

OKREŚLENIE PARAMETRÓW REOLOGICZNYCH ZACZYNÓW WAPIENNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISKA POŚLIZGU

Jan Kempński, Robert Świerzko

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Przeprowadzone badania wiskozymetryczne zaczynów wapiennych wykonano przy użyciu wiskozymetru rotacyjnego Haake Viscotester Vt550, z różnymi systemami pomiarowymi. Uzyskane pseudokrzywe płynięcia $\tau(\dot{\gamma}_p)$ wskazywały na nienewtonowskie zachowanie zaczynów wapiennych, co wymagało ich korekty do rzeczywistych krzywych płynięcia $\tau(\dot{\gamma})$. Skorygowane krzywe płynięcia dla tych samych wskaźników wodno-wapiennych W/L, ale różnych zastosowanych systemów pomiarowych nie pokrywały się ze sobą w całym zakresie badanych koncentracji. Świadczy to o wystąpieniu zjawiska poślizgu na ściankach wiskozymetru rotacyjnego. Przeprowadzono korektę krzywych płynięcia, zgodnie z metodą Kiliańskiego [1989], uzyskując jedną wspólną krzywą płynięcia dla dwóch różnych systemów pomiarowych. Do aproksymacji użytych krzywych płynięcia wykorzystano 3-parametrowy model Herschela-Bulkleya. Dokonano oceny błędu przy określaniu parametrów reologicznych bez uwzględnienia zjawiska poślizgu.

Słowa kluczowe: zaczyny wapienne, wiskozymetr rotacyjny, parametry reologiczne, model Herschela-Bulkleya, poślizg.

WSTĘP

Nadrzędnym celem prowadzenia pomiarów laboratoryjnych jest zapewnienie optymalnych i jednoznacznych, zgodnych z przyjętą metodyką badań, warunków ich realizacji. W przypadku pomiarów wiskozymetrycznych, w szczególności dotyczących mieszanin nienewtonowskich, należy przestrzegać zasady reostabilności badanego medium, co stanowi podstawę do prawidłowej analizy i interpretacji otrzymanych wyników pomiarowych [Wilkinson 1963, Kembłowski 1973].

Adres do korespondencji – Corresponding authors: prof. dr hab. Jan Kempński, dr inż. Robert Świerzko, Instytut Budownictwa, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, e-mail: jan.kempinski@up.wroc.pl, robert.swierzko@up.wroc.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

Inną przyczyną, mającą wpływ na uzyskane wyniki badań, jest wystąpienie tzw. efektu skalowego, uzależniającego otrzymane wyniki od geometrii przyrządu pomiarowego [Kempiański i Parzonka 1984]. Przestrzeganie zasady reostabilności badanego medium i wykluczenie wystąpienia efektu skalowego pozwala na jednoznaczne określenie parametrów reologicznych oraz właściwą ich interpretację, w kontekście pozostałych parametrów fizycznych badanej mieszaniny.

Niektóre mieszaniny nienewtonowskie wykazują właściwości anormalne w pobliżu ściany przyrządu pomiarowego, wynikające z uprzywilejowanej orientacji cząstek. Powoduje to wystąpienie cienkiej warstewki przyściennej o mniejszej lepkości niż badane medium, co ma znaczący wpływ na wzrost gradientu prędkości i prowadzi do wystąpienia zjawisk poślizgu. Do podstawowych prac z tego zakresu należą prace Oldroyda oraz Mooneya [Wilkinson 1963]. Negatywny skutek tego zjawiska wiąże się z powstaniem znacznych różnic prędkości w warstwie przyściennej, co powoduje zafałszowanie wyników pomiarów reologicznych [Dziubiński i in. 2009]. Sprawdzenie ewentualnego wystąpienia poślizgu umożliwi przeprowadzenie pomiarów wiskozymetrycznych dla różnych systemów pomiarowych. Uzyskanie zgodnych, pokrywających się krzywych płynięcia świadczy o braku wystąpienia zjawiska poślizgu, w przeciwnym razie uzyskane krzywe płynięcia wymagają przeprowadzenia korekty. Kembłowski [1973] przedstawia metodę zaproponowaną przez Mooneya, bazującą na wykonaniu badań wiskozymetrycznych z użyciem trzech cylindrów o różnej geometrii. Podobną korektę zjawiska poślizgu, dla różnych systemów pomiarowych, przedstawiają Pfannschmidt i Reher [1972], opierając rozwiązanie na trzywarstwowym przepływie laminarnym w szczelinie wiskozymetru rotacyjnego. Kiljański [1989] przedstawił możliwość korekty zjawiska poślizgu, dysponując pomiarami wiskozymetrycznymi, wykonanymi z użyciem dwóch różnych systemów pomiarowych. W metodzie tej obliczane zostają wartości nieskorygowanej ze względu na poślizg szybkości ścinania $\dot{\gamma}'_m$ oraz odpowiadające im naprężenia styczne τ_m w środku szczeliny wiskozymetru, dla obu systemów pomiarowych. Stanowi to podstawę do wyznaczenia krzywych płynięcia i obliczenia szybkości efektywnego poślizgu dla danej wartości naprężenia stycznego zgodnie z zależnością:

$$u = \frac{\dot{\gamma}'_{m1} - \dot{\gamma}'_{m2}}{\left(\frac{1}{b_1}\right) - \left(\frac{1}{b_2}\right)}$$

gdzie:

$$b = \frac{R_i R_o \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)}{R_i + R_o}$$

w którym R_i oraz R_o oznaczają promienie cylindra wewnętrznego i zewnętrznego w danym systemie pomiarowym, natomiast indeksy 1 i 2 odnoszą się do systemów pomiarowych o różnych szerokościach szczeliny.

Pozwala to na wyznaczenie skorygowanych ze względu na poślizg szybkości ścinania:

$$\dot{\gamma}_{m1} = \dot{\gamma}_{m2} = \dot{\gamma}'_{m1} - \frac{u_1}{b_1} = \dot{\gamma}'_{m2} - \frac{u_2}{b_2}$$

i ustalenia jednej wspólnej krzywej płynięcia dla obu systemów pomiarowych.

Uwzględnienie występującego efektu poślizgu jest bardzo ważne, gdyż efekt ten powoduje obniżanie wartości naprężeń stycznych dla przyjętych prędkości deformacji. Mówimy o tzw. ujemnym efekcie skalowym, zaniżającym określane na tej podstawie np. parametry przepływu badanego medium.

Celem badań prezentowanych w niniejszej pracy jest określenie parametrów reologicznych zaczynów wapiennych przy użyciu dwóch różnych systemów pomiarowych wiskozymetru rotacyjnego, ustalenie ewentualnego zjawiska poślizgu, jego korekty oraz oceny błędu wyznaczenia naprężeń stycznych przy pominięciu tego efektu. Dokonano również próby oceny eliminacji poślizgu przez użycie systemu cylindrów o karbowanej powierzchni.

MATERIAŁY I METODY

Badania wykonano dla zaczynów wapiennych sporządzonych z wapna CL 90-S, zgodnego z normą PN-EN 459-1. Wskaźnik wodno-wapienny W/L badanych zaczynów zmienił się w zakresie od 1,0 do 1,4. Oznaczenia właściwości reologicznych wykonano za pomocą wiskozymetru rotacyjnego Haake Vt550, stosując trzy zestawy cylindrów pomiarowych: MV1, MV2, MV2P (tab. 1), przy stałej temperaturze otoczenia. Zestawy MV2 i MV2P charakteryzowały się tymi samymi wymiarami, a różniły od siebie sposobem wykończenia powierzchni. Cylindry MV2 miały powierzchnię pomiarową gładką, podczas gdy MV2P odznaczały się powierzchnią karbowaną, teoretycznie mającą na celu ograniczenie zjawiska poślizgu mogącego wystąpić na ściankach elementów pomiarowych.

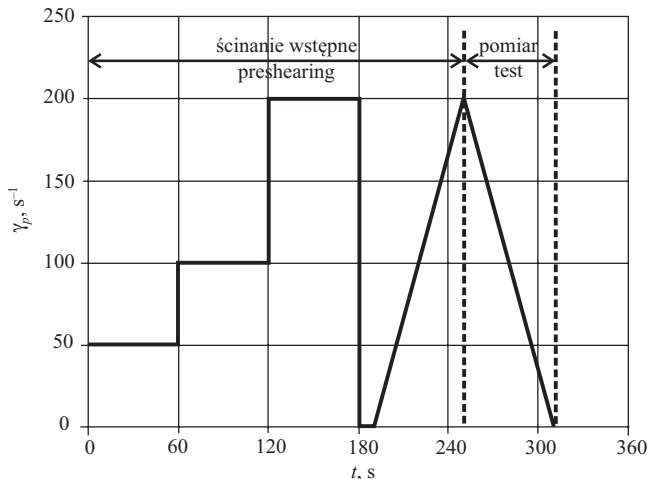
Tabela 1. Dane systemów pomiarowych stosowanych w badaniach

Table 1. Parameters of the sensor systems used for the tests

	MV1	MV2/MV2P
Promień cylindra wewnętrznego R_p , mm Inner cylinder radius R_p , mm	20,04	18,4
Promień cylindra zewnętrznego R_o , mm Outer cylinder radius R_o , mm	21,0	21,0
Wysokość cylindra wewnętrznego H , mm Inner cylinder height H , mm	60,0	60,0
Szerokość szczeliny pomiarowej g , mm Gap width g , mm	0,96	2,6
Stosunek promieni R_o/R_i Radii ratio R_o/R_i	1,05	1,14

Metodyka przygotowania, a w szczególności czas i intensywność mieszania wywołuje zmiany zachowania się zaczynu. Idealnie wymieszany zaczyn cechuje się jak najmniejszą lepkością oraz zważeniem ewentualnej pętli histerezy. Pomiary przeprowadzono zgodnie z metodyką podaną w pracach Kempński i Świerzko 2010 oraz Świerzko 2011.

Bezpośrednio po zmieszaniu wapna z odpowiednią ilością wody, zaczyny były mieszane ręcznie przez 60 s, dalej zaś następowało mieszanie mechaniczne przez kolejne 60 s z prędkością około 300 obrotów na minutę. Następnie zaczyn pozostawiano w spoczynku przez 420 s, po tym czasie wykonywano powtórne mieszanie mechaniczne przez kolejne 60 s. Bezpośrednio po wymieszaniu składników zaczyn wapienny przenoszono do cylindra, umieszczano w wiskozymetrze i poddawano wstępnemu ścinaniu, według schematu przedstawionego na ryc. 1. Po trwającym 250 s wstępnym ścinaniu badanych próbek wykonywano pomiar pseudokrzywych płynięcia, przy prędkości ścinania zmniejszającej się od 200 s^{-1} do 0 s^{-1} .



Ryc. 1. Cykl obciążenia próbek podczas badań

Fig.1. Measurement cycle used for the tests

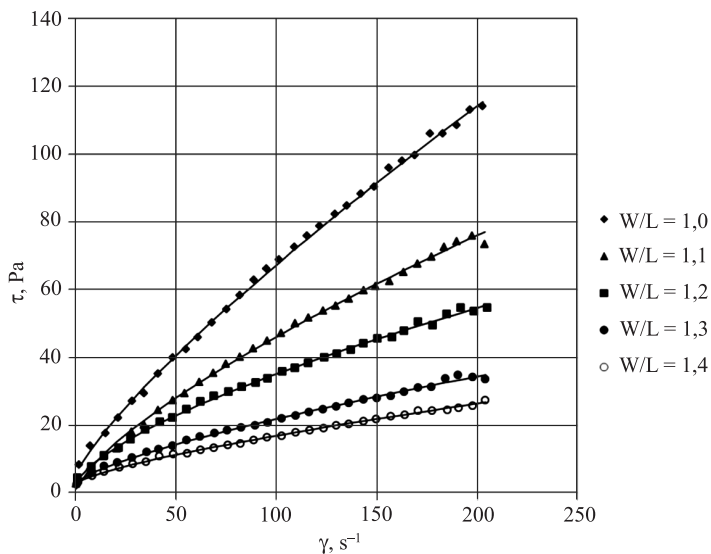
WYNIKI I DISKUSJA

Uzyskane w wyniku pomiarów pseudokrzywe płynięcia skorygowano, z uwagi na nienewtonowski charakter badanych mieszanin, do rzeczywistych krzywych płynięcia. Posłużono się w tym celu metodą wykorzystującą numeryczne całkowanie zależności prędkości deformacji od naprężeń w szczelinie pomiarowej wiskozymetru rotacyjnego [Świerzko 2011].

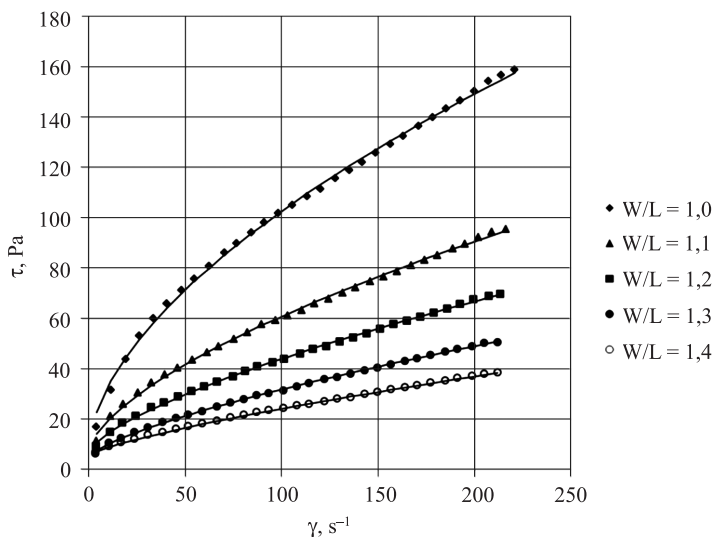
Uzyskane rzeczywiste krzywe płynięcia mają kształt typowy dla cieczy pseudoplastycznej z granicą płynięcia τ_0 . Graficzny obraz przebiegu rzeczywistych krzywych płynięcia, uzyskanych dla zastosowanych systemów pomiarowych MV1, MV2, MV2P, przedstawiono na ryc. 2–4. Do aproksymacji rzeczywistych krzywych płynięcia wykorzystano trójparametrowy, uogólniony model Herschela–Bulkleya:

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \gamma^n$$

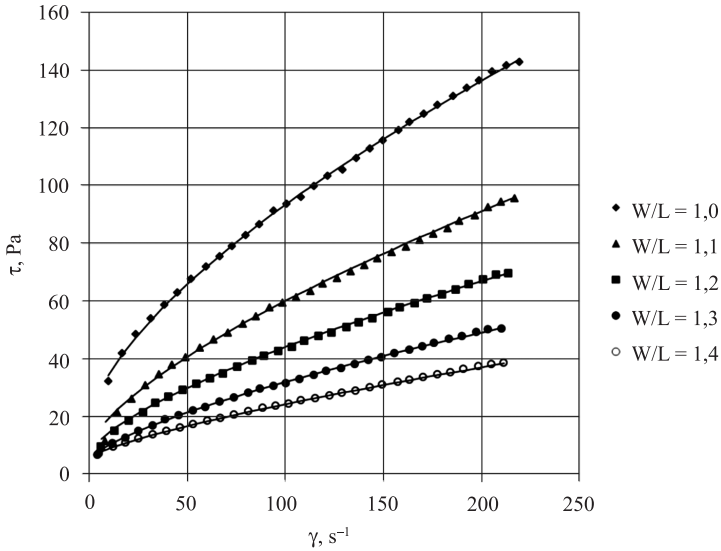
Wyniki obliczeń parametrów reologicznych modelu Herschela–Bulkleya dla rzeczywistych krzywych płynięcia zestawiono w tabeli 2.



Ryc. 2. Krzywe płynięcia zaczynów wapiennych zmierzone za pomocą systemu MV1
Fig. 2. Flow curves of lime pastes measured with use of the MV1 sensor system



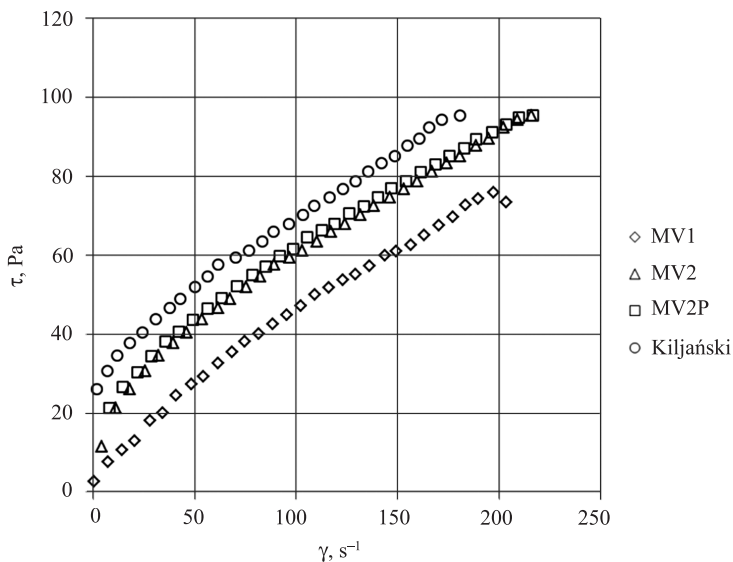
Ryc. 3. Krzywe płynięcia zaczynów wapiennych zmierzone za pomocą systemu MV2
Fig. 3. Flow curves of lime pastes measured with use of the MV2 sensor system



Ryc. 4. Krzywe płynięcia zaczynów wapiennych zmierzone za pomocą systemu MV2P
 Fig. 4. Flow curves of lime pastes measured with use of the MV2P sensor system

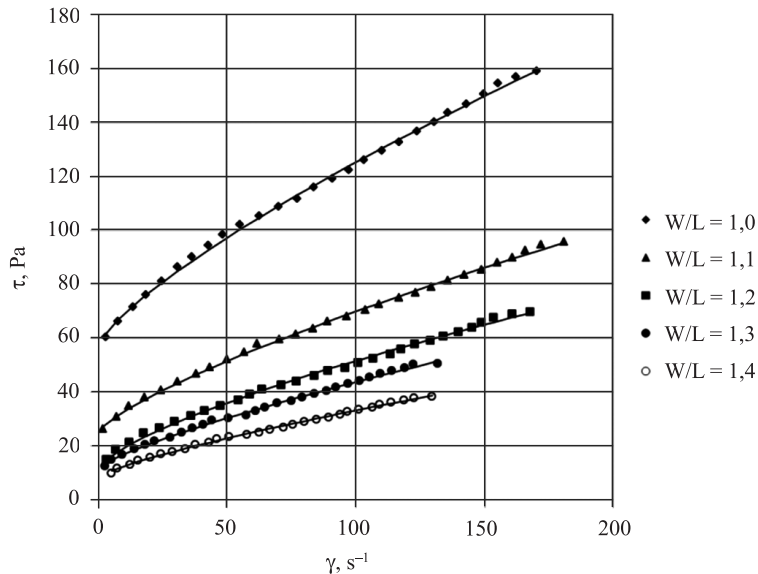
Przedstawione na ryc. 2 i 3 krzywe płynięcia różnią się znacznie od siebie wartościami naprężeń uzyskiwanymi dla tych samych prędkości ścinania, co widać wyraźnie na przykładowym zestawieniu krzywych płynięcia zaczynu o stałym W/L = 1,1 (ryc. 5). Oznaczać to może, że uzyskane wyniki pomiarów obarczone są dodatkowo błędem spowodowanym poślizgiem mieszanki na ścianach cylindrów. W związku z tym krzywe płynięcia zaczynów wapiennych dodatkowo skorygowano, korzystając z metody przedstawionej przez Kiljańskiego [1989]. Widać wyraźnie, że wpływ zjawiska poślizgu maleje wraz ze wzrostem szerokości szczeliny viskozymetru rotacyjnego. Dla cylindrów MV2 szczelina pomiarowa wynosi 2,6 mm, a dla MV1 0,96 mm, dlatego krzywa płynięcia dla systemu MV2 leży bliżej skorygowanej krzywej płynięcia niż krzywa płynięcia dla systemu MV1. Na ryc. 5 przedstawiono również rzeczywistą krzywą płynięcia dla systemu pomiarowego MV2P z cylindrami karbowanymi. Geometria tego systemu jest taka sama jak systemu MV2. Jak widać, uzyskane krzywe płynięcia dla tych systemów praktycznie pokrywają się i znacznie odbiegają od skorygowanej ze względu na poślizg krzywej płynięcia. Świadczy to o znikomym wpływie karbowanej powierzchni cylindrów na eliminację zjawiska poślizgu, dla przypadku badanych zaczynów wapiennych. Tendencja ta występowała dla pozostałych badanych wskaźników wodno-wapiennych W/L.

Wszystkie skorygowane ze względu na poślizg rzeczywiste krzywe płynięcia badanych zaczynów wapiennych przedstawiono na ryc. 6, a wyniki wykonanych na ich podstawie obliczeń parametrów reologicznych modelu Herschela–Bulkleya zestawiono w tabeli 2.



Ryc. 5. Przykładowe krzywe płynięcia uzyskane za pomocą różnych systemów pomiarowych, $W/L = 1,1$

Fig. 5. Sample flow curves measured with use of the different sensor systems, $W/L = 1,1$



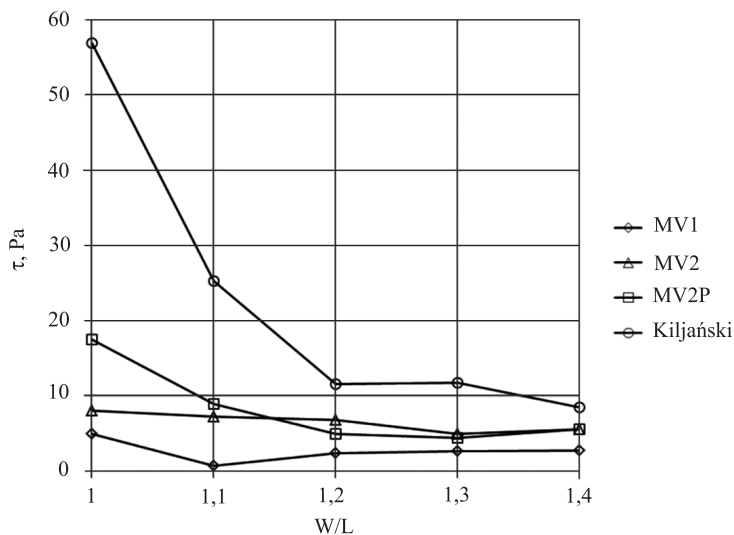
Ryc. 6. Krzywe płynięcia zaczynów wapiennych po korekcie poślizgu metodą Kijańskiego

Fig. 6. Flow curves of the lime pastes corrected by Kijański method

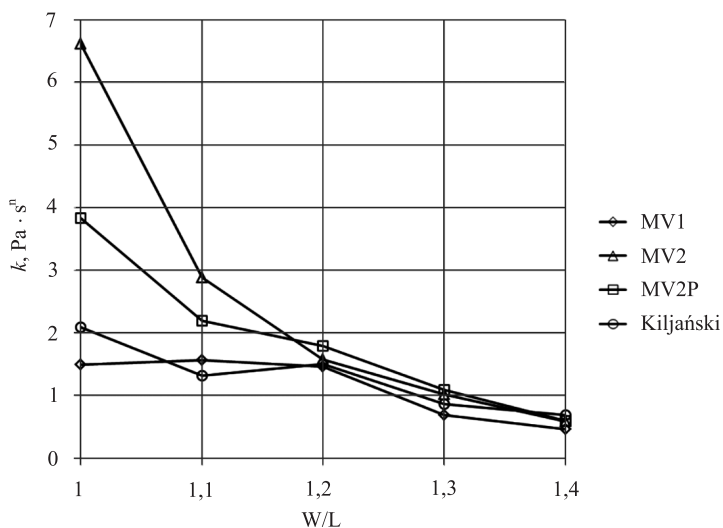
Tabela 2. Parametry reologiczne modelu Herschela–Bulkleya
 Table 2. Rheological parameters of the Herschel–Bulkley model

W/L	MV1				MV2				MV2P				Kiljański			
	τ_0, Pa	$k, \text{Pa} \cdot \text{s}^n$	n	τ_0, Pa	$k, \text{Pa} \cdot \text{s}^n$	n	τ_0, Pa	$k, \text{Pa} \cdot \text{s}^n$	n	τ_0, Pa	$k, \text{Pa} \cdot \text{s}^n$	n	τ_0, Pa	$k, \text{Pa} \cdot \text{s}^n$	n	
1,0	5,0	1,50	0,8096	8,1	6,62	0,5775	17,5	3,84	0,6480	56,9	2,10	0,7563				
1,1	0,7	1,57	0,7308	7,3	2,89	0,6345	8,9	2,21	0,6837	25,3	1,32	0,7646				
1,2	2,4	1,47	0,6741	6,8	1,58	0,6868	5,0	1,80	0,6693	11,6	1,51	0,7119				
1,3	2,7	0,69	0,7224	5,0	1,02	0,7112	4,4	1,10	0,7059	11,8	0,87	0,7830				
1,4	2,8	0,47	0,7395	5,6	0,59	0,7507	5,6	0,59	0,7509	8,5	0,69	0,7774				

Zależność parametrów reologicznych modelu Herschela–Bulkleya od wskaźnika wodno-wapiennego W/L przedstawiono na ryc. 7–9.

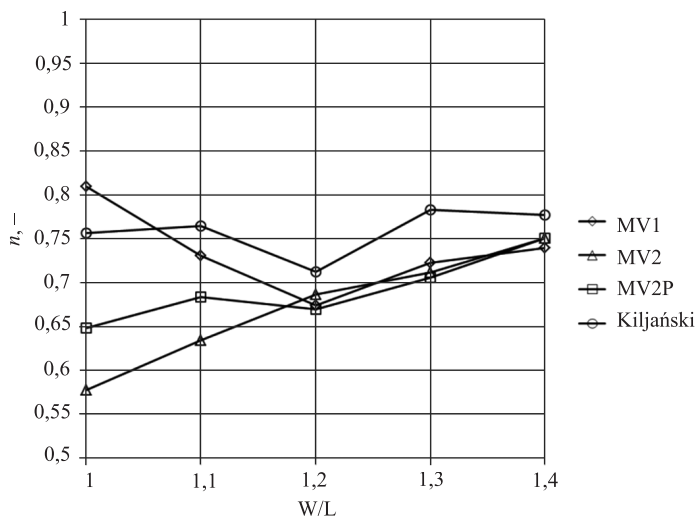


Ryc. 7. Zmiany granicy płynięcia τ_0 w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L
Fig. 7. Changes of the yield stress τ_0 with water-to-lime ratio W/L



Ryc. 8. Zmiany współczynnika sztywności k w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L
Fig. 8. Changes of the consistency index k with water-to-lime ratio W/L

Próg płynięcia τ_0 oraz współczynnik sztywności k maleją wraz ze wzrostem W/L. Tendencja ta po korekcie zjawisk poślizgu jest również zachowana (ryc. 7–8). Liczba strukturalna n dla MV1 ma tendencję malejącą ze wzrostem W/L, natomiast dla systemu MV2 odwrotnie. Duża zbieżność parametru n dla obu systemów występuje dla wskaźnika W/L > 1,2. Dynamika zmian liczby strukturalnej n po korekcie poślizgu znacznie maleje (ryc. 9).



Ryc. 9. Zmiany liczby strukturalnej n w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L
Fig. 9. Changes of the structural number (flow index) n with water-to-lime ratio W/L

Na ryc. 10–12 przedstawiono wielkości błędów, jakie popełnia się podczas wyznaczania parametrów reologicznych badanych mieszanin, w przypadku zaniedbania korekty ze względu na poślizg na ścianach cylindrów. Wartości błędu wyznaczono według zależności:

$$\Delta X = \frac{(X_c - X_{nc})}{X_c} \times 100$$

gdzie:

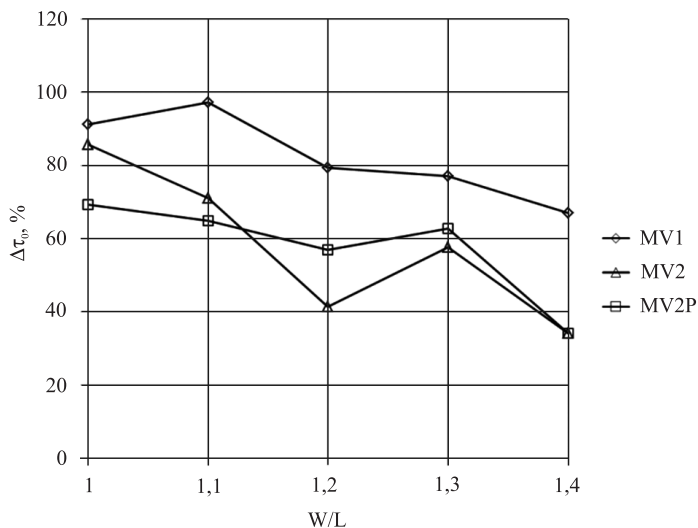
ΔX – wartość błędu badanej wielkości,

X_c – wartość badanej wielkości uzyskana po korekcie ze względu na poślizg,

X_{nc} – wartość badanej wielkości uzyskana przy pominięciu korekty ze względu na poślizg.

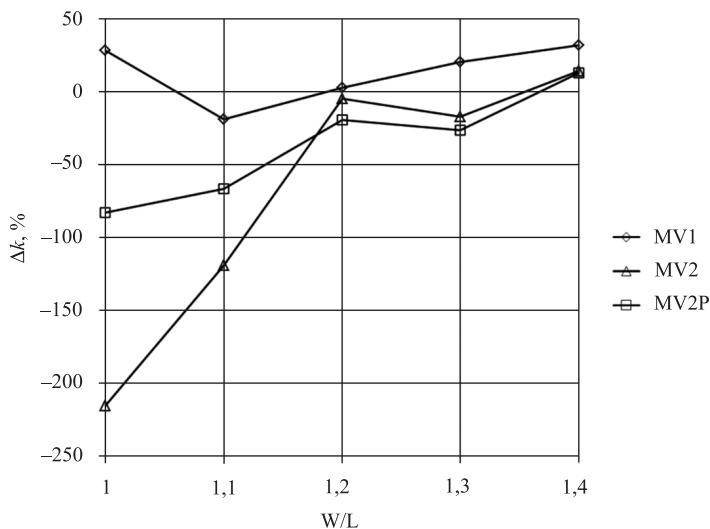
Analizując przebieg zmienności błędów określenia parametrów reologicznych bez uwzględnienia zjawiska poślizgu, widzimy, że wartości te maleją wyraźnie ze wzrostem wskaźnika wodno-wapiennego W/L. Największe błędy popełniamy przy określeniu progu płynięcia τ_0 oraz współczynnika sztywności k . Przykładowo, dla W/L = 1,0 błąd określenia τ_0 wynosi 85–90% i maleje do wartości 35–70% dla W/L = 1,4 w zależności od systemu pomiarowego, natomiast parametr k , dla W/L = 1,0 jest określony z błędem

od minus 220% do 25%, malejąc do wartości około 15–30% dla $W/L = 1,4$ w zależności o systemu pomiarowego. Liczba strukturalna n dla $W/L = 1,0$ jest określona z błędem od minus 7% do 23%, natomiast dla $W/L > 1,2$ oscyluje w granicach 3–10%.



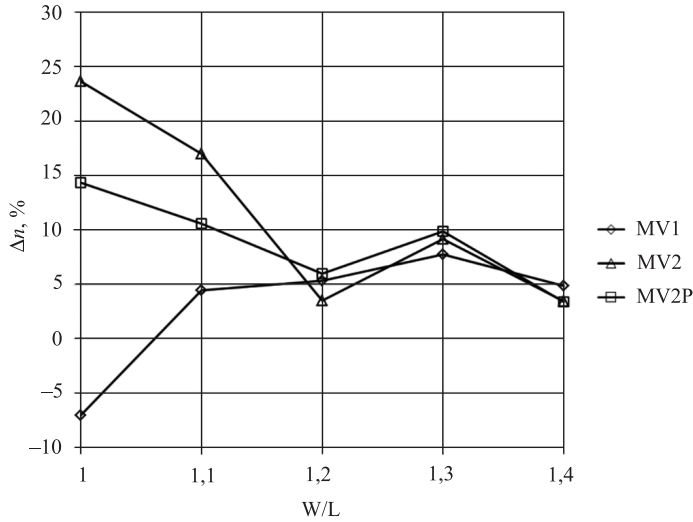
Ryc. 10. Zmiany błędu przy określaniu granicy płynięcia τ_0 w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L

Fig. 10. Changes of the error in determination of the yield stress τ_0 with water-to-lime ratio W/L



Ryc. 11. Zmiany błędu przy określaniu współczynnika sztywności k w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L

Fig. 11. Changes of the error in determination of the consistency index k with water-to-lime ratio W/L



Ryc. 12. Zmiany błędu przy określaniu liczby strukturalnej n w zależności od wskaźnika wodno-wapiennego W/L

Fig. 12. Changes of the error in determination of the structural number (flow index) n with water-to-lime ratio W/L

Przeprowadzone badania i analizy potwierdzają opisywany wcześniej w literaturze znaczący wpływ zjawiska poślizgu na uzyskiwane wyniki pomiarów reologicznych. Kiljański [1989] odnotował nawet ponad trzykrotną różnicę w określeniu szybkości ścinania między wynikami uwzględniającymi i pomijającymi zjawisko poślizgu. Analizy te przeprowadzone były jednakże dla pewnej hipotetycznej cieczy, a nie opierały się na rzeczywistych wynikach pomiarów. Z kolei Saak i inni [2001] ustalili, na drodze badań laboratoryjnych zaczynów cementowych, średnio dwukrotną różnicę w wynikach pomiarów granicy płynięcia przy użyciu metod z eliminacją i bez eliminacji zjawiska poślizgu.

Na wykresach umieszczono również obraz zmian analizowanych błędów dla systemu MV2P, tj. systemu z karbowanymi cylindrami. Widzimy, że system ten nie eliminuje błędów związanych ze zjawiskiem poślizgu na ściankach wiskozymetru rotacyjnego.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania reologiczne zaczynów wapiennych potwierdziły obawy autorów o możliwości wystąpienia zjawiska poślizgu na ściankach przyrządu pomiarowego.

Badania wiskozymetryczne wykonano dla zaczynów wapiennych sporządzonych na bazie wapna CL 90-S, o różnym wskaźniku wodno-wapiennym, zmieniającym się w przedziale W/L = 1,0–1,4. Wykorzystano wiskozymetr rotacyjny Haake Vt550, z trzema zestawami pomiarowymi: MV1, MV2, MV2P. Pozwoliło to na sformułowanie następujących wniosków:

- Zaczyny wapienne zachowują się jak ciała plastyczno-lepkie z wyraźną granicą płynięcia τ_0 . Do aproksymacji krzywych płynięcia wykorzystano 3-parametrowy model Herschela-Bulkleya.
- Brak zgodności uzyskanych krzywych płynięcia dla różnych systemów pomiarowych potwierdza fakt wystąpienia zjawiska poślizgu. Korekty krzywych płynięcia dokonano z wykorzystaniem metody Kiljańskiego, określając wspólną krzywą płynięcia.
- Parametry reologiczne modelu Herschela-Bulkleya wyznaczone na podstawie skorygowanej krzywej płynięcia wykazują znaczne odchylenia od parametrów określonych dla poszczególnych systemów pomiarowych. Błąd określenia maleje wraz ze wzrostem wskaźnika wodno-wapiennego W/L.
- Zastosowany system MV2P z karbowanymi cylindrami pomiarowymi nie eliminuje zjawiska poślizgu, dla badanych zaczynów wapiennych.

PIŚMIENNICTWO

- Dziubiński, M., Kiljański, T., Sęk, J. (2009). Podstawy reologii i reometrii płynów. Politechnika Łódzka, Łódź.
- Kembłowski, Z. (1973). Reometria płynów nienuetonowskich. WNT, Warszawa.
- Kempiński, J., Parzonka, W. (1984). Badania cech reologicznych zawiesin z uwzględnieniem efektu skalowego. V Seminarium „Transport i Sedymentacja Cząstek Stałych”, A10, 1–14.
- Kempiński, J., Świerzko, R. (2010). Rheological foundations of the hydraulic transport of cement pastes. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Wrocław.
- Kiljański, T. (1989). A method for correction of the wall-slip effect in a Couette rheometer. *Rheolog. Acta*, 28, 61–64.
- Pfannschmidt, P., Reher, E.-O. (1972). Zur Ermittlung der Fliesseigenschaften nicht sedimentierender nicht-Newtonischer Suspensionen mit Wandeffekten in Rotationsviskosimeter. *Plast und Kautschuk*, 19(9).
- PN-EN 459-1:2015-06. Wapno budowlane. Część 1. Definicje, wymagania i kryteria zgodności.
- Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P. (2001). The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. *Cement Concrete Res.*, 31, 205–212.
- Świerzko, R. (2011). Modele reologiczne zaczynów wapiennych oraz wpływ wapna na właściwości reologiczne hybrydowych zaczynów cementowo-wapiennych i gipsowo-wapiennych. Praca doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław.
- Wilkinson, W.L. (1963). Ciecze nienuetonowskie. WNT, Warszawa.

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PARAMETERS OF LIME PASTES WITH CONSIDERATION OF THE WALL-SLIP EFFECT

Abstract. The rheological measurements of the lime pastes were performed with use of the coaxial rotational viscometer Haake Viscotester Vt550, with different sensor systems. Obtained pseudo-curves of flow τ (γ_p) indicated a non-Newtonian behavior of lime pastes, which required the correction to the actual flow curves τ (γ). The corrected flow curves, for the same water-to-lime ratios W/L, but measured with different sensor systems do not coincide with each other, throughout the range of concentrations tested. This indicates the occurrence of the wall-slip effect. Therefore correction of flow curves was performed, according to Kiljański method [1989], to obtain a one flow curve for two different sensor

systems. The approximation of flow curves was carried out with use of the tri-parametric Herschel-Bulkley model. An evaluation of the error in the determination of rheological parameters without taking into account the wall-slip effect was performed.

Key words: lime pastes, rotational viscometer, rheological parameters, Herschel-Bulkley model, wall-slip effect

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.09.2016

Do cytowań – For citation: Kempński, J., Świerzko, R. (2016). Określenie parametrów reologicznych zaczynów wapiennych z uwzględnieniem zjawiska poślizgu. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(3), 195–208.