

**Stanisław Stryczek*, Rafał Wiśniowski*,
Andrzej Gonet*, Albert Złotkowski***

**WPLYW RODZAJU CEMENTU
NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE
ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH
STOSOWANYCH W TECHNOLOGIACH WIERTNICZYCH****

1. WSTĘP

Właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających są bardzo istotne zarówno podczas projektowania, jak i wykonywania prac związanych z uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego z wykorzystaniem technologii wiertniczych. W celu zapewnienia wysokiej skuteczności wykonywanych prac przy uszczelnianiu kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych oraz przy uszczelnianiu górotworu metodami iniekcji otworowej należy pamiętać, aby parametry reologiczne zaczynów uszczelniających dobierać w zależności od:

- warunków złożowych uszczelnianych gruntów i skał,
- geometrii otworu wiertniczego oraz systemu cyrkulacyjnego,
- wzajemnych relacji pomiędzy strumieniem objętości tłoczonego zaczynu a oporami przepływu powstającymi podczas jego tłoczenia, a zwłaszcza w uszczelnianym ośrodku,
- kompatybilności z litologią uszczelnianych warstw,
- stanu technicznego ściany otworu wiertniczego.

Spełnienie wymienionych kryteriów związane jest z doбором modelu reologicznego, a następnie określeniem parametrów reologicznych przyjętego modelu. Prawidłowo wyznaczone parametry reologiczne umożliwiają obliczenia dla konkretnego przypadku oporów przepływu przy założonych [1, 7, 8, 9]:

- parametrach technologicznych zaczynu,
- zakresie (charakterze) przepływu (laminarny, turbulentny lub tłokowy).

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca została wykonana w ramach umowy finansowanej z własnego projektu badawczego. Nr rejestracyjny N N524 369637 (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzroszego)

Znajomość oporów hydraulicznych pozwala na:

- racjonalny dobór technologii uszczelniania górotworu,
- określenie strat ciśnień w układzie cyrkulacyjnym,
- ocenę rozkładu gradientu ciśnienia hydrostatycznego słupa zaczynu uszczelniającego przy jego wytłaczaniu poza kolumnę rur okładzinowych,
- określenie prędkości opadania zaczynu poza rurami okładzinowymi (jeżeli występuje),
- projektowanie strumienia objętości tłoczenia zaczynu uszczelniającego zapewniającego dobre usunięcie płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego,
- określenie promienia zasięgu rozchodzenia się zaczynu w górotworze w przypadku stosowania otworowej iniekcji ciśnieniowej.

Pomimo wielu badań laboratoryjnych oraz doświadczeń przeprowadzonych w różnych jednostkach naukowo-badawczych [1, 9, 10, 11, 16, 17] na przestrzeni ostatnich 20 lat kompleksowa ocena zaczynów uszczelniających pod kątem ich usystematyzowania pod względem reologicznym do chwili obecnej nie została w pełni dokonana. Wynika to między innymi z faktu, że reologia zaczynów uszczelniających jest bardzo skomplikowana i zależy od wielu czynników natury fizykochemicznej, takich jak [3, 4, 5, 6]:

- powierzchnia właściwa oraz granulacja nieorganicznych spoiw hydraulicznych wchodzących w skład zaczynu uszczelniającego,
- iloraz wody i spoiwa hydraulicznego (współczynnik w/s),
- skład chemiczny i mineralny spoiwa hydraulicznego,
- skład chemiczny cieczy zarobowej,
- obecność i skład chemiczny dodatków mineralnych i domieszek chemicznych wchodzących w skład receptury zaczynu,
- sposób i dynamika (czas i szybkość) mieszania zaczynu,
- temperatura zaczynu,
- szybkość hydratacji,
- warunki i sposób pomiaru.

2. WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW CEMENTOWYCH

Właściwości reologiczne świeżych zaczynów cementowych stanowią przedmiot zainteresowań ze względu na ich związek między innymi z:

- przebiegiem procesów wiązania zaczynów,
- konsystencją,
- stabilnością,
- wyborem technologii zatłaczania zaczynów w uszczelniony ośrodek,
- oporami przepływu zaczynu przez system cyrkulacyjny.

Zaczyny uszczelniające, a zwłaszcza typu cementowego, są skoncentrowanymi układami dyspersyjnymi, zawierającymi cząstki stałe o znacznie rozwiniętej powierzchni właściwej.

Układy takie pod względem reologicznym należą do niezwykle złożonych. Wynika to między innymi z faktu, że niezależnie od wpływu wymienionych uprzednio czynników na właściwości reologiczne również w sposób istotny oddziałują reakcje hydratacji zachodzące w zaczynie w funkcji czasu [1, 5, 12, 14].

Ze względu na wielkość ziarn cementu świeże zaczyny cementowe można uważać jak już zaznaczono za układy dyspersyjne. Struktura takiego układu zależy w głównej mierze od masowego ilorazu wody i suchego cementu oraz od uziarnienia cementu, a w konsekwencji od jego powierzchni właściwej. Na właściwości fizykochemiczne powstającej struktury i mikrostruktury zaczynu wpływają również siły działające między ziarnami cementu a cząsteczkami wody, na co z kolei mają wpływ [1, 4, 5]:

- ładunek powierzchniowy,
- stężenie jonów w zaczynie,
- zjawiska adsorpcji.

Podobnie jak i w innych układach ziarna cementu ulegają koagulacji i przy odpowiednio dużej zawartości fazy stałej tworzą ciągłą strukturę koagulacyjną. W uproszczonych modelach omawiających właściwości i parametry świeżych zaczynów cementowych bardzo często nie zwraca się uwagi na powstające produkty hydratacji.

Złożoność układu cement–woda pociąga za sobą duże trudności w interpretacji wyników badań reologicznych uzyskiwanych przez różnych badaczy. Jest to spowodowane głównie tym, że zaczyny cementowe pod względem reologicznym należą do cieczy nienewtonowskich oraz dodatkowo występują zmiany składu fazowego w czasie postępującej hydratacji cząstek cementu. Z tego też względu właściwości reologiczne modelowych struktur nie odpowiadają wynikom pomiarowym parametrów reologicznych układów rzeczywistych.

Duża reaktywność cementu, a zwłaszcza klinkierowej fazy C_3A w porównaniu do cieczy zarobowej powoduje, że w czasie wykonywania pomiarów wszystkie ziarna pokryte są warstewką żelu złożoną z mieszaniny uwodnionych krzemianów ettringitu i portlandytu.

Wzajemna ruchliwość ziarn cementu jest przede wszystkim wynikiem ilości i rodzaju utworzonych w początkowym okresie hydratacji produktów tego procesu. Natomiast skład chemiczny i mineralny niezhydratyzowanych ziarn cementu wpływa na właściwości fizykochemiczne powstałej warstewki żelu. Rozkład ładunku na powierzchni cząstek koloidalnych oraz stężenie fazy stałej określają siły międzyziarnowe. Wpływają także na uporządkowanie ziarn w strukturze koagulacyjnej, a przez to na zachowanie się zaczynu przy poddawaniu go siłom zewnętrznym.

Powstanie warstewki wody o uporządkowanej budowie na powierzchniach stałych odgrywa ważną rolę w kształtowaniu właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających, a zwłaszcza typu cementowego. Strefa wewnętrzna o uporządkowanej budowie przechodzi stopniowo w strefę pośrednią, w której cząstki cieczy zarobowej rozmieszczone są przypadkowo, a następnie w strefę zewnętrzną roztworu wodnego.

Wielkość stref wewnętrznej i pośredniej decyduje o lepkości zaczynu uszczelniającego. W zależności od wielkości ładunku powierzchniowego fazy stałej zmienia się szerokość warstwy dyfuzyjnej oraz wielkość siły działającej na jony w powstałym roztworze. W za-

czynnie cementowym ze względu na dużą reaktywność faz cementowych w porównaniu do wody właściwości reologiczne zaczynu uszczelniającego, poza współczynnikiem wodno-spoiwowym i dyspersją spoiwa hydraulicznego, zależą głównie od rodzaju i ilości produktów hydratacji (cementu), natomiast charakter powierzchni faz klinkierowych ma mniejsze znaczenie.

Następnym czynnikiem wpływającym na właściwości oraz parametry świeżego zaczynu cementowego jest skład mineralny cementu, co w konsekwencji wpływa na przebieg reakcji hydratacji. W wyniku hydratacji zaczynu cementowego do roztworu przechodzi znaczna część gipsu, a faza ciekła nasyca się jonami Ca^{2+} i SO_4^{2-} oraz alkaliami zawartymi w cemencie. W ciągu kilku minut powstaje pewna ilość ettringitu, który o ile tworzy zwartą otoczkę na ziarnach cementu, nie wpływa w sposób znaczący na właściwości reologiczne zaczynu. Także początkowa reakcja alitu z wodą w okresie indukcyjnym nie wpływa na strukturę zaczynu, gdy jest on mieszany tak, aby powodowało to odrywanie hydratów od powierzchni ziarn. Dopiero po okresie indukcji krystalizacja wodorotlenku wapniowego i przyspieszona hydratacja alitu pociąga za sobą znaczny wzrost lepkości zaczynu. Właściwości reologiczne zaczynu cementowego ulegają więc szybkim zmianom w czasie.

W cementach charakteryzujących się małą zawartością glinianu trójwapniowego (C_3A) faza ciekła jest nasycona siarczanem wapniowym, który działa jako silny flokulant, zmniejsza rozpuszczalność glinianów wapniowych i przyspiesza hydratację krzemianów. Przy dużej zawartości C_3A krystalizuje ettringit i zmniejsza się zawartość jonów siarczanowych. W celu polepszenia parametrów reologicznych zaczynów cementowych można zastąpić gips mieszaniną lignosulfonianów i węgla sodowego.

Wpływ początkowych reakcji chemicznych na proces hydratacji i właściwości fizyczne zaczynu cementowego jest tym wyraźniejszy, im większa jest powierzchnia właściwa cementu. Przy danej zawartości wody w zaczynie (współczynnik w/c) siła spójności oraz odporność na siły ścinające są tym wyższe, im większa jest powierzchnia właściwa cementu.

W związku z powyższym zaczyny uszczelniające mogą charakteryzować się różnymi właściwościami reologicznymi. Krzywe płynięcia mogą być odwracalne lub mogą wykazywać histerezę. Spowodowane to może być między innymi tym, że przy krótkich czasach pomiaru dominujące jest niszczenie struktury zaczynu, natomiast przy dłuższych czasach dominująca jest jej odbudowa. Zatem w świeżych zaczynach cementowych występuje nakładanie się procesów niszczenia struktury pod wpływem ścinania w lepkościomierzu i jej odbudowy przez produkty hydratacji ziarn cementu. W tabeli 1–3 zestawiono składy chemiczne i mineralogiczne aktualnie produkowanych i stosowanych cementów [2, 6, 9, 10]:

- cement portlandzki klasy CEM I 32,5R – cementownia Górażdże Cement S.A. Heidelberg Cement Group w Choruli,
- cement portlandzki klasy CEM I 32,5R – cementownia Ożarów. Grupa Ożarów w Ożarowie,
- cement portlandzki klasy CEM I 42,5R – cementownia Ożarów. Grupa Ożarów w Ożarowie,
- cement wiertniczy klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec S.A., Grupa Ożarów w Rejowcu,

- cement wiertniczy klasy G, gatunek HSR – cement importowany z Niemiec przez Serwis Cementacyjny Oddziału Naftgaz w Wołominie – PNiG Jasło,
- cement hutniczy klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA – Cementownia Małogoszcz, Grupa Lafarge Cement S.A. w Małogoszczu,
- cement hutniczy klasy CEM III/A 42,5 N – Cementownia Małogoszcz, Grupa Lafarge Cement S.A. w Małogoszczu.

Tabela 1

Skład chemiczny cementów używanych do cementowania otworów wiertniczych i iniekcji otworowych

Składnik	Cement portlandzki CEM I 32,5 R (Góraźdze)	Cement portlandzki CEM I 32,5 R (Ożarów)	Cement portlandzki CEM I 42,5 R (Ożarów)	Cement wiertniczy G HSR (Rejowiec)	Cement wiertniczy G-HSR (niemiecki)	Cement hutniczy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA (Małogoszcz)	Cement hutniczy CEM III/A 42,5N (Małogoszcz)
SiO ₂	20,0	21,7	21,6	21,22	–	30,9	27,93
Al ₂ O ₃	5,10	5,00	4,94	4,23	–	6,21	5,96
Fe ₂ O ₃	2,80	2,27	2,30	5,49	–	1,43	1,75
CaO	62,5	64,7	64,2	64,27	–	49,5	51,18
MgO	1,30	2,20	2,18	0,91	0,8	5,37	4,32
SO ₃	2,80	3,00	3,18	2,16	2,7	2,82	3,10
Na ₂ O	0,13	0,14	0,13	0,53	0,7	0,91	0,89
K ₂ O	0,85	0,88	0,86	–	–	–	–
Cl ⁻	0,08	0,02	0,02	0,01	–	0,04	0,04

Tabela 2

Skład mineraliczny cementów portlandzkich i wiertniczych używanych do cementowania otworów wiertniczych i iniekcji otworowych

Składnik	Cement portlandzki CEM I 32,5 R (Góraźdze)	Cement portlandzki CEM I 32,5 R (Ożarów)	Cement portlandzki CEM I 42,5 R (Ożarów)	Cement wiertniczy G HSR (Rejowiec)	Cement wiertniczy G-HSR (niemiecki)
C3A	9,0	9,4	9,4	1,90	1,2
C4AF	8,2	6,9	6,9	16,69	–
C3S	56,50	67,6	67,6	56,11	51
C2S	15,1	12,6	12,6	17,07	–
C4AF + 2 · C3A	–	–	–	19,97	19,6

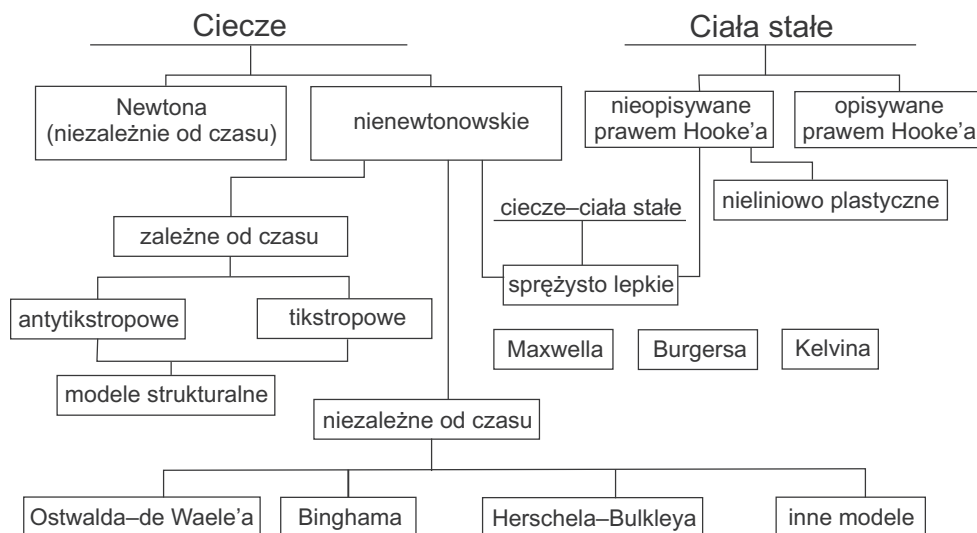
Tabela 3

Skład cementów hutniczych oraz skład mineralogiczny klinkieru użytego do produkcji cementu

Skład cementu hutniczego, %	Kamień wapienny	3,7		
	Żużel	60,8		
	Klinkier	35,5	Skład mineralogiczny klinkieru, %	
			C ₃ A	9,9
			C ₄ AF	9,7
C ₃ S			62,9	
		C ₂ S	10,7	

3. MODELE REOLOGICZNE CIECZY

Rzeczywiste substancje płynne niejednokrotnie posiadają właściwości zarówno cieczy, jak i ciał stałych. Na rysunku 1 przedstawiono podział ciał ze względu na właściwości mechaniczne.



Rys. 1. Podział ciał ze względu na właściwości mechaniczne [11, 13]

W celu opisanie związków przyczynowo-skutkowych, występujących pomiędzy parametrami reologicznymi cieczy a technologią ich stosowania, tworzy się modele reologiczne. Trafność dopasowania modelu reologicznego do zachowania się rzeczywistej cieczy mi-

nimalizuje błędy obliczanych wielkości: charakteru przepływu, oporów przepływu cieczy w systemie cyrkulacyjnym, sedymentacji cząstek. W zależności od rodzaju cieczy stosuje się różne wzory matematyczne opisujące jej zachowanie się podczas przepływu.

Na podstawie analizy literatury [1, 11, 13, 15, 17] zależności te można podzielić na dwie grupy:

- związki między szybkością ścinania a naprężeniem stycznym,
- związki między szybkością ścinania lub naprężeniem stycznym a lepkościami pozornymi.

Do pierwszej grupy zaliczyć należy modele:

$$\text{– Newtona} \quad \tau = \eta \left(-\frac{dv}{dr} \right) \quad (1)$$

$$\text{– Bingham'a} \quad \tau = \tau_y + \eta_{pl} \left(-\frac{dv}{dr} \right) \quad (2)$$

$$\text{– Cassona} \quad \sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta_{cas}} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr} \right)} \quad (3)$$

$$\text{– Herschela–Bulkleya} \quad \tau = \tau_y + k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (4)$$

$$\text{– Ostwalda–de Waele'a} \quad \tau = k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (5)$$

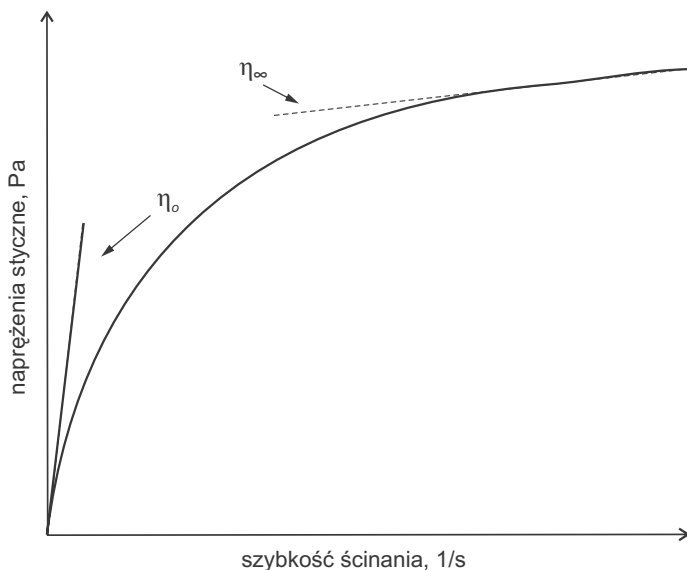
$$\text{– Vom Berga} \quad \tau = \tau_y + B \sin h^{-1} \left(\frac{-\frac{dv}{dr}}{C} \right)^n \quad (6)$$

$$\text{– Eyringa} \quad \tau = a \left(-\frac{dv}{dr} \right) + B \sin h^{-1} \left(\frac{-\frac{dv}{dr}}{C} \right) \quad (7)$$

$$\text{– Robertsona–Stiffa} \quad \tau = a \left(-\frac{dv}{dr} + C \right)^h \quad (8)$$

Zaletą matematycznego opisu cieczy nienewtonowskich w postaci równań (1–8) jest możliwość analitycznego poszukiwania związków fizycznych z jej udziałem. Wadą zaś niejednokrotnie niemożliwe analityczne rozwiązanie równań konstytutywnych dla omawianych cieczy.

Drugą grupę modeli reologicznych stanowią zależności pozwalające określić wartość lepkości cieczy w funkcji szybkości ścinania lub naprężenia stycznego oraz lepkości pozornych wyznaczonych przy granicznych szybkościach ścinania (zbieżających do zera oraz do nieskończoności) (rys. 2).



Rys. 2. Lepkości pozorne dla szybkości ścinania zbieżających do zera i do nieskończoności [13, 16]

Wśród tych związków wyróżnić należy modele reologiczne:

– Carreau–Yasudy
$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + \left(\lambda \left(-\frac{dv}{dr} \right) \right)^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (9)$$

– Crossa
$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{\left(1 + \lambda \left(-\frac{dv}{dr} \right) \right)} \quad (10)$$

– Ellisa
$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_2} \right)^{\alpha-1}} \quad (11)$$

– Kriegera–Dougherty’ego
$$\eta_r = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{-[\eta]\Phi_m} \quad (12)$$

$$- \text{Metera} \quad \eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_2}\right)^{\alpha-1}} \quad (13)$$

$$- \text{Powella-Eyringa} \quad \eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \frac{\sinh^{-1}\left(\lambda\left(-\frac{dv}{dr}\right)\right)}{\lambda\left(-\frac{dv}{dr}\right)} \quad (14)$$

gdzie:

- τ – naprężenia styczne
- τ_y – granica płynięcia
- τ_{pe} – stała materiałowa
- dv/dr – gradient prędkości ścinania
- η – lepkość
- η_{pl} – lepkość plastyczna
- η_{pl} – lepkość Cassona
- η_0 – lepkość zerowa
- η_{∞} – lepkość przy szybkości ścinania dążącej do nieskończoności
- k – współczynnik konsystencji
- n – wykładnik potęgowy
- Φ – stopień upakowania cząstek dla modelu Kriegera–Daugherty’ego
- Φ_m – maksymalny stopień upakowania cząstek Kriegera–Daugherty’ego
- λ – stała czasowa

Zaletą matematycznego opisu cieczy nienewtonowskich w postaci równań (10–14) jest wyznaczenie jej lepkości pozornej, co znacznie upraszcza procedury algorytmiczne przy programowaniu numerycznym. Do wad zapisu matematycznego w postaci (10–14) zaliczyć należy konieczność wyznaczania granicznych lepkości pozornych, co nie zawsze jest technicznie i technologicznie możliwe.

Podejmując próbę oceny reologicznych właściwości tak skomplikowanych płynów jakimi są zaczyny uszczelniające, bardzo istotne jest, aby pomiary uzyskane z badań były niezależne od typu aparatury, która te badania wykonuje. Dlatego wielu autorów wykonuje badania porównawcze na różnego rodzaju aparaturze, najczęściej na lepkościomierzach obrotowych o współosiowych cylindrach oraz lepkościomierzach kapilarnych i rurowych. Do takich porównań doświadczenia muszą być przeprowadzane w jak najszerszych zakresach szybkości ścinania [11, 12, 15, 16].

Stosowanie metody dwupunktowej w celu określenia modelu i parametrów reologicznych prowadzi do słabego dopasowania krzywej płynięcia zaczynu do danych pomiarowych, a przez to do niedokładnych wyników, co w konsekwencji uniemożliwia wybór odpowiedniego modelu reologicznego.

Przyjęcie właściwego modelu reologicznego wpływa na dokładności obliczeń oporów przepływu zaczynu uszczelniającego w systemie cyrkulacyjnym.

W celu określenia strat ciśnienia powodowanych przepływem strumienia objętości zaczynu ustala się makroskopowo jednorodne elementy cyrkulacji, a następnie dla każdego z nich określa się:

- prędkość przepływu zaczynu w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego,
- charakter przepływu (w zależności od przyjętego modelu identyfikowany wartością liczby Reynoldsa lub uogólnioną liczbą Reynoldsa).

W zależności od charakteru przepływu:

- dla przepływu laminarnego wyznacza się opory przepływu z odpowiednich wzorów (Newtona, Binghama, Cassona, Ostwalda–de Waele’a, Herschela–Bulkleya),
- dla przepływu turbulentnego określa się współczynnik strat na tarcie Fanninga, a następnie ze wzoru Fanninga oblicza się opory przepływu.

Dobór optymalnego modelu reologicznego zaczynów uszczelniających polegał na określeniu krzywej reologicznej umożliwiającej najlepsze opisanie wyników pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne (τ) – szybkość ścinania ($\dot{\gamma}$).

Wykorzystując metodę analizy regresji, wyznaczono parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego.

W celu ułatwienia obliczeń związanych, z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu numerycznego „Rheo Solution”. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych [12, 15, 18].

4. BADANIA LABORATORYJNE

Celem badań laboratoryjnych było określenie wpływu:

- współczynnika wodno-cementowego,
- składu chemicznego i mineralnego cementów,
- rodzaju cementu

na parametry reologiczne zaczynów uszczelniających i wybór właściwego modelu.

Pomiaru właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających dokonano za pomocą lepkościomierza obrotowego współosiowo-cylindrycznego typu „Chan 35 API Viscometer”, o 12 prędkościach obrotowych tzn.: 600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr/min, co odpowiada następującym szybkościom ścinania ($\dot{\gamma}$): 1022; 511,2; 340,8; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 4,11; 3,41; 1,70 s⁻¹.

Do sporządzania zaczynów uszczelniających stosowano następujące nieorganiczne spoiwa hydrauliczne [1]:

- cement portlandzki klasy CEM I 42,5R – cementownia Ożarów. Grupa Ożarów w Ożarowie,
- cement wiertniczy klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec S.A., Grupa Ożarów w Rejowcu,
- cement wiertniczy klasy G, gatunek HSR – cement importowany z Niemiec przez Serwis Cementacyjny Oddziału Naftgaz w Wołominie – PNiG Jasło,
- cement hutniczy klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA – Cementownia Małogoszcz, Grupa Lafarge Cement S.A. w Małogoszczy,

Współczynnik wodno-cementowy (w/c) dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,4; 0,5; 0,6.

Temperatura zaczynów uszczelniających przeznaczonych do badania parametrów reologicznych wynosiła 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) [293 K].

Cementy przeznaczone do sporządzania zaczynów uszczelniających przesiewano przez sita o oczka kwadratowego 0,20 mm i 0,08 mm (PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*).

Cieczą zarobową była woda wodociągowa pozbawiona wszelkich zanieczyszczeń mechanicznych.

Odmierzoną objętość cieczy zarobowej wlewano do naczynia plastikowego, a następnie uruchamiano elektryczne mieszadło szybkoobrotowe. Kolejno w ciągu 15–30 sekund dodawano uprzednio odważoną masę badanych cementów. Czas mieszania sporządzanych zaczynów uszczelniających wynosił około 3 minuty.

Tak przygotowany zaczyn uszczelniający przelewano w maksymalnie krótkim czasie do naczynia pomiarowego lepkościomierza obrotowego typu „Chan 35”. Następnie rozpoczęto pomiar właściwości reologicznych badanych zaczynów od szybkości ścinania 1022 s^{-1} , a kończono na szybkości $1,7\text{ s}^{-1}$.

W tabelach 4–11 zostały przedstawione obliczone parametry reologiczne zaczynów cementowych o różnych wartościach współczynnika wodno-cementowego.

Parametry reologiczne obliczono dla następujących modeli [11, 12, 15, 17, 18]:

- Newtona,
- Bingham’a,
- Cassona,
- Ostwalda–de Waele’a,
- Herschela–Bulkleya.

Za najlepszy model reologiczny dla każdego z analizowanych zaczynów uszczelniających przyjmowano taki, który charakteryzował się największą wartością współczynnika korelacji. Na rysunkach 3–7 przedstawiono graficznie dopasowanie modeli reologicznych do uzyskanych wartości zależności naprężeń stycznych od szybkości ścianania.

Tabela 4

Parametry wybranych modeli reologicznych zaczynów sporządzonych na podstawie cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec, dla różnych współczynników w/c

Parametry reologiczne		w/c		
		0,4	0,5	0,6
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona, Pa · s	0,265	0,069	0,022
	Współczynnik korelacji, –	0,872	0,860	0,672
Model Bingham	Lepkość plastyczna, Pa · s	0,214	0,055	0,016
	Granica płynięcia, Pa	16,981	8,955	3,993
	Współczynnik korelacji, –	0,954	0,973	0,957
Model Ostwalda–de Waele’a	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	0,350	2,532	1,567
	Wykładnik potęgowy, –	0,576	0,445	0,340
	Współczynnik korelacji, –	0,988	0,993	0,989
Model Cassona	Lepkość Cassona, Pa · s	0,161	0,035	0,009
	Granica płynięcia, Pa	6,223	4,516	2,434
	Współczynnik korelacji, –	0,969	0,990	0,986
Model Herschela–Bulkeleya	Granica płynięcia, Pa	–8,315	3,193	1,518
	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	8,747	1,063	0,580
	Wykładnik potęgowy, –	0,423	0,573	0,488
	Współczynnik korelacji, –	0,999	0,997	0,998
Lepkość pozorna przy 1022,04, s ⁻¹ , Pa · s		brak	0,059	0,018

Tabela 5

Wyniki pomiarów oraz obliczone wartości lepkości pozornej dla cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec

Szybkość ścinania, s ⁻¹	Naprężenia styczne, Pa			Lepkość pozorna, Pa · s		
	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$
1,703	4,599	3,066	1,916	2,700	1,800	1,125
3,407	6,899	4,216	2,300	2,025	1,237	0,675
5,110	8,687	4,854	3,066	1,700	0,950	0,600
10,220	13,286	7,921	3,705	1,300	0,775	0,362
17,034	18,396	10,092	4,088	1,080	0,592	0,240
34,068	29,638	13,286	4,854	0,870	0,390	0,142
51,102	39,347	14,819	5,365	0,770	0,290	0,105
102,204	56,465	18,651	6,899	0,552	0,182	0,067
170,340	68,730	22,739	8,431	0,403	0,133	0,049
340,680	93,513	31,171	10,986	0,274	0,091	0,032
511,020	114,464	39,858	14,308	0,224	0,078	0,028
1022,040	–	60,809	18,396	–	0,059	0,018

Tabela 6

Parametry wybranych modeli reologicznych zaczynów sporządzonych na bazie cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cement importowany z Niemiec, dla różnych współczynników w/c

Parametry reologiczne		w/c		
		0,4	0,5	0,6
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona, Pa · s	0,085	0,032	0,022
	Współczynnik korelacji, –	0,848	0,537	0,806
Model Bingham	Lepkość plastyczna, Pa · s	0,068	0,022	0,017
	Granica płynięcia, Pa	11,389	6,212	3,436
	Współczynnik korelacji, –	0,968	0,912	0,986
Model Ostwalda–de Waele’a	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	3,120	2,034	1,495
	Wykładnik potęgowy, –	0,449	0,369	0,336
	Współczynnik korelacji, –	0,996	0,995	0,957
Model Cassona	Lepkość Cassona, Pa · s	0,044	0,013	0,009
	Granica płynięcia, Pa	5,619	3,562	2,154
	Współczynnik korelacji, –	0,987	0,954	0,997
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia, Pa	2,732	-0,754	2,422
	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	1,805	2,606	0,138
	Wykładnik potęgowy, –	0,529	0,333	0,697
	Współczynnik korelacji, –	0,998	0,996	0,996
Lepkość pozorna przy 1022,04, s ⁻¹ , Pa · s		0,073	0,024	0,020

Tabela 7

Wyniki pomiarów oraz obliczone wartości lepkości pozornej dla cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cement importowany z Niemiec

Szybkość ścinania, s ⁻¹	Napężenia styczne, Pa			Lepkość pozorna, Pa · s		
	w/c = 0,4	w/c = 0,5	w/c = 0,6	w/c = 0,4	w/c = 0,5	w/c = 0,6
1,703	4,088	2,044	1,916	2,400	1,200	1,125
3,407	4,854	3,321	2,427	1,425	0,975	0,712
5,110	6,388	4,343	2,811	1,250	0,850	0,550
10,220	8,943	4,854	3,194	0,875	0,475	0,312
17,034	12,264	6,388	3,960	0,720	0,375	0,232
34,068	16,608	7,154	4,343	0,487	0,210	0,127
51,102	18,651	8,431	4,854	0,365	0,165	0,095
102,204	23,762	10,731	6,388	0,232	0,105	0,062
170,340	29,127	13,286	7,410	0,171	0,078	0,043
340,680	40,880	18,140	10,220	0,120	0,053	0,030
511,020	50,078	21,207	12,264	0,098	0,041	0,024
1022,040	74,606	24,528	20,184	0,073	0,024	0,020

Tabela 8

Parametry wybranych modeli reologicznych zaczynów sporządzonych na podstawie cementu hutniczego klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA – cementownia Małogoszcz, dla różnych współczynników w/c

Parametry reologiczne		w/c		
		0,4	0,5	0,6
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona, Pa · s	0,870	0,120	0,054
	Współczynnik korelacji, –	0,865	0,823	0,666
Model Bingham	Lepkość plastyczna, Pa · s	0,679	0,094	0,039
	Granica płynięcia, Pa	21,081	16,614	9,555
	Współczynnik korelacji, –	0,966	0,955	0,938
Model Ostwalda–de Waele’a	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	7,931	3,675	2,959
	Wykładnik potęgowy, –	0,542	0,489	0,392
	Współczynnik korelacji, –	0,998	0,992	0,998
Model Cassona	Lepkość Cassona, Pa · s	0,0467	0,068	0,023
	Granica płynięcia, Pa	8,522	7,681	5,325
	Współczynnik korelacji, –	0,982	0,975	0,991
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia, Pa	–5,607	0,093	0,074
	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ	11,311	4,302	3,056
	Wykładnik potęgowy, –	0,478	0,454	0,383
	Współczynnik korelacji, –	0,999	0,997	0,999
Lepkość pozorna przy 1022,04, s ⁻¹ , Pa · s		brak	0,101	0,043

Tabela 9

Wyniki pomiarów oraz obliczone wartości lepkości pozornej dla cementu hutniczego klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA – cementownia Małogoszcz

Szybkość ścinania, s ⁻¹	Naprężenia styczne, Pa			Lepkość pozorna, Pa · s		
	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$
1,703	12,008	4,088	3,449	7,050	2,400	2,025
3,407	14,819	5,877	4,471	4,350	1,725	1,312
5,110	17,374	7,793	5,493	3,400	1,525	1,075
10,220	25,806	12,520	7,665	2,525	1,225	0,750
17,034	36,537	17,119	9,837	2,145	1,005	0,577
34,068	57,488	25,039	12,903	1,687	0,735	0,379
51,102	69,496	28,872	14,308	1,360	0,565	0,280
102,204	100,156	36,537	18,140	0,980	0,357	0,177
170,340	124,429	43,435	21,207	0,730	0,255	0,124
340,680	–	57,615	27,849	–	0,169	0,082
511,020	–	–	33,215	–	–	0,065
1022,040	–	–	44,202	–	–	0,043

Tabela 10

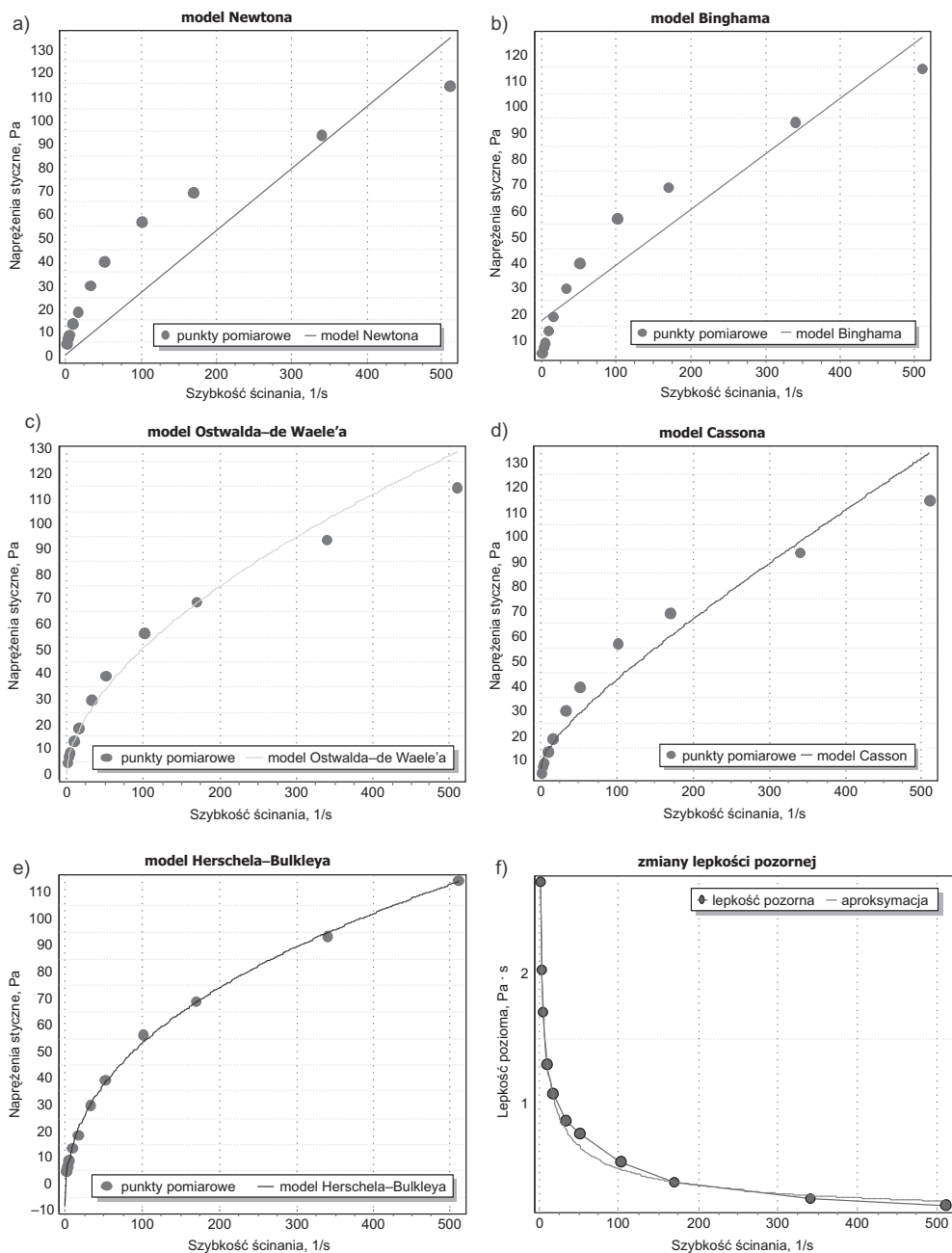
Parametry wybranych modeli reologicznych zaczynów sporządzonych na bazie cementu portlandzkiego klasy CEM I 42,5R – cementownia Ożarów, dla różnych współczynników w/c

Parametry reologiczne		w/c	0,4	0,5	0,6
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona, Pa · s		0,272	0,079	0,029
	Współczynnik korelacji, –		0,917	0,816	0,849
Model Bingham	Lepkość plastyczna, Pa · s		0,229	0,062	0,023
	Granica płynięcia, Pa		14,404	11,086	4,039
	Współczynnik korelacji, –		0,968	0,953	0,984
Model Ostwalda-de Waele'a	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ		2,874	2,748	1,576
	Wykładnik potęgowy, –		0,612	0,463	0,370
	Współczynnik korelacji, –		0,994	0,999	0,968
Model Cassona	Lepkość Cassona, Pa · s		0,180	0,041	0,013
	Granica płynięcia, Pa		4,699	5,249	2,348
	Współczynnik korelacji, –		0,979	0,976	0,998
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia, Pa		-4,653	-0,009	2,442
	Współczynnik konsystencji, Pa · s ⁿ		5,443	2,906	0,223
	Wykładnik potęgowy, –		0,503	0,451	0,664
	Współczynnik korelacji, –		0,999	0,999	0,998
Lepkość pozorna przy 1022,04, s ⁻¹ , Pa · s			Brak	0,065	0,025

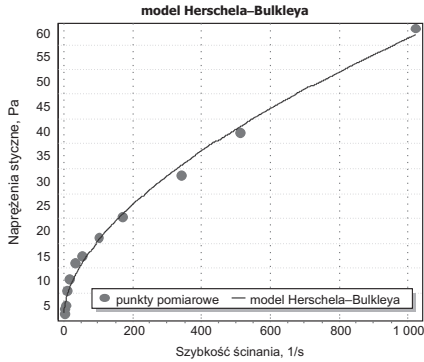
Tabela 11

Wyniki pomiarów oraz obliczone wartości lepkości pozornej dla cementu portlandzkiego klasy CEM I 42,5R

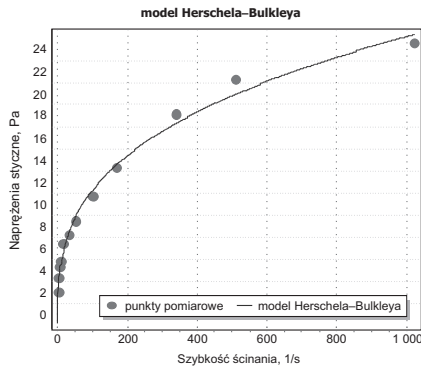
Szybkość ścinania, s ⁻¹	Naprężenia styczne, Pa			Lepkość pozorna, Pa · s		
	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$	$w/c = 0,4$	$w/c = 0,5$	$w/c = 0,6$
1,703	4,088	3,577	2,044	2,400	2,100	1,200
3,407	5,621	4,343	2,555	1,650	1,275	0,750
5,110	7,410	5,621	3,321	1,450	1,100	0,650
10,220	11,498	7,921	3,705	1,125	0,775	0,362
17,034	17,374	11,498	4,471	1,020	0,675	0,262
34,068	26,061	15,075	5,238	0,765	0,442	0,154
51,102	33,726	17,885	5,877	0,660	0,350	0,115
102,204	54,422	23,506	7,537	0,532	0,230	0,074
170,340	67,963	29,127	9,581	0,399	0,171	0,056
340,680	95,302	39,602	13,542	0,280	0,116	0,040
511,020	120,852	47,523	16,352	0,236	0,093	0,032
1022,040	–	66,941	26,061	–	0,065	0,025



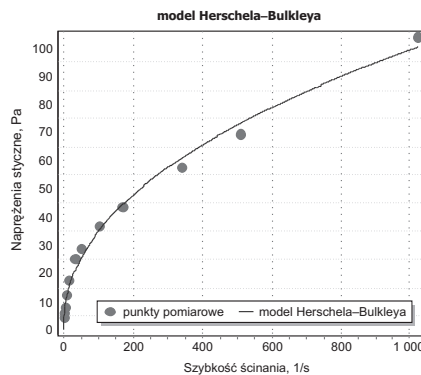
Rys. 3a), b), c), d), e), f). Przykładowe wykresy zależności naprężeń stycznych od prędkości ścinania oraz zmiany lepkości pozornej dla cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec, $w/c = 0,4$



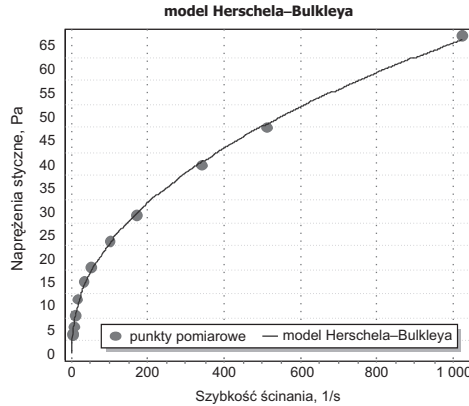
Rys. 4. Wykres zależności naprężeń stycznych od prędkości ścianania przedstawiony modelem Herschela-Bulkleya dla cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cementownia Rejowiec, $w/c = 0,5$



Rys. 5. Wykres zależności naprężeń stycznych od prędkości ścianania przedstawiony modelem Herschela-Bulkleya dla cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR – cement importowany z Niemiec, $w/c = 0,5$



Rys. 6. Wykres zależności naprężeń stycznych od prędkości ścianania przedstawiony modelem Herschela-Bulkleya dla cementu hutniczego klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA – cementownia Małogoszcz, $w/c = 0,5$



Rys. 7. Wykres zależności naprężeń stycznych od prędkości ścinania przedstawiony modelem Herschela–Bulkleya dla cementu portlandzkiego klasy CEM I 42,5R – cementownia Ożarów, w/c 0,5

6. WNIOSKI

- Badane zaczyny uszczelniające ze względu na ich właściwości reologiczne we wszystkich przypadkach najlepiej mogą być opisane modelem reologicznym Herschela–Bulkleya.
- Modeli prostoliniowych (Newtona i Binghama) badanych zaczynów uszczelniających nie powinno się stosować do dokładnych obliczeń oporów przepływu, które mogą wystąpić w procesie uszczelniania kolumn rur okładzinowych, zwłaszcza w głębokich otworach wiertniczych.
- Spośród przebadanych zaczynów cementowych dla przyjętych współczynników wodno-cementowych największą płynnością odznaczają się zaczyny sporządzone na bazie cementu portlandzkiego klasy G, gatunek HSR importowany z Niemiec, a najmniejszą płynnością z cementu hutniczego klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA z cementowni Małogoszcz.
- Sporządzając zaczyn uszczelniający na bazie o cementu hutniczego klasy CEM III/A 32,5 N-LH/HSR/NA z cementowni Małogoszcz, należy uwzględnić konieczność zwiększenia objętości wody zarobowej w celu osiągnięcia parametrów reologicznych zapewniających minimalne opory przepływu oraz odpowiedni czas przetłaczalności.

LITERATURA

- [1] Gonet A., Stryczek S.: *Reologia wybranych zaczynów uszczelniających wykonanych z cementów Górażdże Cement S.A.*, Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła 2001
- [2] *Cement, kruszywa, beton w ofercie Grupy Górażdże*. Katalog firmowy Górażdże Cement S.A., Chorula, czerwiec 2007

- [3] Jasiczak J., Mikołajczak P.: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Alma Mater, Politechnika Poznańska 2003
- [4] Kon E., Józwiak H.: *Klasyfikacje i wymagania dla domieszek do betonu, zaprawy i zaczynu*, „Cement – Wapno – Beton” 2000, nr 1
- [5] Kucharska L.: *Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej*, „Cement – Wapno – Beton” 2000, nr 2
- [6] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. PWN, Warszawa 1991
- [7] Kurdowski W.: *Chemia cementu i betonu*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2010
- [8] Pinka J., Wittenberger G., Engel J.: *Dobywanie łóżisk vrtmi*. AMS F BERG, TU v Kosciach, Kosice 2006
- [9] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła 2001
- [10] Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A.: *Wpływ plastyfikatorów na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających do prac geoinżynierskich*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (półrocznik AGH) 2007, t. 24, z. 1
- [11] Śliwiński J.: *Beton zwykły. Projektowanie i podstawowe właściwości*. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 1999
- [12] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (rocznik AGH) 2006, t. 23, z. 1
- [13] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow-Fluid Coef.* „NTTB Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe” 2001, nr 2–3
- [14] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (półrocznik AGH) 2007, t. 24, z. 1
- [15] Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A.: *Parametry reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających w zależności od czasu ich sporządzenia*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (kwartalnik AGH) 2009, t. 26, z. 1–2
- [16] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Wyznaczanie oporów laminarnego przepływu zaczynów cementowych, opisywanych modelem Herschela-Bulkleya*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (rocznik AGH) 2006, t. 23, z. 1
- [17] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modeli reologicznych cieczy wiertniczej*, „Zeszyty Naukowe AGH Wiertnictwo, Nafta, Gaz” 2001, nr 18/1
- [18] Wiśniowski R.: *O oporach przepływu cieczy wiertniczych*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz” (rocznik AGH) 2003, nr 20/2