

Analiza wpływu temperatury suchego cementu na zmiany parametrów technologicznych płynnych zaczynów cementowych

Analysis of the influence of dry cement temperature on the changes in technological parameters of liquid cement slurries

Łukasz Kut

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Skuteczne uszczelnienie kolumny rur okładzinowych jest z jednym z ważniejszych zabiegów podczas wykonywania i udostępniania otworu wiertniczego. Zabiegi uszczelniające zarówno w płytkich, jak i w bardzo głębokich otworach wiertniczych wymagają zastosowania specjalnie opracowanych receptur zaczynów cementowych odpornych na specyficzne warunki panujące na ich dnie. Bardzo istotne jest, aby użyty zaczyn cementowy posiadał odpowiednie parametry technologiczne oraz czasy gęstnienia i wiązania zapewniające bezpieczne jego zatłoczenie na dno otworu wiertniczego, co znacząco wpływa na powodzenie całego zabiegu zacementowania otworu wiertniczego. Nieudany zabieg uszczelniania kolumny rur okładzinowych może przynieść szereg niekorzystnych konsekwencji – od strat finansowych, braku szczelności otworu wiertniczego, po konieczność powtarzania zabiegu cementowania otworu wiertniczego (np. gdy płynny zaczyn cementowy zbyt szybko zwiąże i stanie się nieprzetłaczalny, zanim zdąży wypełnić całą przestrzeń pierścieniową przeznaczoną do cementowania). Jednym z czynników wpływających na właściwości płynnych zaczynów cementowych może być temperatura suchego cementu stosowanego w warunkach polowych do zarabiania zaczynu cementowego. Zaistniałe sytuacje wymagają zatem podjęcia działań, które będą skutkować wykonaniem szeregu badań laboratoryjnych w celu sprawdzenia oraz ewentualnego przeprowadzenia analizy negatywnego wpływu temperatury suchego cementu na parametry technologiczne płynnych zaczynów cementowych. Serwisy cementacyjne w naszym kraju do uszczelniania kolumny rur okładzinowych stosują konwencjonalne zaczyny cementowe na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 lub wiertniczego G wraz z innymi składnikami regulującymi parametry zaczynów i kamieni cementowych. Zabiegi uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych realizowane są w różnych porach roku i w różnych warunkach atmosferycznych, co niejednokrotnie przy skrajnych temperaturach powietrza może mieć wpływ na zmianę parametrów technologicznych płynnych zaczynów cementowych. Stosowany podczas zabiegów cementacyjnych cement przetrzymywany jest w cysternach niejednokrotnie nawet przez kilkanaście godzin, dlatego szczególnie w okresach letnim i zimowym poddawany jest działaniu bardzo niskich lub wysokich temperatur. Temperatura cementu może mieć w późniejszym czasie znaczący wpływ na parametry płynnych zaczynów cementowych, zarówno reologiczne, jak i czasy ich gęstnienia czy wiązania. Celem badań była analiza wpływu temperatury suchego cementu na zmiany parametrów reologicznych płynnych zaczynów cementowych oraz czasów początku i końca ich gęstnienia. Do prac wytypowano pięć receptur zaczynów cementowych, które sporządzane były przy zastosowaniu dwóch rodzajów powszechnie stosowanych cementów – cementu portlandzkiego CEM I 42,5 oraz cementu wiertniczego G, uprzednio podgrzanych lub schłodzonych do różnych temperatur (od 10°C do 60°C). Pomocniczo wykonano również badania laboratoryjne na zaczynach cementowych bazowych sporządzonych na cementach o temperaturze pokojowej, a następnie przeprowadzona została analiza wpływu temperatury suchego cementu na zmiany parametrów technologicznych płynnych zaczynów cementowych. Przeprowadzone badania przedstawiają wpływ temperatury suchego cementu na zmiany parametrów płynnych zaczynów cementowych w warunkach polowych. Zaczyny cementowe po sporządzeniu poddawano badaniom: gęstości, rozlewności, właściwości reologicznych, odstoju wody, filtracji oraz czasów początku i końca gęstnienia.

Słowa kluczowe: cement, zaczyn cementowy, płynny zaczyn cementowy, parametry reologiczne, parametry technologiczne, warunki polowe, zabieg uszczelniający, czasy gęstnienia.

ABSTRACT: Effective sealing of casing string is one of the most important operations during the drilling and development of a borehole. Sealing operations in both shallow and very deep boreholes require the use of specially developed cement slurry recipes resistant to the specific conditions at the bottom of the well. It is essential that the cement slurry used has appropriate technological parameters, as well as thickening and setting times that ensure its safe injection to the bottom of the borehole. These parameters significantly affect the success of the entire borehole cementing operation. Unsuccessful cementing of a casing string may lead to a number of adverse

consequences, including financial losses, lack of borehole tightness, or the need to repeat the cementing operation (e.g. when the liquid cement slurry sets too quickly and becomes unpumpable before it fills the entire annular space to be cemented). One of the factors influencing the properties of liquid cement slurries may be the temperature of the dry cement used in field conditions to prepare the slurry. Such circumstances necessitate laboratory testing to examine and potentially analyze the negative impact of dry cement temperature on the technological parameters of liquid cement slurries. Cementation services in our country use conventional cement slurries based on Portland cement CEM I 42.5 or class G drilling cement, along with other components used to regulate the parameters of the cement slurries and stones for sealing the casing string. Casing strings sealing operations are carried out in different seasons and weather conditions, which can often affect the technological parameters of liquid cement slurries at extreme air temperatures. Cement used during cementation operations is often stored in tanks for several hours, and is therefore exposed to very low or high temperatures, especially in summer and winter. The temperature of the cement may subsequently have a significant impact on the parameters of the liquid cement slurry, including its rheological properties and thickening or setting times. The aim of the study was to analyze the effect of dry cement temperature on changes in the rheological parameters of liquid cement slurries and the times of the beginning and end of thickening. Five cement slurry recipes were selected for this purpose, prepared using two commonly used types of cements: Portland cement CEM I 42.5 and class G drilling cement, previously heated or cooled to different temperatures (from 10 to 60°C). To support the research, laboratory tests were also performed on “base” cement slurries prepared with cement at room temperature, followed by the influence of dry cement temperature on changes in the technological parameters of the liquid cement slurries. The conducted research presents the influence of dry cement temperature on changes in the parameters of liquid cement slurries under field conditions. After preparation, the cement slurries were tested for: density, fluidity, rheological properties, free water, filtration, and times of the beginning and end of thickening.

Key words: cement, cement slurry, liquid cement slurry, rheological parameters, technological parameters, field conditions, sealing treatment, thickening times.

Wprowadzenie

Jednym z głównych kryteriów podczas projektowania zaczynów cementowych jest odpowiednie dobranie i opracowanie ich parametrów reologicznych, które odgrywają istotną rolę również w trakcie procesu zatłaczania zaczynu do otworu wiertniczego. Zaczyny uszczelniające w fazie płynnej są układami dyspersyjnymi, zawierającymi cząstki stałe o rozwiniętej powierzchni właściwej, a pod względem reologicznym należą do cieczy nienewtonowskich, których właściwości (parametry) reologiczne zmieniają się w czasie (nie są reostabilne). W trakcie trwania procesu hydratacji zaczynu cementowego – woda, cement, wypełniacze, dodatki i domieszki tworzą skomplikowany układ niejednorodny, którego właściwości reologiczne ulegają zmianie wraz z upływem czasu.

Znajomość właściwości (parametrów) reologicznych zaczynów cementowych jest bardzo ważna, ponieważ wyjaśnia ich zachowanie się w czasie przepływu podczas tłoczenia do przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego. Zaczyn cementowy może posiadać nawet do 70% fazy stałej w całej zawieszynie. Parametry reologiczne takiej zawieszyny uzależnione są od właściwości cieczy zarobowej oraz objętości i rodzaju fazy stałej. Właściwości i parametry reologiczne zaczynów cementowych można regulować za pomocą różnego rodzaju dodatków, m.in. upłynniających (superplastyfikatory), uplastyczniających (plastyfikatory), regulujących czasy wiązania i innych (Salehi-Moorkani i Mirzaei-Paيمان, 2009; Bentz i in., 2012; Gamage i Deville, 2013; Salim i Amani, 2013).

Płynne zaczyny cementowe to układy o niezwykle złożonych właściwościach opisywanych przez szereg modeli

reologicznych. Na dobór określonego modelu wpływają między innymi reakcje hydratacji zachodzące w spoiwie wiążącym w miarę upływającego czasu. Wszelakie właściwości fizykochemiczne powstającej struktury zaczynu uzależnione są od sił działających między ziarnami cementu a cząsteczkami wody. Po sporządzeniu świeżego zaczynu ziarna cementu ulegają koagulacji.

Właściwości reologiczne w przypadku płynnych zaczynów cementowych określone są przy użyciu lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach (rysunek 1).



Rysunek 1. Wiskozymetr obrotowy Ofite 900

Figure 1. Ofite 900 rotational viscometer

Badania prowadzone są przy szerokich zakresach szybkości ścinania i naprężeń stycznych (ścinających). W przemyśle najczęściej przedstawianymi parametrami reologicznymi w przypadku zaczynów cementowych są *lepkość plastyczna* oraz *granica płynięcia*. Parametry te opisuje model reologiczny Bingham. Reologię zaczynów określa się w warunkach odpowiadających temperaturze panującej na dnie otworu wiertniczego (Kremieniewski i Rzepka, 2009; Vance i in., 2013, 2015).

Podczas opracowywania receptur zaczynów cementowych do danych warunków otworopodobnych brane są pod uwagę nie tylko warunki geologiczne, ciśnienia i temperatury panujące w otworze wiertniczym, ale istotny jest również odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy dodatków wpływających na ich parametry reologiczne, gęstość, filtrację, rozlewność, odstój wody oraz czasy gęstnienia i wiązania. Wbrew pozorom istotny wpływ na parametry technologiczne płynnych zaczynów cementowych podczas prac polowych (zabiegów cementacyjnych) mogą mieć warunki atmosferyczne, a konkretniej skrajne temperatury powietrza, szczególnie w porach zimowej i letniej. Przykładem może być sytuacja, gdy podczas prowadzenia prac wiertniczych oraz przygotowawczych do zabiegów uszczelniania kolumn rur okładzinowych cement przetrzymywany jest najczęściej w silosach (cysternach), które przez krótszy lub dłuższy czas poddawane są działaniu szerokiej skali temperatur (zimą – mrozy, latem – upały). Często ma to w późniejszym czasie wpływ na parametry płynnych zaczynów cementowych, a otrzymywane wyniki nierzadko mogą różnić się od tych uzyskiwanych w laboratorium, dlatego podczas opracowywania receptur należy brać pod uwagę również porę roku, panujące warunki atmosferyczne i temperaturę suchego cementu, który posłuży do zarabiania płynnego zaczynu cementowego (Kremieniewski i Rzepka, 2009; Dębińska, 2012; Salam i in., 2015).

Badania laboratoryjne

W INiG – PIB w Zakładzie Technologii Wiercenia wykonano badania laboratoryjne mające na celu określenie wpływu temperatury suchego cementu na właściwości reologiczne oraz czasy gęstnienia płynnych zaczynów cementowych, które zostały z niego sporządzone. Były to pierwsze badania tego typu w naszym kraju, a do ich realizacji posłużyły receptury, które mogą znaleźć zastosowanie podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach o temperaturach dennych od 25°C do 70°C. Wybranie do badań powszechnie stosowanych składów i składników miało na celu określenie rzeczywistego wpływu, jaki mogą mieć warunki atmosferyczne, a dokładniej skrajne temperatury panujące w porach letniej i zimowej, na

parametry technologiczne zaczynów cementowych. Podczas realizacji zadania przeprowadzono badania na pięciu recepturach dla pięciu różnych temperatur suchego cementu. W artykule zamieszczono wyniki dotyczące wybranych składów zaczynów cementowych, w przypadku których odnotowano największe rozbieżności w wynikach wynikające z różnych temperatur cementu o tym samym składzie zaczynu.

Zaczyny cementowe zarabiano wodą wodociągową, do której dodawano kolejno lateks, środek regulujący czas wiązania, odpieniacz, upłynniacz i obniżający filtrację. Pozostałe składniki sypkie mieszano ze sobą i wprowadzano następnie do wody zarobowej. Wszystkie zaczyny cementowe sporządzano na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 lub wiertniczego klasy G (PN-EN ISO 10426-1; PN-EN ISO 10426-2). Po sporządzeniu zaczynów cementowych mierzono ich gęstość, rozlewność, właściwości reologiczne, odstój wody, filtrację oraz czas gęstnienia.

Badaniom laboratoryjnym poddano zaczyny cementowo-lateksowe zawierające różne dodatki wpływające na ich parametry reologiczne, filtrację oraz czasy gęstnienia i wiązania. Pomiary przeprowadzono dla pięciu różnych temperatur suchego cementu: pokojowej (bazowa), 10°C, 40°C, 50°C, 60°C oraz dla konkretnych warunków otworopodobnych: temperatury od 25°C do 70°C oraz ciśnienia od 5 MPa do 40 MPa.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono szczegółowe wyniki badań parametrów technologicznych z wybranych płynnych zaczynów cementowych (Stryczek i Gonet, 2001; Rzepka i Kątna, 2006; Kremieniewski i Rzepka, 2009; Dębińska, 2012; Zhou i in., 2013).

Niepewność uzyskanych wyników pomiarów zaprezentowanych poniżej oznaczono na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych na poziomie – dla pomiarów reologicznych – 0,2%.

Skład zaczynu nr 1:

Woda wodociągowa	w/c* = 0,45
Odpieniacz	0,5%
Upłynniacz	0,4%
Antyfiltrat	0,1%
CaCl ₂	2,0%
Lateks	10,0%
Stabilizator lateksu	1,0%
KCl	3,0%
Nanocement	10,0%
Cement CEM I 42,5	100,0%
Środek spęczniający	0,3%

* w/c – stosunek wodno-cementowy

Pierwszy wybrany zaczyn cementowy opracowany został do uszczelniania kolumny rur okładzinowych w warunkach

Tabela 1. Parametry technologiczne zaczynu cementowego nr 1 dla pięciu różnych temperatur cementu**Table 1.** Technological parameters of cement slurry No. 1 for five different cement temperatures

Parametry technologiczne		Temperatura cementu [°C]									
		Pokojowa (bazowa)		10		40		50		60	
Rozlewność [mm]		175		180		195		200		200	
Gęstość [g/cm ³]		1,82		1,82		1,82		1,82		1,82	
Odstój wody [%]		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
Odczyty z aparatu Fann [obr/min]	600	215		348		187		226		208	
	300	131		274		115		139		120	
	200	102		207		88		109		90	
	100	69		126		58		68		59	
	60	54		90		45		52		44	
	30	41		60		34		37		33	
	6	27		31		22		23		20	
	3	25		29		20		21		18	
Lepkość plastyczna [mPa·s]		93,0		222,0		85,5		106,5		91,5	
Granica płynięcia [Pa]		18,2		25,0		14,2		15,6		13,7	
Temperatura początkowa zaczynu cementowego [°C]		28,0		15,4		30,0		32,0		36,3	
Czas gęstnienia [h:min], 25°C, 5 MPa		30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc
		2:27	4:02	2:11	2:50	2:31	4:51	3:20	5:23	3:00	5:02
Filtracja [cm ³ /30 min]		106,0		64,0		112,0		114,0		118,0	

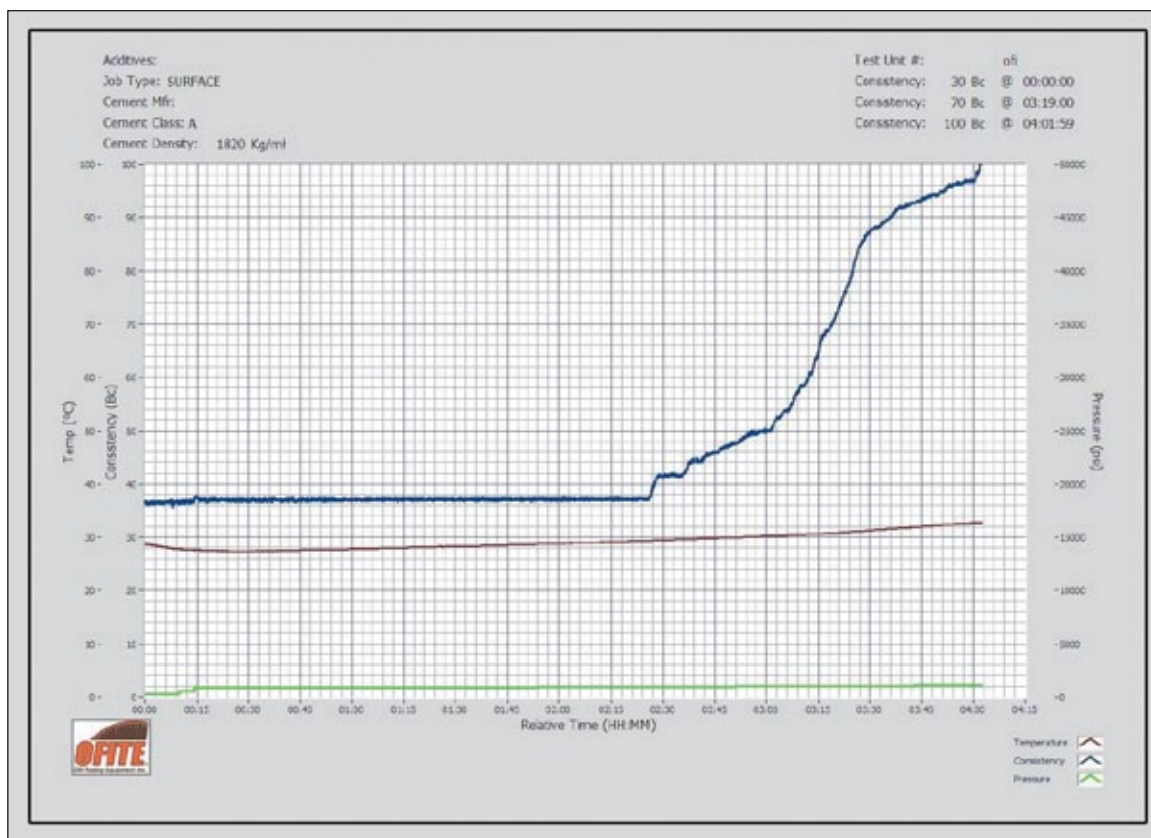
otworopodobnych dla 25°C i 5 MPa. Podczas badań laboratoryjnych parametrów reologicznych i czasów gęstnienia zaczynu cementowego wykorzystano do jego sporządzenia cement portlandzki CEM I 42,5 o pięciu różnych temperaturach.

Pierwsze badania laboratoryjne przeprowadzono po zarobieniu zaczynu cementowego cementem portlandzkim CEM I 42,5 o temperaturze pokojowej. Zaczyn cementowy o gęstości 1,82 g/cm³ nie wykazał odstępu wody, odznaczał się rozlewnością 175 mm oraz wysoką filtracją, wynoszącą 106 cm³/30 min. Badania czasów gęstnienia wykazały, że początek gęstnienia (30 Bc) uzyskano po około 2 h 27 min, a koniec gęstnienia (100 Bc) po 4 h 2 min.

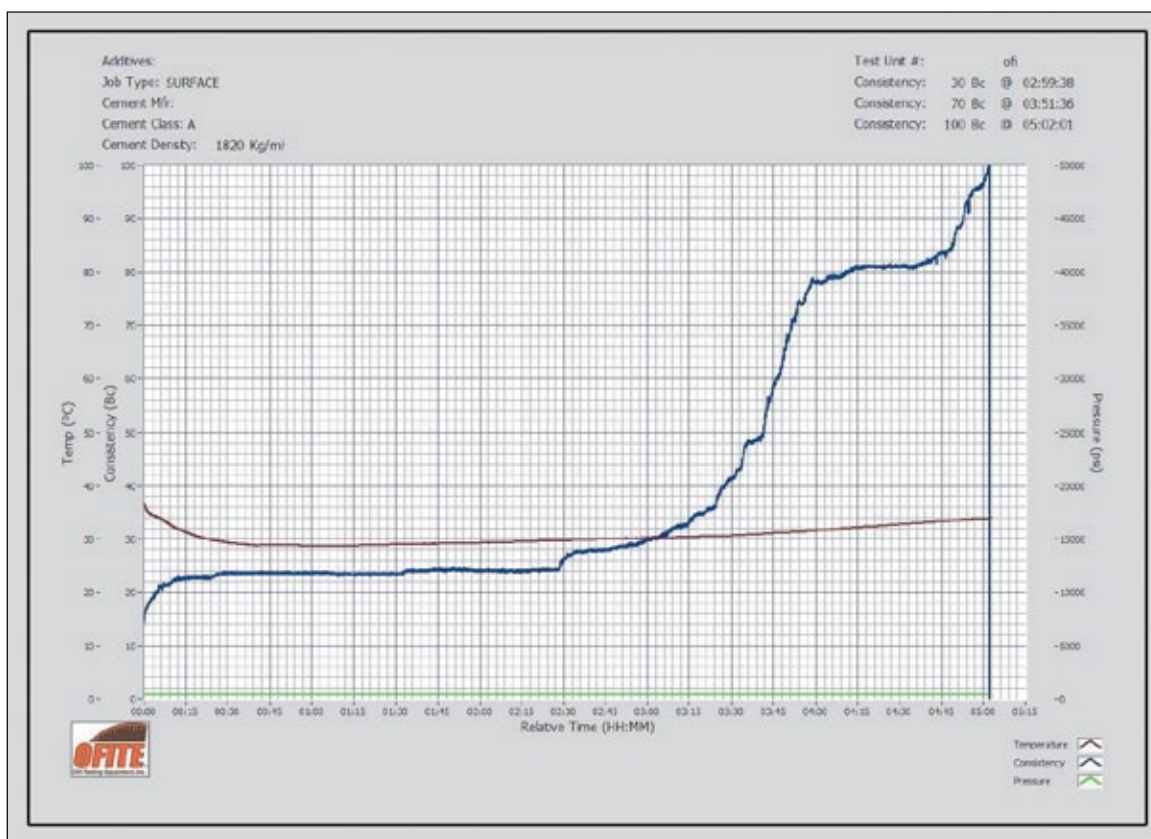
Kolejny etap badań polegał na dokonywaniu analogicznych pomiarów, jednak po zastosowaniu suchego cementu podgrzanego do różnych temperatur, tj. 40°C, 50°C i 60°C. Przeprowadzone badania wykazały, że temperatura cementu nie miała istotnego wpływu na odstęp wody (nadal był zerowy) oraz gęstość zaczynu cementowego. Niewielki wpływ wyższej temperatury cementu zaobserwowano podczas pomiarów filtracji, która wzrosła, jednak nieznacznie – od 106 cm³/30 min do maksymalnie 118 cm³/30 min przy temperaturze cementu wynoszącej 60°C. Wzrost temperatury cementu miał wpływ na płynność uzyskanych zaczynów cementowych, co zaobserwowano w wartościach rozlewności (były wyższe od tej otrzymanej dla temperatury pokojowej, jednak zbliżone do

siebie niezależnie od temperatury podgrzania cementu), jak i podczas badań wykonanych za pomocą aparatu Fann. Wzrost temperatury zastosowanego cementu przyczynił się do uzyskania wyższych temperatur początkowych podczas badań czasów gęstnienia, jak i wpłynął na same czasy, gdyż zaobserwowano wydłużenie czasu końca gęstnienia o około 1 h do 1 h 20 min w porównaniu z czasem otrzymanym w przypadku zaczynu badanego po użyciu cementu o temperaturze pokojowej (bazowej).

Podczas realizacji zadania zastosowano również cement schłodzony do temperatury 10°C. Analiza otrzymanych wyników wykazała, że tak samo jak w przypadku podgrzewanego cementu temperatura cementu nie wpłynęła na odstęp zaczynu cementowego (brak odstępu wody) ani na jego gęstość, która w każdej temperaturze była taka sama i wynosiła 1,82 g/cm³. Największy wpływ zastosowania schłodzonego cementu zaobserwowano podczas pomiarów filtracji, która znacznie się obniżyła w porównaniu z badaniem bazowym (temperatura pokojowa cementu) – ze 106 cm³/30 min do 64 cm³/30 min oraz podczas pomiaru czasu gęstnienia zaczynu cementowego. Konsystencję 30 Bc (początek gęstnienia) uzyskano po czasie 2 h 11 min, zaś 100 Bc (koniec gęstnienia) – po 2 h 50 min. Były to czasy o około godzinę krótsze od bazowych, jednak pozwalające na bezpieczne zatłoczenie zaczynu cementowego do otworu wiertniczego.



Rysunek 2. Czasy gęstnienia zaczynu cementowego nr 1 po dodaniu suchego cementu o temperaturze pokojowej
Figure 2. Thickening times of cement slurry No. 1 after adding dry cement at room temperature



Rysunek 3. Czasy gęstnienia zaczynu cementowego nr 1 po dodaniu suchego cementu o temperaturze 60°C
Figure 3. Thickening times of cement slurry No. 1 after adding dry cement at a temperature of 60°C

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe wykresy pomiarów czasów gęstnienia zaczynu cementowego nr 1 dla dwóch temperatur suchego cementu: pokojowej (bazowej) oraz 60°C. W przypadku temperatury pokojowej cementu za początek gęstnienia (30 Bc) przyjęto nagły wzrost konsystencji zaczynu cementowego (około 2 h 27 min), gdyż od samego początku badania pomiar konsystencji przekraczał 35 Bc. Kolejny zaprezentowany zaczyn cementowy, nr 2, opracowany został do uszczelniania kolumny rur okładzinowych w warunkach otworopodobnych dla 30°C i 15 MPa. Podczas badań laboratoryjnych parametrów reologicznych i czasów gęstnienia zaczynu cementowego wykorzystano do jego sporządzenia cement wiertniczy G o pięciu różnych temperaturach oraz pozostałe składniki jak w pierwszym przykładzie.

W tabeli 2 oraz na rysunkach 4 i 5 przedstawiono wyniki otrzymane podczas badań parametrów reologicznych receptury nr 2.

Skład zaczynu nr 2:

Woda wodociągowa	w/c* = 0,53
Odpieniacz	0,5%
Uplynniciarz	0,3%
Antyfiltrat	0,2%
CaCl ₂	1,0%
Lateks	10,0%

Stabilizator lateksu	1,0%
KCl	3,0%
Nanocement	20,0%
Cement CEM I 42,5	100,0%
Środek spęczniający	0,3%

* w/c – stosunek wodno-cementowy

Recepturę zaczynu cementowego nr 2 wytworzono przy zastosowaniu składników powszechnie wykorzystywanych w przemyśle naftowym oraz przeprowadzono analogiczne badania jego parametrów reologicznych i czasów gęstnienia dla pięciu różnych temperatur suchego cementu jak w przypadku pierwszego składu.

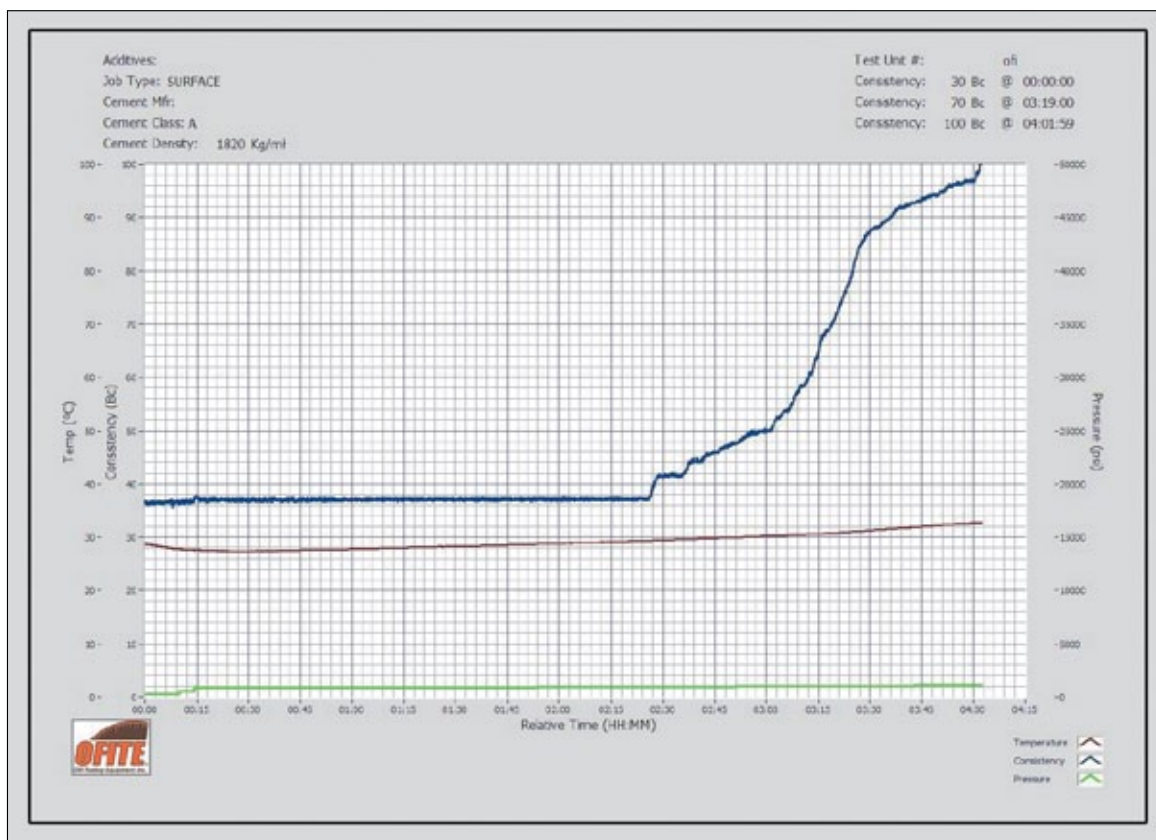
Początkowe badania wykonano po zarobieniu zaczynu cementem o temperaturze pokojowej. Zaczyn miał gęstość 1,80 g/cm³, nie wykazał odstępu wody oraz charakteryzował się rozlewnością wynoszącą 240 mm. Zmierzona filtracja była wysoka – 120 cm³/30 min. Badania czasów gęstnienia wykazały, że początek gęstnienia (30 Bc) płynny zaczyn cementowy osiągnął po czasie 4 h i 8 min, zaś koniec gęstnienia (100 Bc) otrzymano po upływie 6 h i 4 min od rozpoczęcia badania.

Analogiczne badania przeprowadzono, stosując suchy cement podgrzany do temperatur 40°C, 50°C i 60°C oraz schłodzony do temperatury 10°C. Badania te wykazały, że

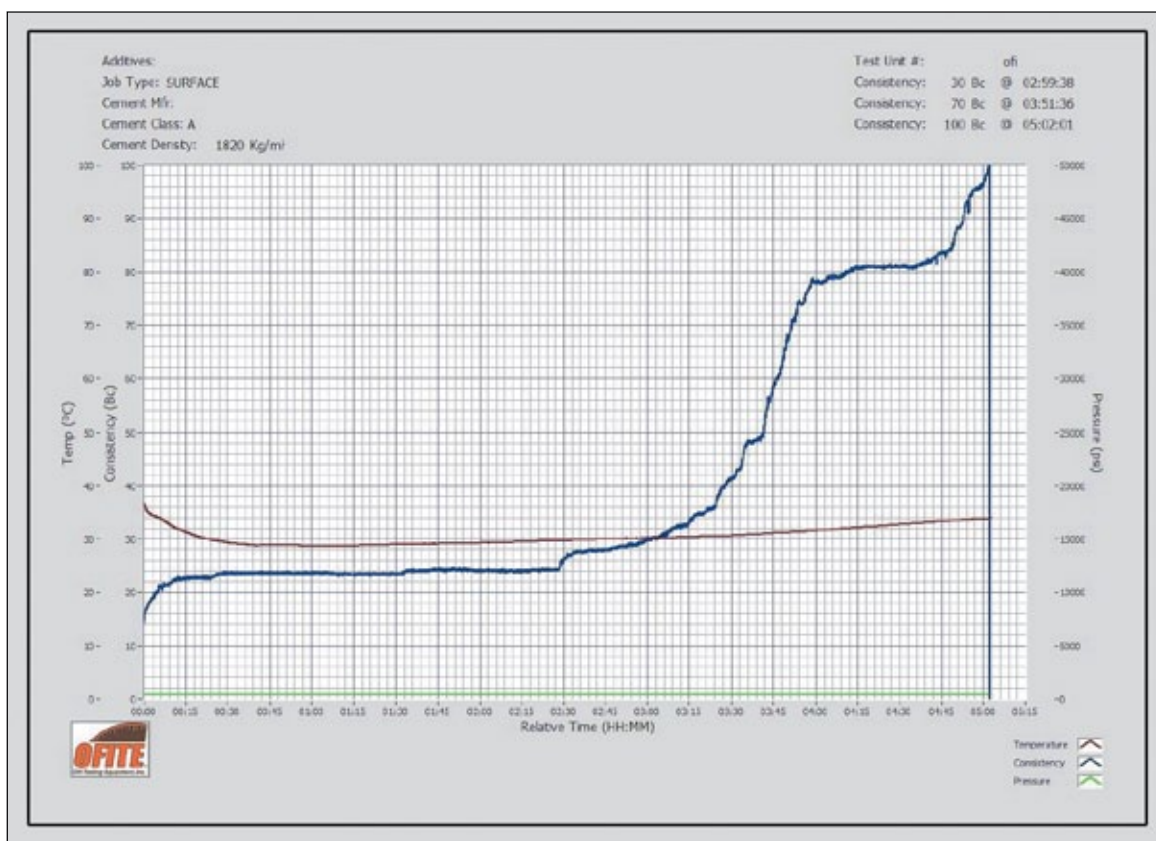
Tabela 2. Parametry technologiczne zaczynu cementowego nr 2 dla pięciu różnych temperatur cementu

Table 2. Technological parameters of cement slurry No. 2 for five different cement temperatures

Parametry technologiczne		Temperatura cementu [°C]									
		Pokojowa (bazowa)		10		40		50		60	
Rozlewność [mm]		240		265		270		250		240	
Gęstość [g/cm ³]		1,80		1,80		1,80		1,80		1,80	
Odstój wody [%]		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	
Odczyty z aparatu Fann [obr/min]	600	144		150		128		136		160	
	300	81		82		72		77		90	
	200	60		58		56		55		65	
	100	36		32		29		32		39	
	60	25		21		20		22		27	
	30	16		12		12		14		17	
	6	7		4		4		5		7	
	3	6		3		3		4		6	
Lepkość plastyczna [mPa·s]		67,5		75,0		64,5		67,5		76,5	
Granica płynięcia [Pa]		6,5		3,4		3,6		4,6		6,5	
Temperatura początkowa zaczynu cementowego [°C]		24,1		13,3		26,8		29,0		32,5	
Czas gęstnienia [h:min], 25°C, 5 MPa		30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc	30 Bc	100 Bc
		4:08	6:04	5:17	7:47	5:49	7:55	5:03	7:36	4:34	7:21
Filtracja [cm ³ /30 min]		120,0		116,0		128,0		132,0		140,0	



Rysunek 4. Czasy gęstnienia zaczynu cementowego nr 2 po dodaniu suchego cementu o temperaturze pokojowej
Figure 4. Thickening times of cement slurry No. 2 after adding dry cement at room temperature



Rysunek 5. Czasy gęstnienia zaczynu cementowego nr 2 po dodaniu suchego cementu o temperaturze 60°C
Figure 5. Thickening times of cement slurry No. 2 after adding dry cement at a temperature of 60°C

temperatura cementu nie miała wpływu na odstęp wody, który nadal był zerowy, ani na gęstość zaczynu cementowego, która podczas badań pozostała niezmienna. Zaobserwowano niewielki wpływ wzrostu temperatury cementu na badaną filtrację, która zwiększyła się ze 120 cm³/30 min (pokojowa temperatura cementu) do maksymalnie 140 cm³/30 min (dla temperatury cementu wynoszącej 60°C). Zastosowanie schłodzonego cementu wpłynęło na niewielki spadek filtracji, do 116 cm³/30 min, w porównaniu do składu bazowego. Wzrost temperatury cementu miał inny wpływ na płynność otrzymanych zaczynów cementowych niż w zaczynie nr 1, gdyż w tym przypadku zaobserwowano spadek rozlewności wraz z rosnącą temperaturą cementu. Najwyższą rozlewność, wynoszącą 270 mm, otrzymano dla temperatury 40°C i podczas kolejnych badań (50°C i 60°C) obniżyła się ona do wartości początkowej (otrzymanej dla bazowej – pokojowej temperatury cementu), wynoszącej 240 mm. Wzrost, jak i spadek temperatury cementu w przypadku receptury nr 2 wpłynął na obniżenie płynności zaczynu cementowego, co zaobserwowano podczas badań wykonanych na aparacie Fann, gdzie dla temperatur 10°C i 60°C otrzymywano wyższe wartości lepkości (dla 300 i 600 obr/min) od tych uzyskanych dla temperatury pokojowej.

Zarówno wzrost, jak i spadek temperatury zastosowanego suchego cementu do zarabiania zaczynów cementowych wpłynął na temperatury początkowe podczas badań czasów gęstnienia, jak i na same czasy, gdyż zaobserwowano wydłużenie czasu końca gęstnienia o około 1,5 h do 2 h w porównaniu z czasem otrzymanym dla zaczynu bazowego. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe wykresy pomiarów czasów gęstnienia zaczynu cementowego nr 2 dla dwóch temperatur suchego cementu: pokojowej (bazowej) oraz 60°C.

Wnioski i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań wytypowanych składów zaczynów cementowych można wyciągnąć następujące wnioski.

1. W artykule zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych receptur zaczynów cementowych mogących znaleźć zastosowanie podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych w warunkach otworopodobnych z temperaturą 25°C i ciśnieniem 5 MPa oraz temperaturą 30°C i ciśnieniem 15 MPa.
2. Zaczyny cementowe zarabiane były wodą wodociągową oraz dodatkami powszechnie stosowanymi przez serwisy cementacyjne poprawiającymi parametry technologiczne zarówno płynnych zaczynów cementowych, jak i otrzymanych z nich stwardniałych zaczynów cementowych.
3. Oba zaczyny były zaczynami cementowo-lateksowymi sporządzonymi na bazie dwóch rodzajów powszechnie

stosowanych cementów – portlandzkiego CEM I 42,5 (skład nr 1) oraz wiertniczego G (skład nr 2).

4. Realizacja pracy polegała na sprawdzeniu wpływu temperatury suchego cementu na parametry technologiczne zaczynów cementowych, dlatego podczas sporządzania zaczynów dodawano do nich cement o temperaturach: 10°C, 40°C, 50°C i 60°C.
5. Początkowe badania polegały na przeprowadzeniu pomiarów po zastosowaniu do zarabiania zaczynów cementu o temperaturze pokojowej. Były to badania referencyjne, których wyniki posłużyły jako punkt odniesienia dla sprawdzenia wpływu temperatury suchego cementu na zmiany parametrów technologicznych płynnych zaczynów.
6. Zaprezentowane w artykule płynne zaczyny cementowe miały gęstości 1,80 g/cm³ i 1,82 g/cm³, nie wykazały odstoju wolnej wody oraz posiadały dobre parametry reologiczne dla każdej z 5 różnych temperatur suchego cementu. Przeprowadzone badania laboratoryjne przy zastosowaniu cementu schłodzonego (10°C), jak i podgrzewanego (40°C, 50°C i 60°C) wykazały, że nie miało to wpływu na zmianę gęstości zaczynów cementowych ani na powstanie odstoju wody wolnej.
7. Rozlewności zaczynu cementowego nr 1 mieściły się w przedziale od 175 mm do 200 mm, zaś w przypadku składu nr 2 były znacznie wyższe i wynosiły od 240 mm do 270 mm, co wynikało z większego stosunku wodno-cementowego (w/c).
8. Parametry technologiczne wybranych zaczynów cementowych można z powodzeniem regulować dodatkami powszechnie stosowanymi w krajowym przemyśle wiertniczym.
9. Zaczyny cementowe charakteryzowały się dobrymi parametrami reologicznymi, jednak posiadały wysoką filtrację, w większości przypadków przekraczającą 100,0 cm³/30 min, z wyjątkiem pomiaru wykonanego dla składu nr 1 i schłodzonego cementu, kiedy to filtracja wyniosła 64,0 cm³/30 min. Podczas zabiegów uszczelniających zalecane jest, aby ta filtracja była jak najniższa i nie przekraczała 50,0 cm³/30 min.
10. Badania czasów gęstnienia wykazały, że we wszystkich przypadkach poza jednym otrzymywano koniec gęstnienia później niż w zaczynach bazowych. Wydłużenie końca gęstnienia zaczynów cementowych znajdowało się w zakresie od około 50 minut (skład nr 1, temperatura suchego cementu 40°C) do około 1 godziny 50 minut (skład nr 2, temperatura suchego cementu 40°C). Wyjątek stanowiło badanie wykonane dla składu nr 1 i schłodzonego cementu (10°C), kiedy to otrzymano krótszy czas końca gęstnienia w porównaniu z zaczynem bazowym o około 1 godzinę i 12 minut. Mimo

to wszystkie otrzymane czasy były odpowiednie, aby zapewnić bezpieczne zatłoczenie zaczynu cementowego na dno otworu wiertniczego.

11. Temperatura stosowanego cementu miała natomiast wpływ na wartości początkowych temperatur zaczynów cementowych podczas badań ich czasów gęstnienia na konsystometrze. Po dodaniu cementu o temperaturze 10°C odnotowano początkowe temperatury na poziomie 13,3°C (zaczyn nr 2) i 15,4°C (zaczyn nr 1), zaś w przypadku maksymalnej temperatury suchego cementu (60°C) dochodziły one do 32,5°C (zaczyn nr 2) i 36,3°C (zaczyn nr 1).

12. Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników zaprezentowane w artykule receptury zaczynów w większości przypadków mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych. Jedynym parametrem, który należałoby poprawić, jest zbyt wysoka filtracja, jednak można to z łatwością skorygować środkiem antyfiltracyjnym.

Przedstawione w artykule badania przeprowadzono po raz pierwszy w naszym kraju i dają one wstępne informacje o tym, jaki wpływ na zmiany parametrów reologicznych oraz czasu gęstnienia ma temperatura suchego cementu zastosowanego do zarabiania zaczynów cementowych.

Zdecydowany wpływ na temperaturę cementu w warunkach polowych mają warunki atmosferyczne, a zwłaszcza pora roku, ponieważ w zimie często panują spore mrozy, a w lecie upały. Podczas prowadzenia prac wiertniczych oraz przygotowawczych do zabiegów uszczelniania kolumn rur okładzinowych cement przetrzymywany jest najczęściej w silosach, które przez krótszy lub dłuższy czas poddawane są działaniu szerokiej skali temperatur. Często ma to w późniejszym czasie wpływ na parametry zaczynów cementowych oraz otrzymywane wyniki, nierzadko różniące się od tych uzyskiwanych w laboratorium, dlatego podczas opracowywania receptur należy brać pod uwagę również panujące warunki atmosferyczne, porę roku i temperaturę suchego cementu, który posłuży do zarabiania płynnego zaczynu cementowego.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza wpływu temperatury cementu na zmiany parametrów technologicznych płynnych zaczynów cementowych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0020/KW/2024, nr archiwalny: DK-4100-0006/2024.

Literatura

Bentz D.P., Ferraris C.F., Galler M.A., Hansen A.S., Guynn J.M., 2012. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes. *Cement and Concrete Research*, 42: 404–409. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.11.006.

Dębińska E., 2012. Ocena działania dodatków opóźniających czas wiązania zaczynów cementowych na podstawie badań laboratoryjnych. *Nafta-Gaz*, 68(4): 225–232.

Gamage P., Deville J., 2013. Self-Degrading Gel for Downhole Applications in High Temperature Reservoirs. *National Technical Conference and Exhibition held at the Cox Convention Center, Oklahoma City*. AADE-13-FTCE-13.

Kremieniewski M., Rzepka M., 2009. Wpływ procesu ogrzewania na reologię modyfikowanych zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 65(10): 775–781.

Rzepka M., Kańska Z., 2006. Zaczyny cementowe z dodatkiem mikrocementu do uszczelniania rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 62(7–8): 364–369.

Salam K.K., Arinkoola A.O., Ajagbe B.M., Sanni O., 2015. Modeling of rheological properties of class G cement slurry. *Petroleum & Coal*, 57(5): 447–465.

Salehi-Moorkani R., Mirzaei-Paibam A., 2009. A novel cement slurry design applicable to horizontal well conditions. *Petroleum & Coal*, 51(4): 270–276.

Salim P., Amani M., 2013. Special considerations in cementing high pressure high temperature wells. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(4): 120–146.

Strzyżek S., Gonet A., 2001. Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. *Symposium Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice, Pila-Płotki*.

Vance K., Kumar A., Sant G., Neithalath N., 2013. The rheological properties of ternary binders containing Portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, 52: 196–207. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.07.007.

Vance K., Sant G., Neithalath N., 2015. The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models. *Cement & Concrete Composites*, 59: 38–48. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.001.

Zhou X., Li Z., Fan M., Chen H.-P., 2013. Rheology of semi-solid fresh cement pastes and mortars in orifice extrusion. *Cement & Concrete Composites*, 37: 304–311. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.004.

Akty prawne i dokumenty normatywne

PN-EN ISO 10426-1 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 1: Specyfikacja.

PN-EN ISO 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych.



Mgr inż. Łukasz KUT

Starszy specjalista badawczo-techniczny

w Zakładzie Technologii Wiercenia

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Lubicz 25 A

31-503 Kraków

E-mail: lukasz.kut@inig.pl