

## Rola plastyfikatora w projektowaniu zaczynu lekkiego o podwyższonej stabilności sedymentacyjnej

### The role of plasticizer in the design of lightweight slurry with increased sedimentation stability

Marcin Kremieniewski

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Stosowanie zaczynu cementowego o obniżonej gęstości jest niezbędne podczas uszczelniania otworów wierconych w strefach występowania skał chłonnych czy w warstwach sypkich. Zmniejszenie gęstości zaczynu możliwe jest do uzyskania poprzez wprowadzenie do jego objętości lekkich dodatków wypełniających. Obecność dodatkowych lekkich frakcji wymusza zastosowanie większej ilości wody. Ze względu na zróżnicowane gęstości ziaren cementu i ziaren wypełniacza lekkiego – struktura płynnego zaczynu może ulegać rozwarstwieniu w momencie, gdy pozostanie on w warunkach statycznych. Aby uzyskać odpowiednią stabilność sedymentacyjną zaczynu cementowego, należy dążyć do możliwie mocnego wypełnienia objętości wody zarobowej frakcjami cementu i pozostałych domieszek i dodatków. Jest to możliwe między innymi poprzez zmniejszenie ilości wody. Jednak zaczyn taki będzie wykazywał znacznie gorszą przetłaczalność, co wiąże się z koniecznością użycia wyższych wydatków tłoczenia, czego efektem może być rozszczelinowanie strefy skał chłonnych i ucieczka cementu powodowana wzrostem ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej. Aby wyeliminować to niekorzystne zjawisko, objawiające się pogorszeniem parametrów reologicznych na skutek zmniejszenia ilości wody w zaczynie, korzystne jest zastosowanie wybranych środków dyspergujących, które umożliwiają obniżenie współczynnika wodno-cementowego przy zachowaniu optymalnych wartości parametrów reologicznych, co zostało omówione w niniejszej publikacji. Działanie takie pozwala wyeliminować frakcjonowanie zaczynu, w wyniku czego uzyskuje się homogeniczną strukturę zarówno płynnego, jak i stwardniałego zaczynu cementowego. W artykule omówione zostały wyniki badań zaczynów, które zostały poddane modyfikacjom w celu poprawy stabilności sedymentacyjnej. Na potrzeby publikacji zestawiono trzy receptury zaczynów: pierwszy zaczyn to receptura kontrolna, a dwa kolejne to modyfikacje, w których uzyskano najbardziej zadowalające wyniki. Podczas prac badawczych skoncentrowano się na obniżeniu współczynnika wodno-cementowego w recepturze zaczynu lekkiego oraz na odpowiednim doborze ilościowym, a także jakościowym środka dyspergującego. Zaprojektowano receptury zaczynów dla warunków otworowych z temperaturą około 30°C i ciśnieniem około 5 MPa. Przedstawione nowe receptury to jeden zaczyn bezlateksowy oraz jeden zaczyn lateksowy. W publikacji omówiono wyniki badań stabilności sedymentacyjnej projektowanych zaczynów oraz wyniki badań parametrów decydujących o efektywności uszczelniania. Na próbkach stwardniałych zaczynów wykonano badania porowatości oraz przepuszczalności, na podstawie czego zweryfikowano korzyści modyfikacji wprowadzonych w składach zaczynów.

**Słowa kluczowe:** zaczyn cementowy, zaczyn lekki, plastyfikator, stabilność sedymentacyjna, parametry reologiczne, współczynnik wodno-cementowy.

**ABSTRACT:** The use of cement slurry with reduced density is indispensable for sealing off the boreholes that have been drilled in absorptive rock zones. The reduction in slurry density is possible due to the incorporation of light additives into its volume. The presence of light fractions enforces the use of more water. Due to the varying density of cement grains and light filler grains, the structure of the liquid slurry can be delaminated when it remains in static conditions. In order to obtain the appropriate sedimentation stability of cement slurry, one should strive to fill the entire volume of the mixing water with cement and other fractions and additions. This is possible, inter alia, by reducing the amount of water. However, such slurry will demonstrate poorer pressability, which is associated with the necessity of using higher pressing gain, the effect of which can be the fracturing of the absorptive zone and the escape of cement due to the increase in pressure in the annular space. In order to eliminate this unfavorable phenomenon manifested by the deterioration of rheological parameters due to the reduction of the amount of water in the slurry, it is advantageous to use selected dispersing agents that allow lowering the water-cement ratio while maintaining the optimal rheological parameters, as discussed in this publication. Such action allows eliminating slurry fractionation as a result of which a homogeneous structure of both liquid and hardened cement slurry is obtained. The article discusses the test results for slurries that have been subjected to modifications to improve sedimentation stability. For the purposes of the publication, 3 slurries formulas were compiled, of which the first slurry is a control recipe and the two other are modifications in which the most

Autor do korespondencji: M. Kremieniewski, e-mail: [marcin.kremieniewski@inig.pl](mailto:marcin.kremieniewski@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji 25.04.2019 r. Zatwierdzono do składu 21.08.2019 r.

satisfactory results were obtained. During the research work, the focus was on reducing the water-cement ratio in the lightweight slurry and on the appropriate quantitative and qualitative selection of the dispersing agent. The leaven formulations were designed for borehole conditions with a temperature of approx. 30°C and a pressure of approx. 5 MPa. The presented new formulas are one latex free slurry and one latex leaven slurry. The publication discusses the results of the sedimentation stability tests for the designed slurries as well as the results of testing of the parameters determining the sealing efficiency. Porosity and permeability tests were carried out for samples of hardened slurries, based on which the benefits of the introduced modifications in the composition of slurries were verified.

Key words: cement slurry, lightweight slurry, plasticizer, sedimentation stability, rheological parameters, water-cement ratio.

## Wprowadzenie

Podczas uszczelniania kolumny rur okładzinowych posadowionych w warstwach o niskim ciśnieniu złożowym lub w strefach chłonnych stosuje się zaczyny o obniżonej gęstości. Receptury takie sporządza się poprzez wprowadzenie do składu zaczynu lekkiego dodatku wypełniającego, co pozwala na obniżenie gęstości projektowanej receptury, a tym samym obniżenie ciśnienia hydrostatycznego zaczynu w przestrzeni pierścieniowej (Kremieniewski, 2017b). Należy jednak zauważyć, że lekkie dodatki, ze względu na to, iż charakteryzują się gęstością znacznie niższą niż gęstość zaczynu, powodują jego frakcjonowanie (fot. 1) poprzez unoszenie się w górnej części objętości zaczynu (Kremieniewski, 2017a; Jordan et al., 2018). Jest to szczególnie obserwowane w przypadku, gdy zaczyn posiada wysokie wartości współczynnika wodno-cementowego (znaczne ilości wody zarobowej). Jednak wprowadzenie dodatkowej, znacznej ilości wypełniacza lekkiego wymusza zwiększenie ilości wody w celu poprawy urabialności sporządzanego zaczynu. Odpowiednie zaprojektowanie receptury zaczynu lekkiego przysparza w związku z powyższym szeregu problemów natury reologicznej, ponieważ obniżenie ilości wody poprawia stabilność sedymentacyjną, ale pogarsza parametry reologiczne, natomiast wzrost ilości wody wpływa korzystnie na urabialność zaczynu, jednakże powoduje nadmierną sedymentację zaprojektowanego zaczynu (Hanna et al., 1989).

Należy mieć na uwadze, że w celu zapewnienia jak najlepszej efektywności uszczelniania kolumn rur okładzinowych należy dobrać parametry reologiczne zaczynów uszczelniających, dostosowując je do warunków złożowych uszczelnianych skał, geometrii otworu wiertniczego oraz systemu cyrkulacyjnego (Nelson, 1990). Świeże zaczyny cementowe

są skoncentrowanymi układami dyspersyjnymi zawierającymi w objętości stałe cząstki o rozwiniętej powierzchni właściwej. Dlatego też analizując strukturę płynnych zaczynów pod kątem reologii cieczy wiertniczej, można stwierdzić, że układy takie należą do bardzo złożonych. Wpływają na to reakcje hydratacji zachodzące w spoiwie wiążącym w jednostce czasu (Kremieniewski, 2018). Zaczyny cementowe można zaklasyfikować do układów dyspersyjnych, jeżeli rozpatrywana będzie wielkość ziaren cementu (Dohnalik i Zalewska, 2013). Wpływ na to ma także struktura zaczynu, która zależy głównie od masowego ilorazu wody i suchego cementu oraz od uziarnienia cementu. Właściwości fizykochemiczne płynnego zaczynu zależą od sił działających między ziarnami cementu a cząsteczkami wody, a wpływa na to ładunek powierzchniowy, stężenie jonów w zaczynie oraz zjawisko adsorpcji cząstek spoiwa (Stryczek et al., 2009, 2014). Na podstawie prowadzonych badań oraz dostępnych danych (Wiśniowski et al., 2007; Stryczek et al., 2014) stwierdza się, że zaczyny cementowe pod względem reologicznym należą do cieczy nienewtonowskich i dodatkowo zachodzą w nich zmiany składu fazowego w trakcie hydratacji cząstek cementu. Podczas prowadzenia badań zaczynów cementowych najczęściej określa się takie parametry jak: lepkość plastyczna, granica płynięcia i wytrzymałość strukturalna. Dodatkowo niekiedy określany jest również współczynnik konsystencji i wskaźnik charakterystyczny przepływu (Stryczek et al., 2009, 2016).

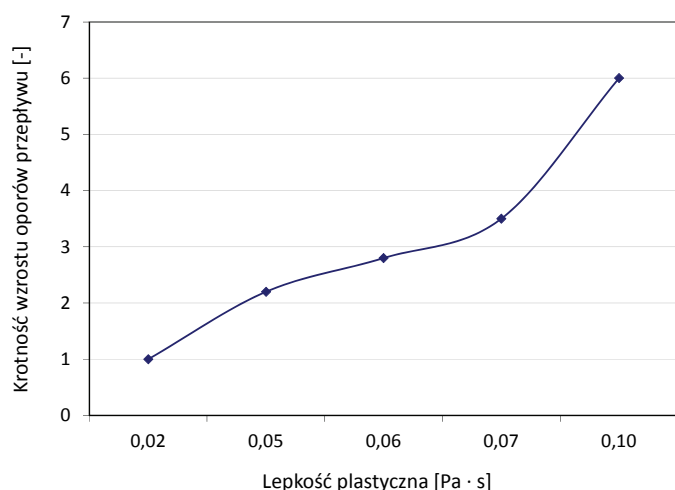
Analizując uzyskane wyniki prowadzonych badań oraz procesów uszczelniania przestrzeni pierścieniowej, zaobserwowano, że najwyższa skuteczność uszczelniania jest możliwa do uzyskania podczas tłoczenia zaczynu w warunkach przepływu turbulentnego. W celu spełnienia tego warunku niezbędne jest wytworzenie dużego wydatku tłoczenia lub zastosowanie dyspergatorów, które pozwalają na osiągnięcie niskich wartości lepkości plastycznej. Dane literaturowe (Półchłopek et al., 1993) informują, że wzrost oporów przepływu postępuje znacznie szybciej niż wzrost lepkości zaczynu, co przedstawione zostało na rysunku 1. Takie zachowanie zaczynu powoduje zagrożenie szczelinowaniem przede wszystkim warstw słabo związanych i sypkich, do których uszczelniania stosowane są zaczyny o obniżonej gęstości.

Kolejnym istotnym parametrem reologicznym zaczynu cementowego jest granica płynięcia. Wartość tego parametru



**Fot. 1.** Nadmierne frakcjonowanie cząstek zaczynu cementowego

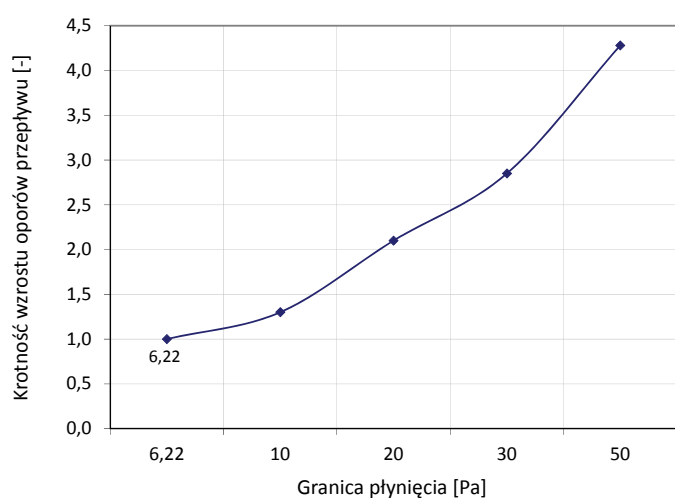
**Photo. 1.** Excessive fractionation of cement slurry particles



**Rys. 1.** Wzrost oporów przepływu w zależności od lepkości plastycznej zaczynu cementowego

**Fig. 1.** Increase in flow resistance depending on the plastic viscosity of the cement slurry

ma znaczny wpływ na efektywność uszczelnienia przy zastosowaniu lekkich zaczynów, kiedy to wymagane jest utrzymanie lekkich frakcji w całej objętości zaczynu. Wysokie wartości granicy płynięcia w zaczynie cementowym powodują wzrost oporów przepływu, co może prowadzić do wystąpienia szczelinowania lub nawet ucieczki zaczynu cementowego w trakcie zabiegu cementowania. Jeśli przyjmijemy granicę płynięcia o wartości 6,2 Pa jako początkowy punkt kontrolny, to proporcjonalnie z jej wzrostem wzrosną również opory przepływu. Zależność ta przedstawiona jest na rysunku 2 (Nelson, 1990). Jeśli chodzi o zaczyny lekkie, w przypadku których niezbędne jest uzyskanie odpowiedniej stabilności sedymentacyjnej, należy nadmienić, że na podstawie danych literaturowych (Stryczek et al., 2005, 2009) podaje się

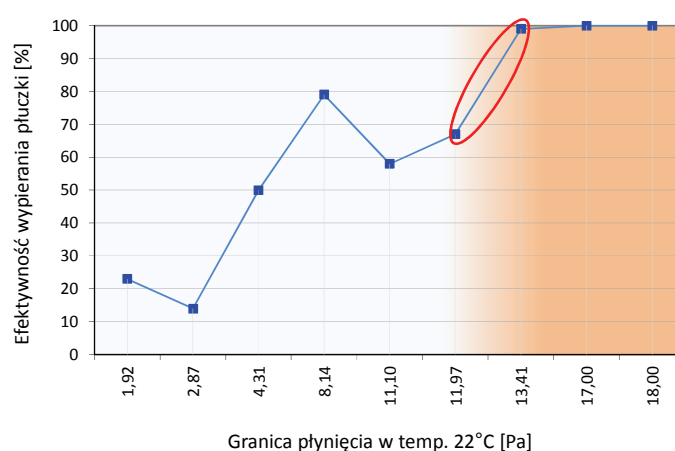


**Rys. 2.** Wzrost oporów przepływu w zależności od granicy płynięcia zaczynu cementowego

**Fig. 2.** Increase in flow resistance depending on the yield point of the cement slurry

minimalną wartość granicy płynięcia, poniżej której nie następuje oczyszczanie dolnej części ściany odchylonego od pionu otworu wiertniczego. W otworach kierunkowych, w których stosowane są zaczyny lekkie, minimalna wartość granicy płynięcia wynosi 14,4 Pa.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność efektywności usuwania osadu z dolnej części otworu (w przypadku otworu kierunkowego) przez zaczyn cementowy dla konkretnej wartości granicy płynięcia. Przy granicy płynięcia wynoszącej więcej niż 14 Pa widoczne jest niemal 100-procentowe usunięcie osadu. Z kolei już nieznaczne jej obniżenie o 2 Pa (do wartości około 12 Pa – zaznaczenie na rysunku 3) powoduje obniżenie efektywności oczyszczania o ponad 30%.



**Rys. 3.** Efektywność wypierania osadu w zależności od granicy płynięcia zaczynu cementowego

**Fig. 3.** Effectiveness of sludge displacement depending on the yield point of the cement slurry

Na podstawie powyższego stwierdza się, że konieczne jest utrzymanie granicy płynięcia zaczynu cementowego w przedziale od 15 Pa do 23 Pa. Wartości takie zapewniają niemal idealne wyparcie płuczki wiertniczej.

Zgodnie z powyższymi rozważaniami parametry reologiczne zaczynów cementowych są bardzo istotne w aspekcie uzyskania odpowiedniej skuteczności uszczelniania kolumny rur okładzinowych. Jednak w zaczynach o obniżonej gęstości oprócz parametrów reologicznych i dodatkowych techniczno-technologicznych główną rolę odgrywa stabilność sedymentacyjna, która jest niejako powiązana z reologią zaczynu. Poprawa stabilności zaczynu możliwa jest do uzyskania głównie poprzez użycie środków zwiększających jego lepkość, co przeciwdziała frakcjonowaniu lekkich drobin, np. mikrosfery (Kremieniewski et al., 2017; Kremieniewski, 2017c). Jednak działanie takie oprócz wzrostu lepkości powoduje wzrost granicy płynięcia zaczynu, co wymusza wprowadzenie dodatkowej porcji wody do zaczynu (Peng i Jacobsen, 2013; Kremieniewski, 2019). W takiej sytuacji pomocne jest

użycie środka dyspergującego (upłynniacza, plastyfikatora lub superplastyfikatora (Kamoun et al., 2003)), co zostało omówione w niniejszej publikacji. Obecność upłynniacza w zaczynie powoduje dyspergowanie obecnych w objętości ziaren, dzięki czemu możliwe jest obniżenie ilości wody w zaczynie, co znajduje przełożenie na poprawę stabilności sedymentacyjnej (Kremieniewski i Rzepka, 2018). Zaobserwowano również, że obniżenie współczynnika wodno-cementowego w recepturze zaczynu lekkiego pozwala także poprawić wartości parametrów mechanicznych powstałego z zaczynu płaszcza cementowego.

### Przebieg prac badawczych

Badania, na podstawie których określono możliwość poprawy stabilności sedymentacyjnej zaczynu lekkiego poprzez użycie plastyfikatora, zostały zrealizowane w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających INiG – PIB na podstawie norm: PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*, PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych oraz API SPEC 10 Specification for materials and testing for well cements*.

Celem cyklu badawczego, który został omówiony w niniejszej publikacji, było wykazanie możliwości poprawy stabilności sedymentacyjnej zaczynu lekkiego wskutek zastosowania dodatku dyspergującego w postaci plastyfikatora. Skoncentrowano się na zaczynach o obniżonej gęstości, ponieważ to właśnie w tej grupie receptur najczęściej dochodzi do frakcjonowania i rozwarstwiania się obecnych w zaczynie dodatków. Związane jest to z faktem, że w celu obniżenia gęstości projektowanego zaczynu wprowadza się do receptury wypełniacze lekkie. Obecność tych frakcji pozwala uzyskać niskie wartości gęstości, która jest dostosowywana do określonych warunków geologiczno-technicznych. Jednak zróżnicowanie w gęstości ziaren cementu i gęstości cząstek dodatków lekkich powoduje opadanie cementu w dolne partie i unoszenie się wypełniaczy lekkich w górnej części cementowanej przestrzeni pierścieniowej lub pozarurowej. Zjawisko to nasila się wraz ze wzrostem ilości wody w zaczynie, a zaznaczyć należy, że wprowadzenie do objętości zaczynu dodatkowej porcji wypełniacza lekkiego wymusza zastosowanie większej objętości wody. W celu wyeliminowania nadmiernego frakcjonowania zaczynów cementowych zawierających wypełniacze lekkie stosuje się niekiedy środki polimerowe. Obecność takich polimerów powoduje wzrost parametrów reologicznych, dzięki czemu obecne w zaczynie ziarna o zróżnicowanych ciężarach objętościowych w mniejszym stopniu

ulegają rozdzielaniu. Jednak wzrost parametrów reologicznych zaczynu na skutek wprowadzenia polimerów wysokolepkich jest niekorzystny, ponieważ zaczyn taki wymaga tłoczenia pod zwiększonym ciśnieniem, co może prowadzić do rozszczelinowania stref słabo zwięzłych, w których to formacjach geologicznych najczęściej stosuje się właśnie zaczyny o obniżonej gęstości. W związku z powyższym pewnego rodzaju sposobem na poprawę stabilności sedymentacyjnej zaczynu lekkiego jest właśnie wprowadzenie plastyfikatora, co jednocześnie pozwala na obniżenie współczynnika wodno-cementowego. Zastosowanie takiej modyfikacji w recepturze zaczynu skutkuje wzrostem koncentracji fazy stałej w objętości cieczy, ale dzięki działaniu dyspergującego plastyfikatora nie powoduje znacznego wzrostu parametrów reologicznych. Zaprojektowany w taki sposób zaczyn lekki charakteryzuje się stabilnością sedymentacyjną. Podczas realizacji prac badawczych, których najważniejsze wyniki zostały omówione w dalszej części niniejszej publikacji, w pierwszej kolejności skoncentrowano się na określeniu gęstości zaczynów i wartości odstoju wody. Następnie pomiarowi poddano również parametry decydujące o efektywności uszczelniania, czyli: parametry reologiczne zaczynu, filtrację w warunkach dynamicznych oraz czas gęstnienia w warunkach otworopodobnych. W tabeli 1 przedstawiono składy receptur zaczynów, a w tabeli 2 otrzymane parametry technologiczne. Na potrzeby publikacji zestawiono najważniejsze wyniki prac badawczych.

Receptury zaczynów lekkich, na podstawie których określano możliwość poprawy stabilności sedymentacyjnej poprzez użycie plastyfikatora, zestawiono w tabeli 1. Za punkt

**Tabela 1.** Składy wytypowanych zaczynów dla warunków otworowych o temperaturze około 30°C i ciśnieniu około 5 MPa

**Table 1.** Compositions of selected slurries for borehole conditions with a temperature of approx. 30°C and a pressure of about 5 MPa

SKŁAD	ZACZYN 1 kontrolny	ZACZYN 2	ZACZYN 3
Woda wodociągowa	1,2	1,0	0,8
Bentonit (bwow)	2,0	2,0	1,2
KCl	3,0	–	–
Środek odpeniający	1,0	0,5	0,5
Środek upłynniający	–	0,25	0,35
Środek antyfiltracyjny	0,5	0,4	0,4
CaCl <sub>2</sub>	1,0	3,0	3,0
Lateks	18,0	–	10,0
Stabilizator lateksu	1,0	–	1,0
Mikrosfera	40,0	40,0	40,0
Mikrocement	20,0	–	–
Cement CEM G	100,0	100,0	100,0
Środek spęczniający	0,3	–	–

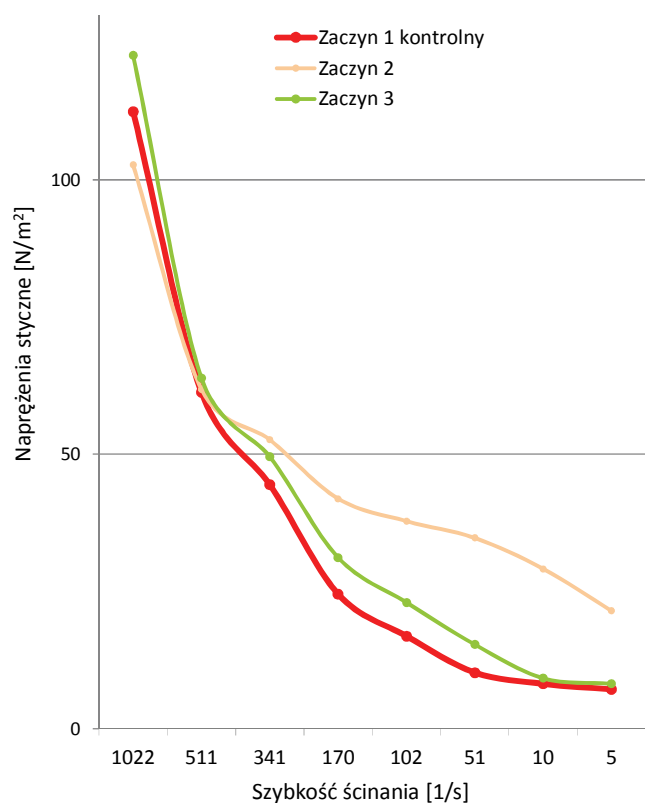


**Tabela 2.** Parametry badanych receptur zaczynów dla warunków otworowych o temperaturze około 30°C i ciśnieniu około 5 MPa

**Table 2.** Parameters of the tested slurries for borehole conditions with a temperature of approx. 30°C and a pressure of about 5 MPa

Parametr		ZACZYN 1 kontrolny	ZACZYN 2	ZACZYN 3
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]		1260	1260	1260
Odstój wody [%]		1,5	0,4	0,0
Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]		186	214	91
Lepkość plastyczna [mPa · s]		108	58,5	96
Granica płynięcia [Pa]		5,8	30,0	13,92
Wytrzymałość strukturalna [Pa]		8,64	24,48	8,16
Stabilność sedymentacyjna Gęstość w części kolumny [kg/m <sup>3</sup> ]	góra	1130	1250	1260
	środek	1240	1260	1260
	dół	1390	1260	1260
Czas gęstnienia [godz:min] (t = 30°C*, p = 5 MPa)	30 Bc	5:40	4:30	3:15
	100 Bc	6:30	5:05	4:50
Przepuszczalność dla gazu przez stwardniały zaczyn cementowy	[mD]	0,014	0,019	0,002

\* Czas dojścia do temperatury wynosi 15 minut



**Rys. 4.** Przebieg wartości krzywych płynięcia omawianych receptur zaczynów cementowych

**Fig. 4.** The course of flow curve values of the discussed cement slurries

odniesienia przyjęto recepturę oznaczoną numerem 1, który to zaczyn był stosowany podczas uszczelniania otworu o zakodowanej nazwie GIH2. Zaczyny nr 2 oraz 3 to receptury, w których wykorzystane zostały modyfikacje polegające na wprowadzeniu środka dyspergującego i jednocześnie zmianie współczynnika wodno-cementowego w celu uzyskania wymaganych wartości parametrów reologicznych. Wszystkie zaczyny sporządzono dla warunków otworowych z temperaturą około 30°C i ciśnieniem około 5 MPa.

Zaczyn kontrolny nr 1 został sporządzony na bazie 3-procentowego roztworu KCl. Zastosowano współczynnik wodno-cementowy wynoszący 1,2. W celu wytworzenia zawiesiny minimalizującej frakcjonowanie użyto 2% bwow<sup>1</sup> bentonitu, pozostałe środki dozowano w stosunku do ilości cementu (bwoc). W celu zminimalizowania napowietrzania zaczynu podczas jego zarabiania użyto 1% środka gaszącego pianę, jak również 0,5% środka antyfiltracyjnego. Przyspieszenie czasu wiązania było regulowane 1-procentową koncentracją chlorku wapnia. Zaczyn zawierał 18% lateksu. Gęstość zaczynu została dostosowana do warunków geologicznych dzięki wprowadzeniu 40% mikrosfer ceramicznych, a doszczelnienie

matrycy cementowej uzyskano wskutek dodania 20% mikro-cementu (tab. 1). Zastosowano 0,3% środka spęczniającego, a zaczyn kontrolny, jak również kolejne receptury sporządzono na bazie cementu wiertniczego klasy G. Przygotowany w ten sposób zaczyn cementowy posiadał gęstość 1260 kg/m<sup>3</sup>, jednak prawdopodobnie z uwagi na dużą ilość wody zarobowej charakteryzował się znacznym odstojem, wynoszącym 1,5%. Zaczyn kontrolny nie posiadał też odpowiedniej stabilności sedymentacyjnej. Podczas pomiaru gęstości w trzech punktach pomiarowych kolumny sedymentacyjnej uzyskano wartości: 1130 kg/m<sup>3</sup> w części górnej, 1240 kg/m<sup>3</sup> w części środkowej oraz 1390 kg/m<sup>3</sup> w dolnej. Zarówno znaczne frakcjonowanie zaczynu, jak też duża ilość wydzielanej wody wolnej mogły być wynikiem zastosowania dużej ilości wody zarobowej, co było niezbędne w celu uzyskania optymalnych wartości parametrów reologicznych. Krzywa płynięcia zaczynu kontrolnego posiadała najniższy przebieg spośród analizowanych receptur (rys. 4). Zaczyn kontrolny posiadał wartość granicy płynięcia równą 5,8 Pa, natomiast wytrzymałość strukturalna wynosiła 8,6 Pa. Uzyskano wartość filtracji dynamicznej wynoszącą 186 cm<sup>3</sup>/30 min. Wyniki badań dla zaczynu kontrolnego zestawiono w tabeli 2.

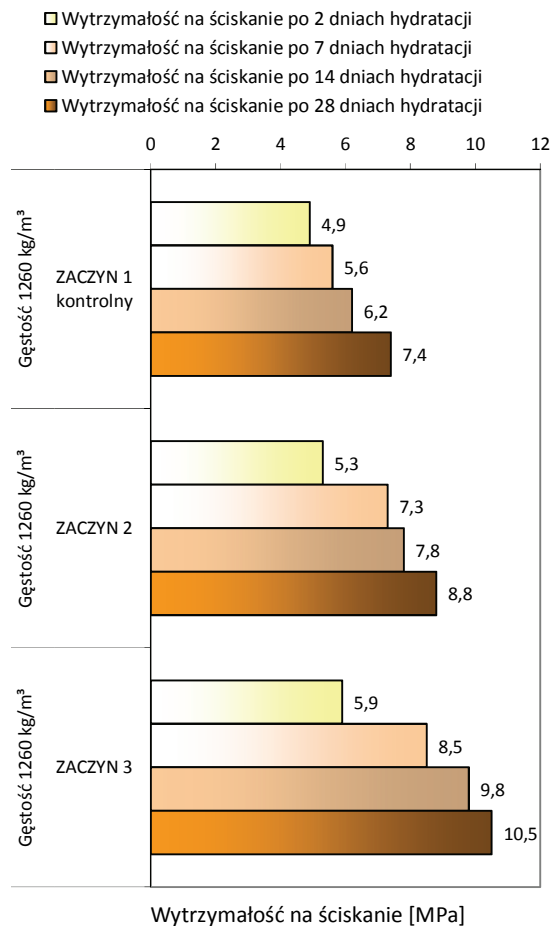
<sup>1</sup> bwow – z ang. by weight of water – w stosunku do ilości wody zarobowej w zaczynie

Receptura oznaczona numerem 2 to zaczyn, w którym zastosowano 0,25% środka upłynniającego oraz zmniejszono współczynnik wodno-cementowy z 1,2 w zaczynie kontrolnym do 1,0. Zastosowano również 3% chlorku wapnia, natomiast nie użyto lateksu, mikrocementu, środka spęczniającego oraz chlorku potasu. Zaczyn podobnie jak receptura kontrolna zawierał bentonit w celu zminimalizowania frakcjonowania. Skład zaczynu przedstawiono w tabeli 1. Tak sporządzony zaczyn posiadał gęstość 1260 kg/m<sup>3</sup>. Odnotowano niższą niż w zaczynie kontrolnym wartość odstoju wody, która teraz wynosiła 0,4%. Taka wartość odstoju znalazła również przełożenie na poprawę stabilności sedymentacyjnej – podczas pomiaru uzyskano jednakowe wartości gęstości (1260 kg/m<sup>3</sup>) w dolnym i środkowym punkcie pomiarowym, jedynie w górnej części kolumny gęstość wynosiła 1250 kg/m<sup>3</sup>. Znaczna poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynu wynikała z jego parametrów reologicznych, na podstawie których wykreślona krzywa płynięcia przedstawiona na rysunku 2 posiadała najwyższy przebieg przy niskich szybkościach ścinania. W związku z powyższym wytrzymałość strukturalna zaczynu wynosiła 24,5 Pa, a granica płynięcia 30 Pa. Filtracja zaczynu była wyższa niż w recepturze kontrolnej i wynosiła 214 cm<sup>3</sup>/30 min, co mogło być wynikiem braku lateksu w składzie zaczynu.

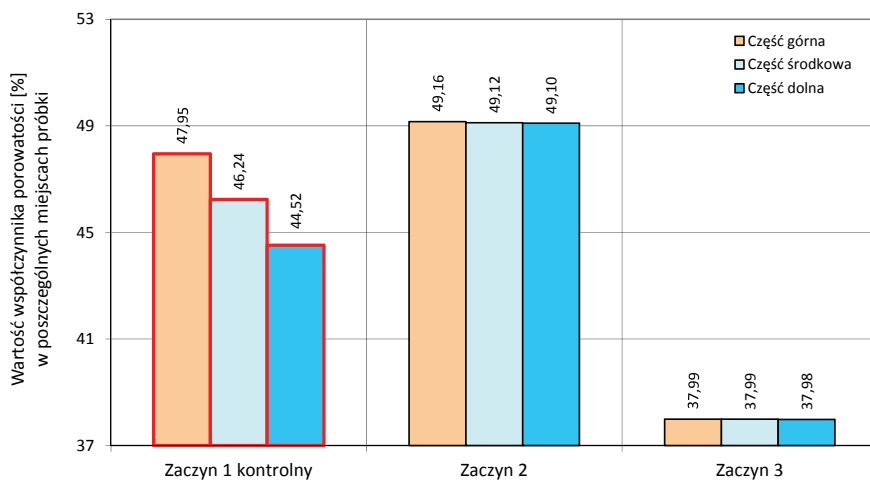
Trzecia receptura zaczynu, którego skład przedstawiono w tabeli 1, charakteryzowała się jeszcze niższym współczynnikiem wodno-cementowym, który wynosił 0,8, oraz większą niż w poprzednim zaczynie ilością środka upłynniającego, wynoszącą 0,35% (w zaczynie nr 3). Takie działania pozwoliło zwiększyć koncentrację składników stałych w objętości cieczy zarobowej. W zaczynie nr 3 zmniejszono ilość bentonitu do wartości 1,2% bwow oraz dodatkowo wprowadzono 10% lateksu. Zaczyn nie zawierał mikrocementu. Gęstość tak sporządzonego zaczynu wynosiła 1260 kg/m<sup>3</sup>. Zaczyn nie posiadał odstoju wody oraz wykazywał odpowiednią stabilność sedymentacyjną, co stwierdzono po uzyskaniu we wszystkich punktach poboru próbki (górze, środku, dole) tej samej wartości gęstości (tab. 2). Otrzymane wartości parametrów reologicznych były porównywalne do wartości zaczynu kontrolnego, a krzywa płynięcia zaczynu nr 3 przebiegała tylko nieznacznie wyżej krzywej kontrolnej (rys. 4). Zastosowanie dodatku lateksu oraz zmniejszenie współczynnika wodno-cementowego skutkowało obniżeniem filtracji dynamicznej do wartości 91 cm<sup>3</sup>/30 min.

Analizując zestawione na rysunku 3 wyniki badań parametrów mechanicznych,

stwierdzono, że próbka utworzona z zaczynu kontrolnego posiadała najniższe wartości spośród zestawionych. Próbką kontrolną charakteryzowała się wartościami wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 4,9 MPa po 2 dniach hydratacji do 7,4 MPa po 28 dniach hydratacji. Nieco wyższe wartości



Rys. 5. Porównanie uzyskanych wartości wytrzymałości na ściskanie  
Fig. 5. Comparison of the obtained compressive strength values



Rys. 6. Zestawienie wartości porowatości stwardniałego zaczynu w zależności od miejsca poboru próbki (izotropia struktury)

Fig. 6. Comparison of porosity values depending on the sampling point (structure isotropy)

wytrzymałości na ściskanie uzyskano podczas badań próbek nr 2, otrzymanej z zaczynu bez dodatku lateksu oraz o mniejszej ilości wody zarobowej. Próbka stwardniałego zaczynu cementowego oznaczona numerem 2 posiadała wartości wytrzymałości na ściskanie w przedziale od 5,3 MPa po 2 dniach hydratacji do 8,8 MPa po 28 dniach hydratacji. Natomiast próbka oznaczona numerem 3 charakteryzowała się najwyższymi wartościami wytrzymałości – w przedziale od 5,9 MPa po 2 dniach hydratacji do 10,5 MPa po 28 dniach hydratacji (rys. 3). Otrzymanie najwyższych wartości w przypadku ostatniej próbki można uzasadnić najniższą wartością współczynnika wodno-cementowego, co znalazło przełożenie na większą koncentrację fazy stałej w zaczynie. Dodatkowo próbka powstała z zaczynu 3 posiadała dodatek lateksu, który doszczelniał strukturę międzyziarnową cementu. Nawiązując do powyższego, należy również zaznaczyć, że próbka nr 3 posiadała najniższą wartość przepuszczalności dla gazu (0,002 mD, tab. 2), którą to wartość uzyskano podczas pomiaru struktury porowej za pomocą porozymetrii rtęciowej.

Rozpatrując mikrostrukturę porową wytypowanych próbek stwardniałego zaczynu cementowego wykonano również badania anizotropii płaszcza cementowego. W tym celu zaczyn cementowy umieszczono w cylindrze o wysokości ok. 1 metra i pozostawiono do związania. Po 28 dniach hydratacji wykonano badanie porowatości próbki pobranej z dolnej części cylindra, z jego części środkowej oraz górnej. Na podstawie różnic w porowatości możliwe było określenie jednorodności struktury tworzącego się w przestrzeni pierścieniowej płaszcza cementowego. W próbce utworzonej z zaczynu kontrolnego oznaczonego numerem 1 uzyskano wartość porowatości wynoszącą: 47,96% w górnej części, 46,24% w części środkowej oraz 44,52% dla próbki pobranej z dolnej części cylindra. Taka rozbieżność otrzymanych wartości potwierdza brak stabilności sedymentacyjnej płynnego zaczynu, przekładający się na tworzenie anizotropowej struktury płaszcza cementowego. W próbce nr 2, która charakteryzowała się poprawną stabilnością, uzyskano wartości porowatości w zakresie od 49,10% do 49,16%, natomiast próbka powstała z zaczynu oznaczonego numerem 3 posiadała wartości porowatości w zakresie od 37,98% do 37,99%. Wartości porowatości próbek w zależności od miejsca poboru zestawiono na rysunku 4. Zaobserwowano również, że próbka z zaczynu nr 3 posiadała najniższe wartości porowatości, mogące być wynikiem niskiego współczynnika wodno-cementowego oraz obecności lateksu. Z kolei próbka nr 2, mimo mniejszej ilości wody niż próbka kontrolna, posiadała najwyższe wartości porowatości, co można uzasadniać brakiem dodatku lateksu, który wykazuje działanie doszczelniające.

## Wnioski

Na podstawie zrealizowanych prac badawczych nad możliwością poprawy stabilności sedymentacyjnej zaczynu lekkiego wskutek zastosowania dodatku dyspergującego w postaci plastyfikatora sformułowano następujące wnioski końcowe:

- 1) Obniżenie współczynnika wodno-cementowego w zaczynie powoduje wzrost jego parametrów reologicznych.
- 2) Poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynu cementowego jest możliwa do uzyskania poprzez zwiększenie wartości parametrów reologicznych, głównie wytrzymałości strukturalnej oraz granicy płynięcia.
- 3) Wyższe wartości parametrów reologicznych zaczynu cementowego nie zawsze są korzystne, ponieważ wymaga to zastosowania większego wydatku tłoczenia, w wyniku czego wzrasta ciśnienie hydrauliczne. Może się to przyczynić do rozszczelinowania słabo związanych struktur geologicznych, które najczęściej uszczelniane są zaczynami o obniżonej gęstości.
- 4) W celu utrzymania parametrów reologicznych na stałym poziomie, a jednocześnie zwiększenia koncentracji fazy stałej w zaczynie korzystne jest zastosowanie środka w postaci plastyfikatora bądź upłynniacza, co umożliwi obniżenie wartości współczynnika wodno-cementowego.
- 5) Dodatek środka upłynniającego wraz z jednoczesnym obniżeniem współczynnika wodno-cementowego powoduje zarówno poprawę stabilności sedymentacyjnej, jak też wpływa na doszczelnienie matrycy płaszcza cementowego (obniżenie przepuszczalności i porowatości) bez konieczności stosowania dodatkowego wypełniacza w postaci np. mikrocementu (zaczyn nr 3).
- 6) Przedstawione w publikacji modyfikacje zaczynu lekkiego, polegające na redukcji ilości wody oraz wprowadzeniu odpowiedniej ilości środka dyspergującego, przynoszą korzyść ekonomiczną (mniejsza ilość lateksu niż w zaczynie kontrolnym oraz brak mikrocementu).
- 7) Należy mieć na uwadze, że zmniejszenie ilości wody w zaczynie powoduje skrócenie czasu wiązania i gęstnienia, dlatego też parametry te należy regulować za pomocą środków wydłużających czas wiązania.
- 8) Bardzo ważny jest odpowiedni dobór zarówno jakościowy, jak i ilościowy środka dyspergującego, ponieważ przedozowanie plastyfikatora spowoduje tak mocne dyspergowanie ziaren w zaczynie, że ulegnie on ponownemu sedymentowaniu.

Artykuł powstał na podstawie prac badawczych pt. *Analiza możliwości poprawy stabilności sedymentacyjnej zaczynów cementowych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW, nr zlecenia: 0036/KW/2016, nr archiwalny: DK-4100-0036/2016, oraz *Analiza*

możliwości doszczelnienia mikrostruktury płaszcza cementowego za pomocą nowych domieszek drobnoziarnistych – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW, nr zlecenia: 0044/KW/2019, nr archiwalny: DK-4100-0034/2019.

## Literatura

- Dohnalik M., Zalewska J., 2013. Korelacja wyników laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii rtęciowej. *Nafta-Gaz*, 10: 735–743.
- Hanna E., Luke K., Perraton D., Aitcin P.-C., 1989. Rheological Behavior of Portland Cement in the Presence of a Super Plasticizer. *Journal of the American Concrete Institute*, 119: 171–188.
- Jordan A., Pernites R., Albrighton L., 2018. Low-density, lightweight cement tested as alternative to reduce lost circulation, achieve desired top of cement in long horizontal wells. *Drilling Contractor*, September/October: 62–64.
- Kamoun A., Jelidi A., Chaabouni M., 2003. Evaluation of the performance of sulfonated esparto grass lignin as a plasticizer–water reducer for cement. *Cement and Concrete Research*, 33(7): 995–1003.
- Kremieniewski M., 2017a. Poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynów cementowych. *Prace Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 216: 1–191.
- Kremieniewski M., 2017b. Poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 4: 242–249. DOI: 10.18668/NG.2017.04.04.
- Kremieniewski M., 2017c. Wpływ perlitu pylistego na własności technologiczne zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 12: 943–952. DOI: 10.18668/NG.2017.12.05.
- Kremieniewski M., 2018. Poprawa wczesnej wytrzymałości mechanicznej płaszcza cementowego powstałego z zaczynu lekkiego. *Nafta-Gaz*, 8: 599–605. DOI: 10.18668/NG.2018.08.06.
- Kremieniewski M., 2019. O konieczności prowadzenia serwisowych badań parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających. *Nafta-Gaz*, 1: 48–55. DOI: 10.18668/NG.2019.01.07.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2018. Wpływ superplastyfikatora na hydrofilowość zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 10: 10–16. DOI: 10.18668/NG.2018.10.06.
- Kremieniewski M., Stryczek S., Wiśniowski R., Rzepka M., Gonet A., 2017. Influence of bentonite addition on parameters of fresh and hardened cement slurry. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 34(2): 323–334.
- Nelson E.B. (ed.), 1990. Well Cementing. *Schlumberger Educational Service, Houston, Texas, USA*.
- Peng Y., Jacobsen S., 2013. Influence of water/cement ratio, admixtures and filler on sedimentation and bleeding of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 54: 133–142. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.09.003.
- Półchłopek T. (kier. zespołu), 1993. *Zaczyny cementowe do cementowania otworów kierunkowych i poziomych oraz technologia ich zatłaczania. Praca INiG, Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Stryczek S., Gonet A., Wiśniowski R., 2005. Wpływ wybranego dodatku mineralnego na własności technologiczne zaczynów cementowych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 22(1): 333–341.
- Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., Ferens W., 2009. Parametry reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających w zależności od czasu ich sporządzania. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 26(1–2): 369–382.
- Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., Złotkowski A., 2014. The influence of time of rheological parameters of fresh cement slurries. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 31: 123–133. DOI 10.7494/drill.2014.31.1.123.
- Stryczek S. (red.), Wiśniowski R., Uliasz-Misiak B., Złotkowski A., Kotwica Ł., Rzepka M., Kremieniewski M., 2016. *Studia nad doborem zaczynów uszczelniających w warunkach wierceń w basenie pomorskim. Wydawnictwa AGH, Kraków*.
- Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K., 2007. Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 24: 595–607.



Dr inż. Marcin KREMIENIEWSKI  
 Adiunkt w Zakładzie Technologii Wiercenia  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [marcin.kremieniewski@inig.pl](mailto:marcin.kremieniewski@inig.pl)