	0,42	0,9924

Ze wzrostem stężenia zawiesiny obserwuje się również wzrost wartości granicy płynięcia τ_0 (model *Herschela-Bulkleya*) – naprężenia stycznego, przy którym następuje zniszczenie struktury zawiesiny umożliwiającej jej płynięcie. Każdemu kolejnemu wzrostowi stężenia zawiesiny o 2 punkty procentowe towarzyszą coraz większe wzrosty wartości granicy płynięcia, co wywołane jest większym zagęszczeniem i przyleganiem do siebie cząstek stałych w badanym medium. Poczy-

nione obserwacje dotyczą zawiesin węgla tak z *KWK Wieczorek*, jak i z *ZG Janina*.

O technologicznej przydatności zawiesin węglowo-wodnych decyduje, poza wspomnianą na wstępie wartością opałową, szereg innych właściwości fizycznych: właściwości reologiczne, zdolność płynięcia, stabilność. Ponieważ poprawa niektórych parametrów powoduje pogorszenie innych, przy ocenie tego typu produktów istotne jest rozpatrywanie ich jako jednego kompleksu danych.

Podstawowym warunkiem zakwalifikowania wytwarzanych w czasie przeprowadzonych badań zawiesin węglowo-wodnych jako potencjalnych paliw było zachowanie przez nie zdefiniowanej wcześniej zdolności płynięcia. Biorąc to pod uwagę, maksymalne stężenie dyspersji węglowych, jakie udało się uzyskać w przeprowadzonej sekwencji badań z węgla z *ZG Janina* i *KWK Wieczorek* bez dodatku dyspergatorów, wyniosło 50% mas. Zwiększenie stężenia zawiesin dla obydwu badanych węgli o 2 punkty procentowe bez dodatku dyspergującego powodowało utratę ich zdolności płynięcia.

Dodatek dyspergatora do wytwarzanych zawiesin wywoływał upłynianie powstałych układów dwufazowych (zwiększanie zdolności płynięcia i obniżanie lepkości), co umożliwiało zwiększanie ich stężenia. Maksymalne stężenia wodnych zawiesin węgla z *ZG Janina* i *KWK Wieczorek* z dodatkiem dyspergatora NNOS E wynosiły odpowiednio 52 i 58% mas. Jednocześnie spowodowane dodatkiem dyspergatora rozluźnienie powstałych układów dwufazowych skutkowało obniżeniem jego stabilności w sensie sedymentacyjnym.

Jak wspomniano wcześniej, wraz ze wzrostem stężenia zawiesiny następował spadek stabilności reologicznej. Jednocześnie zwiększanie ilości dodatku dyspergatora powodowało osłabienie tiksotropowego charakteru badanych zawiesin. Odwrotne relacje obserwuje się przy ocenie stabilności w sensie sedymentacyjnym (określanej w literaturze przedmiotu po prostu mianem stabilności) – spadkowi stabilności reologicznej towarzyszył wzrost stabilności sedymentacyjnej.

Poza różną podatnością badanych węgli do tworzenia zawiesin o zwiększonym stężeniu, przeprowadzone badania reologiczne wykazały również różny ich wpływ na stabilność reologiczną otrzymanych produktów. Przy tych samych stężeniach zawiesiny węgla z *ZG Janina* wymagają znacznie większego nakładu energetycznego na rozluźnienie ich struktury wewnętrznej.

Wnioski

Zawiesiny węglowo-wodne są specyficzną formą paliwa stałego, którego ocena powinna obejmować szereg wspólnie rozpatrywanych parametrów.

Zwiększenie stężenia, korzystne z użytecznego punktu widzenia, możliwe jest po zastosowaniu dodatków w postaci dyspergatorów. Nie wielki ich dodatek pozwolił na zwiększenie stężenia zawiesiny przy jednoczesnym zachowaniu jej płynności. Przeprowadzone badania dotyczące poszukiwania dla obu badanych węgli (z *ZG Janina* i *KWK Wieczorek*) maksymalnego stężenia zawiesiny przy minimalnym stężeniu środka dyspergującego wykazały, że węgiel z *KWK Wieczorek* jest korzystniejszym surowcem do otrzymywania paliw w formie zawiesiny wodnej. Najwyższe stężenie paliwa, jakie udało się uzyskać z węgla *KWK Wieczorek* przy zachowaniu jego płynności wynosiło 58% mas. z dodatkiem dyspergatora NNOS E, podczas gdy zastosowanie węgla *ZG Janina* pozwoliło na uzyskanie paliwa o stężeniu 52% mas. Wyniki badań potwierdzają doniesienia o pozytywnym wpływie hydrofobowego charakteru powierzchni węgla na jego podatność do tworzenia zawiesin wodnych – pomimo, że oba badane węgle należą do węgla energetycznych typu 31, właściwości węgla z *KWK Wieczorek* są nieco bardziej zbliżone do właściwości pożądanego z tego punktu widzenia.

Przeprowadzone badania dotyczące charakterystyki reologicznej badanych zawiesin wykazały, że ich krzywe płynięcia wyznaczone dla wzrastającej i malejącej szybkości ścinania tworzą pętlę histerezy wskutek mechanicznego niszczenia ich struktury wewnętrznej, co jest potwierdzeniem tiksotropowego charakteru tego typu mediów. Bardzo istotną obserwacją jest odwrotna zależność stabilności reologicznej i stabilności w sensie sedymentacyjnym od stężenia zawiesin węglowych. O ile stabilność w sensie sedymentacyjnym określa dynamikę

opadania cząstek węgla w środowisku wodnym, o tyle stabilność w sensie reologicznym bardziej odnosi się do trwałości wytworzonej warstwy sedymentu. W świetle powyższego korzystnym wydaje się wspólne rozpatrywanie obydwu tych parametrów.

Dotychczas zawiesiny węglowe łatwo ulegające sedymentacji określone jako zawiesiny o gorszej stabilności. Jeżeli jednak warstwa wytworzonego sedymentu łatwo ulegałaby rozluźnieniu pod wpływem czynników mechanicznych (przebieg krzywych płynięcia takiego paliwa powinien charakteryzować się pętlą histerezy o niewielkiej powierzchni), łatwych do zastosowania np. w zbiornikach magazynowych, zwiększona sedymentacja nie powinna być jedynym kryterium stabilności branych pod uwagę przy jego ocenie. Opisane przemysłowe metody wytwarzania paliw w formie zawiesiny węglowej przewidują bowiem ich magazynowanie w zbiornikach wyposażonych w systemy mieszające [Fiseni, 1987; Langhoff i in., 1988; Clean, 2000; Clean, 2004].

Zastosowana w przedstawionych badaniach metoda pomiaru stabilności częściowo uwzględnia charakter wytworzonej w trakcie przechowywania zawiesiny warstwy sedymentu (warstwa miękka lub twarda), jednakże pomiary reometryczne stanowić mogą w tym przypadku uzupełniającą metodę oceny stabilności paliw zawiesinowych.

LITERATURA

- Adamczyk G., Sikora M., Krystyan M., 2012. Metody pomiaru właściwości tiksotropowych produktów żywnościowych. *ZYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, **82**, nr 3, 19-34
- Chmielniak T., Ściążko M., 2008. *Zgazowanie węgla. Stan rozwoju technologicznego* [w:] Borowiecki T., Kijeński J., Machnikowski J., Ściążko M., (redaktorzy). Czysta energia. Produkty chemiczne i paliwa z węgla – ocena potencjału rozwojowego. Wyd. IChPW, Zabrze
- Clean Coal Technology, 2000. *Tampa Electric Integrated Gasification Combined-Cycle Project An Update*. Topical Report No 19 (08.2014): <http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/major%20demonstrations/cctdp/Round3/Tampa/topical19.pdf>
- Clean Coal Technology, 2004. *DOE/NETL-2004/1207. Tampa Electric Integrated Gasification Combined – Cycle Project* (12.2013): <http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/major%20demonstrations/cctdp/Round3/Tampa/TampaPPA8-Final080904.pdf>
- Ferguson J., Kembłowski Z., 1995. *Reologia stosowana płynów*, Wyd. MARCUS, Łódź
- Fiseni F., 1987. Die hochkonzentrierte Kohle/Wasser – Suspension DENSE-COAL. *Bernnstoff Wärme Kraft*, **39**, nr 5, 246-248
- Harmadi E., Suwarmin, Machmudah S., Winardi S., 2002. Effect of particle size distribution on rheology and stability of high concentration coal-water mixture (Cwm) with indonesian low rank coal. *J. Teknik Mesin*, **2**, nr 3, 93-98
- Ignasiak K., Muzyka R., Robak J., 2012. Badania wpływu dodatków chemicznych na wybrane właściwości zawiesin węglowo-wodnych. *Karbo*, **57**, nr 2, 78-87
- Kembłowski Z., 1973. *Reometria płynów nienuetonowskich*, WNT, Warszawa
- Kubica R., Smółka W., 2000. Zawiesinowe paliwa węglowe: rozwój, charakterystyka i perspektywy zastosowania. *Gosp. Paliw. Ener.*, nr 1, 2-8
- Langhoff J., Kirschke H.G., Masuch H.P., Zagberg U., 1988. Kohle-Wasser-Suspension. *Erdöl und Kohle – Erdgas – Petrochemie*, **41**, nr 4, 166-168
- Laskowski S. J., 1991. Fizykochemiczne problemy mechanicznej przeróbki węgla. Część II. Zawiesiny węglowo-wodne. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, **24**, 11-31
- Liu J., Wang R., Gao F., Zhou J., Cen K., 2012. Rheology and thixotropic properties of slurry fuel prepared using municipal wastewater sludge and coal. *Chem. Eng. Sci.*, **76**, 1-8. DOI: 10.1016/j.ces.2012.04.010
- Miller B.G., 2005. *Coal Energy Systems*. Elsevier Academic Press
- Robak J., 2010. *Wytwarzanie wieloskładnikowych paliw zawiesinowych dla układów zgazowania* [w:] Kijeński J., Machnikowski J., Ściążko M., (redaktorzy). Studium koncepcyjne wybranych technologii, perspektywicznych procesów i produktów konwersji węgla – osiągnięcia i kierunki badawczo-rozwojowe. Wyd. IChPW, Zabrze
- Robak J., Ignasiak K., Muzyka R., 2013. Paliwo zawiesinowe z polskich węgli energetycznych do procesu zgazowania. *Przegl. Gór.*, **69**, nr 7, 61-66
- Schramm G., 1998. *Reologia. Podstawy i zastosowanie*. Wyd. PAN, Poznań

Praca została wykonana w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, Zadanie Badawcze nr 3 „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”, finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na podstawie Umowy nr SP/E/3/7708/10.