

Krzysztof Skrzypaszek, Stanisław Stryczek, Rafał Wiśniowski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Wiertnictwa

Wpływ współczynnika wodno-cementowego na rodzaj modelu reologicznego zaczynu cementowego

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 na właściwości reologiczne w sposób istotny wpływają:

- dodatki i domieszki modyfikujące właściwości technologiczne świeżych i stwardniałych zaczynów,
- złożony chemicznie mechanizm reakcji hydratacji zachodzącej w zaczynie w funkcji czasu.

Szczególną uwagę, ze względu na zapewnienie skuteczności uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, należy zwrócić na właściwości reologiczne zatłaczanych zaczynów cementowych. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu współczynnika wodno-cementowego na parametry reologiczne zaczynu sporządzanego na osnowie cementu wiertniczego klasy G.

Słowa kluczowe: zaczyny cementowe, właściwości reologiczne, modele reologiczne, cementy wiertnicze.

Effect of water-cement ratio on the type of rheological slurry cement model

Sealing slurries, especially cement slurries, are concentrated dispersive systems containing solids of a considerably developed specific surface. Rheologically, such systems are very complex which stems from the fact that certain factors significantly influence rheology, i.e.:

- additives and admixtures modifying technological properties of fresh and set slurries,
- chemically complex hydration reaction mechanism occurring in the slurry in a function of time.

Special attention should be paid to providing efficient sealing conditions in the wellbore, i.e. rheological properties of injected cement slurries. The influence of water/cement ratio on the rheological parameters of sealing slurries based on drilling cement class G was analyzed and the results presented in the paper.

Key words: cement slurries, rheological parameters, rheological models, drilling cements.

Wstęp

Właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających są bardzo istotne zarówno podczas projektowania, jak i realizacji prac związanych z uszczelnianiem, wzmacnianiem oraz zagęszczaniem ośrodka gruntowego i masywu skalnego z wykorzystaniem technologii wiertniczych. W celu zapewnienia wysokiej skuteczności prac wykonywanych przy uszczelnianiu kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, jak i przy uszczelnianiu górotworu metodami iniekcji otworowej należy pamiętać, aby parametry reologiczne zaczynów uszczelniających dobierać w zależności od [1, 2, 6, 7, 8]:

- 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.

Pomimo wielu badań laboratoryjnych oraz doświadczeń realizowanych w różnych jednostkach naukowo-badawczych [2, 3, 10] na przestrzeni ostatnich 20 lat nie dokonano do tej pory kompleksowej oceny zaczynów uszczelniających pod

kątem ich usystematyzowania ze względu na właściwości reologiczne. Wynika to między innymi z faktu, że reologia zaczynów uszczelniających jest bardzo skomplikowana i zależy od wielu czynników natury fizykochemicznej, takich jak:

- powierzchnia właściwa cementu oraz granulacja dodawanych innych nieorganicznych spoiw hydraulicznych wchodzących w skład zaczynu uszczelniającego,
- iloraz masy wody i cementu (spoiwa hydraulicznego), współczynnik w/c lub w/s,

- skład chemiczny i mineralny spoiwa hydraulicznego,
- skład chemiczny cieczy zarobowej,
- obecność i skład chemiczny dodatków i domieszek wchodzących w skład receptury zaczynu,
- sposób i dynamika (czas i szybkość) mieszania zaczynu,
- temperatura zaczynu,
- szybkość hydratacji,
- warunki i sposób pomiaru parametrów reologicznych.

Właściwości reologiczne świeżych zaczynów cementowych

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 stąd, że niezależnie od wpływu wymienionych uprzednio czynników na właściwości reologiczne w istotny sposób oddziałują również reakcje hydratacji zachodzące w zaczynie w funkcji czasu [4, 5].

Ze względu na wielkość ziaren 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 zaczynu wpływają również siły działające między ziarnami cementu a cząsteczkami wody, na co z kolei mają wpływ [5, 9]:

- 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 strukturę 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 , wobec cieczy zarobowej powoduje, że w czasie

wykonywania pomiarów wszystkie ziarna pokryte są warstewką żelu złożoną z mieszaniny uwodnionych krzemianów i glinokrzemianów wapniowych.

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

Powstanie warstewki wody o uporządkowanej budowie na powierzchniach cząstek 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 siły działającej na jony w powstałym roztworze. W zaczynie cementowym, ze względu na dużą reaktywność faz cementowych wobec 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 strukturę świeżego zaczynu cementowego jest skład mineralny cementu, który w konsekwencji ma znaczenie dla przebiegu reakcji hydratacji. W wyniku hydratacji zaczynu cementowego do roztworu przechodzi znaczna część gipsu, a faza ciekła nasycza 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 oddziałuje w sposób znaczący na właściwości reologiczne zaczynu.

Także początkowa reakcja alitu z wodą w okresie indukcyjnym nie wpływa na strukturę zaczynu, gdyż jest on mieszany tak, aby powodowało to odrywanie hydratów od powierzchni ziaren. 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 flokułant, 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 gips można zastąpić mieszaniną lignosulfonianów i węglanu sodowego.

W związku z powyższym zaczyny uszczelniające mogą charakteryzować się różnymi właściwościami reologicznymi. Krzywe płynięcia mogą mieć różny charakter, jak również wykazywać histerezę. Spowodowane to może być między innymi tym, że przy krótkich czasach pomiaru dominujące jest niszczenie struktury zaczynu, natomiast przy dłuższych czasach może występować jej odbudowa. A zatem w świeżych zaczynach cementowych występuje nakładanie się procesów niszczenia struktury pod wpływem ścinania w lepkościomierzu i jej odbudowy przez produkty hydratacji ziaren cementu [4, 5, 10, 11].

Badania laboratoryjne

Metodyka badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne parametrów reologicznych zaczynów cementowych przeprowadzono na podstawie następujących norm:

1. PN-EN 197-1:2002 *Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
2. PN-EN ISO 10426-1:2006 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja.*
3. PN-EN ISO 10426-2:2006 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych. Część 2: Badania cementów wiertniczych.*

Wykonane badania laboratoryjne miały na celu określenie wpływu współczynnika wodno-cementowego (w/c) na zmiany właściwości reologicznych świeżych zaczynów cementowych sporządzanych na osnowie cementu wiertniczego klasy G (według API). W przeprowadzanych badaniach współczynnik w/c wynosił: 0,4; 0,5; 0,6 i 0,7.

Przygotowanie zaczynów uszczelniających do badań laboratoryjnych

Cement odważano z wykorzystaniem wagi elektronicznej (o niepewności wskazań $\pm 0,1\%$ ważonego ciężaru). Zaczyn sporządzano za pomocą mieszalnika o pojemności 1 litra (1 kwarty) z napędem dolnym, wyposażonego w mieszadła łopatkowe.

Temperatura wody zarobowej (woda wodociągowa) do przygotowania zaczynu, a także suchego cementu, podobnie jak temperatura mieszalnika oraz mieszadła, miały temperaturę $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($73^{\circ}\text{F} \pm 2^{\circ}\text{F}$).

Cement przeznaczony do sporządzenia zaczynów (zgodnie z wymaganiami ISO 25911-1 i ISO 3310-1) był przesiewany przez trzy sита z drutu o następujących wymiarach boku oczka kwadratowego: 1,0 mm; 0,20 mm; 0,08 mm (18, 70, 170 MESH). Do przygotowania zaczynów stosowano tylko przesiany cement – posiadał on takie rozdrobnienie, że pozostałość na sicie o boku oczka kwadratowego 0,20 mm nie przekraczała 2%, zaś na sicie o boku oczka kwadratowego 0,08 mm nie była większa niż 20%.

Odmierzone objętości cieczy zarobowej wynikające z założonych współczynników w/c wlewano do pojemnika mieszalnika. Następnie w ciągu 15 sekund dodawano do wody zarobowej uprzednio odważoną masę cementu z równoczesnym mieszaniem tworzącego się zaczynu przy zachowaniu prędkości obrotowej mieszadła na poziomie 4000 obr./min ± 200 obr./min. Następnie kontynuowano mieszanie zaczynu z prędkością 12 000 obr./min ± 500 obr./min przez 35 s ± 1 s. Tak przygotowany zaczyn poddawano badaniom w jak najkrótszym czasie od jego sporządzenia.

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających dotyczyły określenia [12, 13, 15]:

- właściwości reologicznych (lepkość plastyczna, lepkość pozorna, granica płynięcia) – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan-35 API Viscometer – Tulsa, Oklahoma USA EG.G Chandler Engineering, o dwunastu prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr./min, co odpowiada szybkościom ścinania: 1022,04; 511,02; 340,7; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 5,11; 3,41; 1,70 s^{-1}),

- modelu reologicznego – 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, wyznaczano parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego.

Analizie poddano następujące modele reologiczne [13, 14, 16]:

- model Newtona $\tau = \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)$;
- model Bingham'a $\tau = \tau_y + \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)$;
- model Ostwalda–de Waele'a $\tau = k \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)^n$;
- model Cassona $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr}\right)}$;
- model Herschela–Bulkleya $\tau = \tau_y + k \cdot \left(-\frac{dv}{dr}\right)^n$;

gdzie:

n – wykładnik potęgowy [–],

k – współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$],

τ_y – granica płynięcia [Pa],

η – dynamiczny współczynnik lepkości dla modelu Newtona; lepkość plastyczna dla modelu Bingham'a, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [$\text{Pa} \cdot \text{s}$],

$\frac{dv}{dr}$ – gradient prędkości ścinania – $\dot{\gamma}$ – [s^{-1}].

Tablica 1. Skład mineralogiczny cementu wiertniczego klasy G stosowanego do badań laboratoryjnych

Składnik	Zawartość dla cementu wiertniczego G (API) [%]
C ₃ A	1,20
C ₄ AF	15,50
C ₃ S	51,00
C ₂ S	19,30
C ₄ AF + 2C ₃ A	19,60

Tablica 2. Receptury zaczynów uszczelniających na bazie cementu wiertniczego klasy G użytych podczas badań laboratoryjnych

Lp.	Współczynnik w/c [–]
1.	0,4
2.	0,5
3.	0,6
4.	0,7

Tablica 3. Wyniki pomiarów parametrów reologicznych zaczynów dla różnych modeli reologicznych

Rodzaj modelu reologicznego	Współczynnik w/c [–]	0,4	0,5	0,6	0,7
	Parametry reologiczne				
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	0,1114	0,0301	0,0201	0,0175
	Współczynnik korelacji [–]	0,8924	0,9575	0,9269	0,7101
Model Bingham'a	Lepkość plastyczna [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	0,0915	0,0262	0,01168	0,0127
	Granica płynięcia [Pa]	12,8396	2,5425	2,1542	3,0927
	Współczynnik korelacji [–]	0,9743	0,9967	0,9968	0,9904
Model Ostwalda–de Waele'a	Współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]	3,1722	1,1364	1,0618	1,6541
	Wykładnik potęgowy [–]	0,4870	0,4030	0,3492	0,2739
	Współczynnik korelacji [–]	0,9959	0,8993	0,8913	0,9140
Model Cassona	Lepkość Cassona [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	0,0629	0,0155	0,0092	0,0056
	Granica płynięcia [Pa]	5,8041	1,4760	1,3299	2,1871
	Współczynnik korelacji [–]	0,9891	0,9903	0,9926	0,9908
Model Herschela–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	3,3292	2,6390	2,0149	2,8008
	Współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$]	1,7348	0,0214	0,0253	0,0351
	Wykładnik potęgowy [–]	0,5765	1,0295	0,9401	0,8519
	Współczynnik korelacji [–]	0,9979	0,9968	0,9972	0,9925
Lepkość pozorna przy 1022,04 s^{-1} [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]		0,0300	0,0970	0,0190	0,0201

W celu ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów – skorzystano z programu komputerowego RheoSolution. Program ten jest własnością Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH [10, 11] i został wykonany przez autorów artykułu.

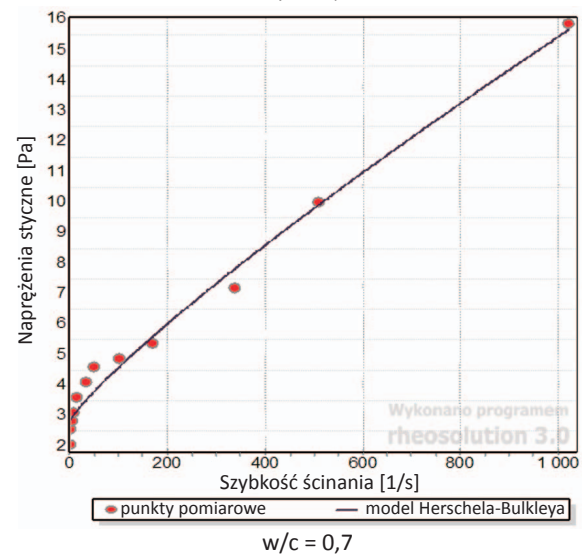
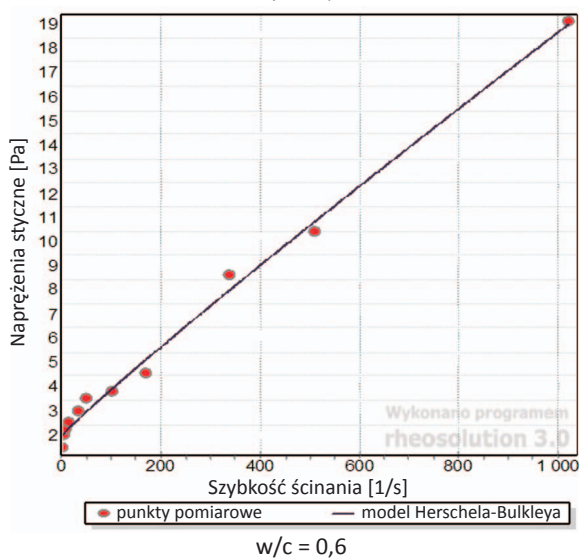
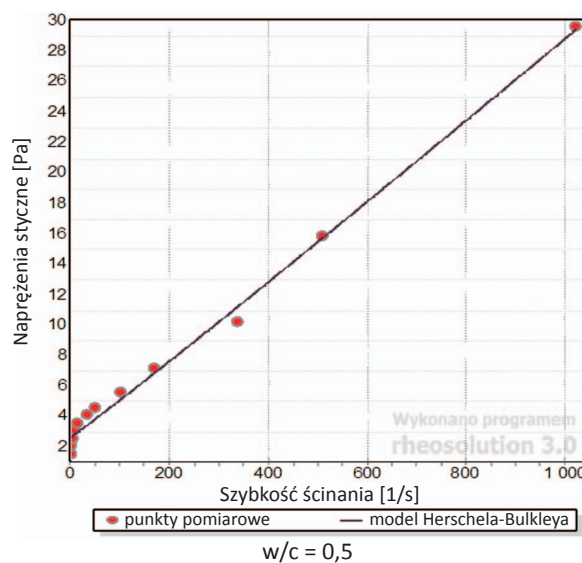
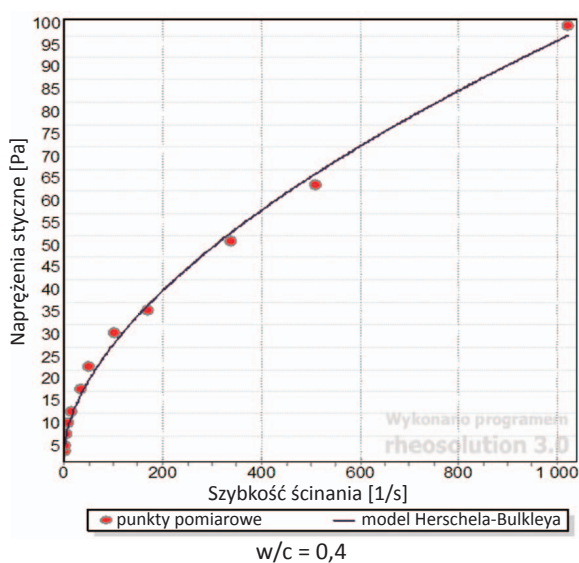
Do sporządzenia zaczynów uszczelniających użyto cementu wiertniczego klasy G, gatunek HSR (według API) – cement importowany z Niemiec, produkcji Dyckerhoff.

W tabelicy 1 przedstawiono przykładowe składy mineralo-

giczne cementu wiertniczego klasy G, natomiast w tabelicy 2 zestawiono receptury zaczynów cementowych wykorzystane do badań laboratoryjnych.

Wyniki badań laboratoryjnych

Wartości parametrów reologicznych modeli matematycznych zaczynów cementowych o różnych wartościach współczynnika wodno-cementowego przedstawiono w tabelicy 3. Zaznaczono w niej modele o najwyższym współczynniku korelacji dla poszczególnych zaczynów.



Rys. 1–4. Modele reologiczne o najwyższym współczynniku korelacji (Herschela–Bulkleya) badanych zaczynów uszczelniających

Podsumowanie

Dobór właściwego modelu reologicznego zaczynu cementowego umożliwia prawidłowy wybór techniki i technologii cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że badane zaczyny cemento-

we ze względu na ich parametry i właściwości reologiczne najlepiej opisane są modelem reologicznym Herschela–Bulkleya (100% badanych zaczynów). Model ten nawiązuje do właściwości plastycznych – oraz rzeczywistych cieczy wiertniczych – więc można uznać go za najdokładniejszy

pod względem zachowania się cieczy w funkcji szybkości ścinania. Stosując przy opisie reologicznym rzeczywistego zaczynu uszczelniającego model Herschela–Bulkleya, można:

- dokładnie określić opory przepływu,
- dobrać wysokość możliwego wytłoczenia zaczynu w przestrzeni pierścieniowej,
- ustalić optymalną wysokość zamocowania mufy cementacyjnej (w przypadku cementowania dwustopniowego),
- dobrać moc oraz liczbę agregatów cementacyjnych.

Uogólnienie wyników uzyskanych w badaniach labora-

toryjnych pozwala na sformułowanie następujących szczegółowych wniosków:

- 1) modeli prostoliniowych (Newtona i Binghama) badanych zaczynów cementowych nie powinno się stosować do dokładnych obliczeń oporów przepływu, jakie mogą wystąpić w procesie uszczelniania kolumn rur okładzinowych,
- 2) badany cement klasy G/HSR (według API) importowany z Niemiec charakteryzuje się wysoką płynnością w porównaniu z innymi cementami powszechnego użytku (w artykule nie zamieszczono wyników badań).

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 1, s. 18–23

Artykuł nadesłano do Redakcji 26.09.2014 r. Zatwierdzono do druku 31.10.2014 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Technologie wiertnicze w udostępnianiu z konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów oraz pozostałych surowców energetycznych* – praca zrealizowana w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 11.11.190.555, zad. 2.

Literatura

- [1] Bujok P., Porzer M., Labus K., Klempa M., Pavlus J.: *Experimental modeling of abandoned shallow oil wells convergence*. Engineering Geology 2013, vol. 157, s. 1–7. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.02.004.
- [2] Gonet A., Stryczek S.: *Reologia wybranych zaczynów uszczelniających wykonanych z cementów Gorazdze Cement S.A.* Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynieryjnych oraz hydrotechnice”, Piła 2001.
- [3] Izak P.: *Reologia zawiesin ceramicznych*. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2012.
- [4] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1991.
- [5] Neville A. M.: *Właściwości betonu*. V edycja. Polski Cement. Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012.
- [6] Pinka J., Wittenberger G., Engel J.: *Dobywanie łóżysk wrtmi*. Koszyce, Wyższokoskowska ucebnica, Fakulta BERG TU w Kosicach, 2006.
- [7] Sliwa T., Golas A., Woloszyn J., Gonet A.: *Numerical model of borehole heat exchanger in ANSYS CFX software*. Archives of Mining Sciences 2012, vol. 57, no. 2, pp. 375–390.
- [8] Stryczek S. (red.), Malolepszy J., Gonet A., Wisniowski R., Kotwica L., Ziaja J.: *Popioły z fluidalnego spalania węgla brunatnego jako dodatek do zaczynów uszczelniających*. Monografia. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2013.
- [9] Stryczek S., Wisniowski R., Gonet A., Ferens W.: *Parametry reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających w zależności od czasu ich sporządzenia*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2009, t. 26, z. 1–2, s. 369–382.
- [10] Stryczek S., Wisniowski R., Gonet A., Zlotkowski A.: *The influence of time of rheological parameters of fresh cement slurries*. AGH Drilling, Oil, Gas 2014, vol. 31, no. 1, pp. 123–133.
- [11] Stryczek S., Wisniowski R., Gonet A., Zlotkowski A., Ziaja J.: *Influence of polycarboxylate superplasticizers on rheological properties of cement slurries used in drilling technologies*. Archives of Mining Sciences 2013, vol. 58, no. 3, pp. 719–728.
- [12] Wisniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2001, t. 18, z. 1, s. 247–261.
- [13] Wisniowski R., Skrzypaszek K.: *Analiza modeli reologicznych stosowanych w technologiach inżynierskich*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2006, t. 23, z. 1, s. 523–532.
- [14] Wisniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopalne 2001, nr 2–3, s. 72–77.
- [15] Wisniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Kierunki rozwoju badań nad reologia płynów wiertniczych*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2007, t. 24, z. 1, s. 595–607.
- [16] Wisniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Wyznaczanie oporów laminarnego przepływu zaczynów cementowych, opisywanych modelem Herschela–Bulkleya*. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 2006, t. 23, z. 1, s. 533–542.



Dr inż. Krzysztof SKRZYPASZEK
Adiunkt
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
E-mail: krzysztof@skrzypaszek.pl



Prof. dr hab. inż. Stanisław STRYCZEK
Profesor zwyczajny
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica,
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
E-mail: stryczek@agh.edu.pl



Prof. dr hab. inż. Rafał WIŚNIEWSKI
Profesor nadzwyczajny
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
E-mail: wisniows@agh.edu.pl