

Wpływ wybranych dodatków lekkich na zmianę parametrów technologicznych zaczynu

Influence of selected light additives on the change of technological parameters of the cement slurry

Marcin Kremieniewski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W celu obniżenia gęstości zaczynów przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w warunkach obniżonego ciśnienia złożowego czy w strefach skał słabo zwięzłych stosuje się lekkie dodatki, takie jak mikrosfera bądź perlit. Użycie tego rodzaju materiałów pozwala na zredukowanie wartości ciśnienia hydrostatycznego i tym samym zapobiega ucieczce cementu w strefy słabo zwięzłe. Dodatkowo zaczyny o obniżonej gęstości mogą być stosowane w przypadku konieczności tłoczenia cementu w przestrzeni pozarurowej na dużą wysokość. Jednak wykorzystanie dodatków redukujących gęstość zaczynu nie pozostaje bez znaczenia dla parametrów technologicznych zarówno świeżego, jak i stwardniałego zaczynu. W przypadku płynnego zaczynu obecność lekkich frakcji powoduje zmianę parametrów reologicznych zaczynu, wzrost wartości filtracji bądź też odstoju wody. Natomiast analizując parametry stwardniałego zaczynu cementowego, należy się spodziewać obniżenia wartości wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, przyczepności do rur stalowych itp. Z uwagi na konieczność stosowania w recepturach zaczynów lekkich dodatków redukujących gęstość w niniejszej publikacji omówiono to zagadnienie na podstawie przeprowadzonych prac badawczych. W artykule przedstawiono wyniki badań zaczynów zawierających 4 różne dodatki (mikrosferę glinokrzemianową dotychczas stosowaną, mikrosferę glinokrzemianową nowej generacji CSF K, mikrosferę szklaną oraz perlit filtracyjny E100F). Dodatki lekkie stosowano w ilości 15% w stosunku do masy cementu. Przeprowadzono badania dla zaczynu kontrolnego (bez dodatków lekkich). Zaczyn ten zawierał w swoim składzie środki niezbędne do kontrolowania parametrów decydujących o efektywności uszczelniania otworu wiertniczego. Następnie receptura kontrolna była modyfikowana dodatkiem lekkich frakcji. Przeprowadzono badania laboratoryjne parametrów technologicznych zarówno świeżych, jak i stwardniałych zaczynów cementowych. Na podstawie uzyskanych wyników określono wpływ badanych lekkich dodatków na parametry świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, cementowanie otworów, gęstość zaczynu, dodatki lekkie, mikrosfera, perlit, czas wiązania, wytrzymałość na ściskanie.

ABSTRACT: Light additives such as microsphere or perlite are used to reduce the density of slurries intended for sealing casing columns in conditions of reduced deposit pressure or in the zones of weakly concise rocks. The use of this type of materials allows to reduce the value of hydrostatic pressure and thus prevents the cement slurry from escaping into weakly consolidated zones. In addition, lightweight cement slurries can be used for pressing the cement slurry to a great height. However, the use of additives reducing the density of the cement slurry changes the technological parameters of both fresh and hardened cement slurry. In the case of a liquid cement slurry, the presence of light fractions changes the rheological parameters of the slurry, increases the filtration value or free water. On the other hand, when analyzing the parameters of the hardened cement slurry, a decrease in the compressive strength, bending strength, adhesion to steel pipes and others should be expected. Due to the necessity to use light additives reducing the density in the cement slurry formulas, this publication discusses this issue on the basis of the conducted research. The article presents the results of tests of slurries containing 4 different additives (the previously used aluminosilicate microsphere, the new generation CSF K aluminosilicate microsphere, glass microsphere and E100F filter perlite). Light additives were used in the amount of 15% in relation to the weight of the cement. Tests were carried out for the control cement slurry (without light additives). This slurry contained in its composition the additives necessary to control the parameters determining the effectiveness of sealing the borehole. Then the control recipe was modified with the addition of light fractions. Laboratory tests of technological parameters of both fresh and hardened cement slurries were carried out. On the basis of the obtained results, the influence of the tested light additives on the parameters of fresh and hardened cement slurries was determined.

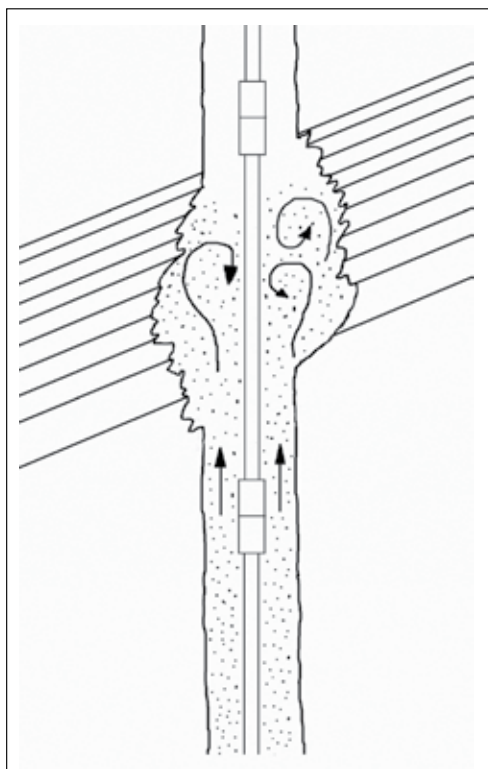
Key words: cement slurry, well cementing, slurry density, light additives, microsphere, perlite, setting time, compressive strength.

Autor do korespondencji: M. Kremieniewski, e-mail: marcin.kremieniewski@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 04.03.2022 r. Zatwierdzono do druku: 01.06.2022 r.

Wprowadzenie

Prawidłowo przeprowadzona operacja rurowania i cementowania poszczególnych kolumn rur okładzinowych, szczególnie na złożach o niskim ciśnieniu złożowym lub w strefach chłonnych, ma niewątpliwy wpływ na efektywność prac poszukiwawczych za złożami gazu ziemnego, ropy naftowej oraz wód termalnych. Przestrzeń pierścieniowa lub pozarurowa wypełniana jest zaczynem cementowym, który wypiera płuczkę wiertniczą (Stryczek et al., 2014; Kremieniewski i Kędziński, 2020). Zaczyny cementowe stosowane podczas zabiegu cementowania można podzielić na zaczyny o „normalnej gęstości” – około 1750–1850 kg/m³, zaczyny lekkie o gęstości poniżej 1750 kg/m³ oraz zaczyny ciężkie, których gęstość wynosi ponad 1900 kg/m³ (Rzepka et al., 2012; Kremieniewski, 2020b). Gęstość zaczynu cementowego jest dobierana do określonych warunków geologiczno-technicznych, które zależą między innymi od budowy geologicznej przewierczanych warstw oraz głębokości otworu (Nelson, 1990). W niniejszej publikacji omówiono problematykę zaczynów lekkich oraz dodatków stosowanych do obniżenia ich gęstości. Zaczyny lekkie są stosowane w przypadku konieczności wytlóczenia zaczynu cementowego do przestrzeni pierścieniowej lub pozarurowej na wyznaczoną wysokość, w przypadku gdy występują skały chłonne (Nelson, 1990; Kremieniewski, 2021). Najczęściej



Rysunek 1. Tworzenie się zasypu w poszerzonej części otworu w warstwach słabo zwięzłych (Nelson, 1990)

Figure 1. Formation of backfill in the widened part of the borehole in weakly compact layers (Nelson, 1990)

zaczyny cementowe o obniżonej gęstości stosowane są do uszczelniania kolumn rur okładzinowych posadowionych w profilu skał słabo zwięzłych oraz poziomach produktywnych o niskim ciśnieniu złożowym, a także podczas prowadzenia prac rekonstrukcyjnych odwiertu. Wiercenie w słabo zwięzłych strukturach geologicznych stanowi jedną z częściej spotykanych przyczyn komplikacji i awarii wiertniczych (Rzepka i Stryczek, 2008; Kremieniewski et al., 2021). Wiąże się to z sypliwością warstw na skutek zaburzeń tektonicznych oraz ze szkodliwym oddziaływaniem płuczki wiertniczej na skałę. W pierwszym przypadku skała jest jednolita i pokruszona, a w trakcie wiercenia następuje naruszenie stanu równowagi naprężeń, czego konsekwencją jest jej obsypywanie. Zaburzenia takie mogą występować na znacznym odcinku otworu, co grozi niebezpieczeństwem obsypania rur płuczkowych i obciążników, a w efekcie ich przechwyceniem (Nelson, 1990; Wiśniowski et al., 2007; Stryczek et al., 2016). Natomiast stale obsypująca się skała powoduje powstawanie rozważu o większej średnicy niż wiercony otwór, co przedstawiono na rysunku 1.

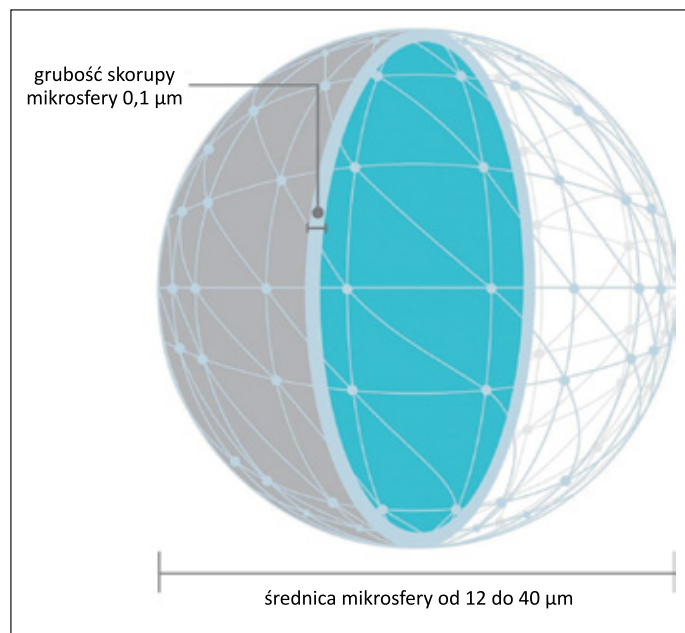
Do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w tego rodzaju warunkach geologicznych należy stosować zaczyn, którego skład wzbogacany jest o dodatek lekkich frakcji. Są to różnego rodzaju wypełniacze redukujące gęstość zaczynów cementowych, co pozwala na zmniejszenie wielkości ciśnienia hydrostatycznego podczas cementowania. Dodatki redukujące gęstość zaczynu można podzielić (w zależności od mechanizmu obniżania gęstości) na 3 kategorie (Nelson, 1990; Stryczek et al., 2005; Kremieniewski i Kędziński, 2020):

- wypełniacze wodne – gliny oraz środki zagęszczające, które umożliwiają zwiększenie współczynnika wodnego. Pozwalają również na wprowadzenie dodatkowej ilości wody zarobowej, co skutkuje wzrostem objętości zaczynu i obniżeniem jego gęstości. Wypełniacze te powinny utrzymywać zaczyn w stanie homogenicznym, nie powodując jednocześnie wzrostu odstoju wody;
- zespoły o niskiej gęstości, czyli materiały charakteryzujące się ciężarem właściwym niższym niż ciężar cementu, którego gęstość wynosi około 3150 kg/m³. Zastosowanie tych wypełniaczy umożliwia obniżenie gęstości zaczynu i zmniejszenie ilości cementu;
- wypełniacze gazowe (ich stosowanie jest znikome).

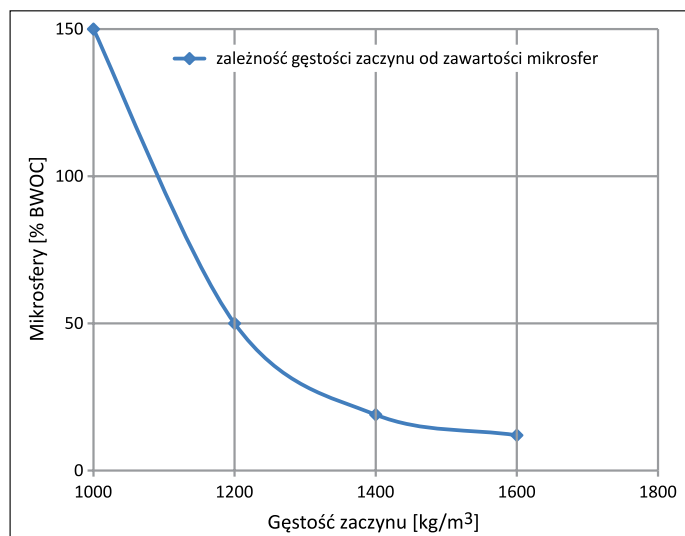
Najczęściej wykorzystywanymi dodatkami podczas projektowania receptur zaczynów o obniżonej gęstości są właśnie dodatki lekkie, charakteryzujące się obecnością przeważającej liczby cząsteczek lekkich. Jednym z takich materiałów jest mikrosfera (Kremieniewski i Kędziński, 2020). Są to materiały kuliste o gęstości od 400 kg/m³ do 600 kg/m³, które mają wewnątrz wypełnione gazem (rysunek 2).

Dodatek mikrosfery w zaczynie cementowym pozwala na znaczne obniżenie jego gęstości, co przedstawiono na

rysunku 3. Wyróżnia się mikrosferę ceramiczną – pochodną pyłów piecowych oraz mikrosferę szklaną (Nelson, 1990; Kurdowski, 2010; Kremieniewski i Kędziński, 2020).



Rysunek 2. Schemat cząsteczki mikrosfery
Figure 2. Diagram of the microsphere particle

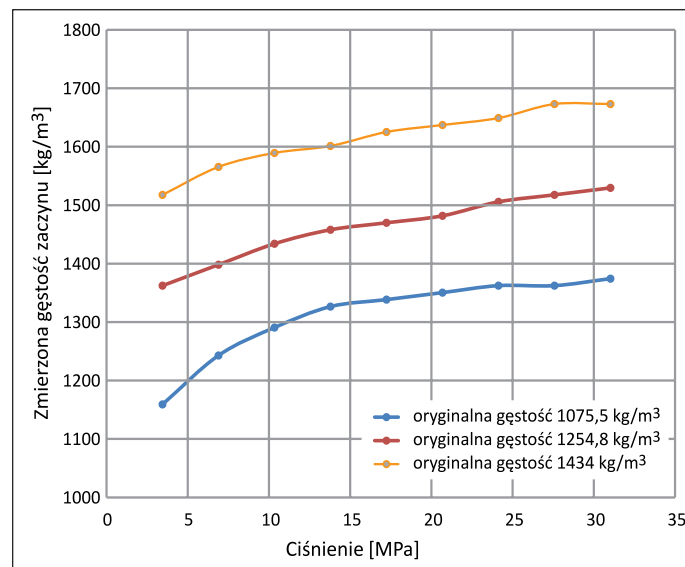


Rysunek 3. Zależność gęstości zączynu od zawartości mikrosfery (Nelson, 1990)

Figure 3. Dependence of the cement slurry density on the microsphere content (Nelson, 1990)

Mikrosfera sprawdza się w obniżaniu gęstości zączynów stosowanych do uszczelniania kolumn rur posadowionych na niewielkich głębokościach. Często występują tam niskie gradienty szczelinowania, co wymusza stosowanie tego rodzaju dodatku. Należy również zauważyć, że mikrosfery ceramiczne ulegają zgniataniu pod wpływem wysokiego ciśnienia, wskutek czego wzrasta gęstość zączynu. Należy mieć to na uwadze

podczas projektowania receptury zączynu. Taki wzrost gęstości przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Gęstość zączynów cementowych z dodatkiem mikrosfery ceramicznej w zależności od ciśnienia (Nelson, 1990)

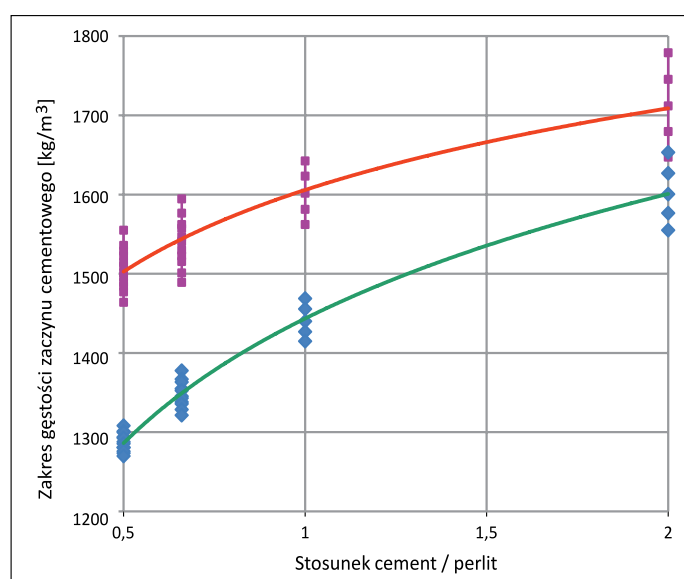
Figure 4. Density of cement slurries with the addition of ceramic microspheres depending on pressure (Nelson, 1990)

Dodatkowo zączyny cementowe z dodatkiem mikrosfery w pewnych okolicznościach pozwalają na wyeliminowanie konieczności cementowania wielostopniowego (Nelson, 1990; Półchłopek, 1993; Kremieniewski, 2020a). Należy jednak mieć na uwadze, że na gęstość zączynu wpływają również inne materiały, dlatego też istotne jest określenie wpływu danego dodatku na parametry technologiczne zączynu. Bardzo dobrym zamiennikiem mikrosfery ceramicznej jest mikrosfera szklana, która charakteryzuje się znacznie wyższą wytrzymałością mechaniczną, co znajduje przełożenie na większy zakres stosowności w aspekcie maksymalnego ciśnienia hydrostatycznego (Falode et al., 2013; Kremieniewski et al., 2017). Mikrosfery te wytrzymują ciśnienia dochodzące do 35 MPa, a odmiany specjalne mogą wytrzymywać nawet 70 MPa (Nelson, 1990). Mikrosfery szklane są jednak znacznie droższe od mikrosfer ceramicznych, dlatego też ich stosowanie uwarunkowane jest specjalnymi wymaganiami cementowania.

Innego rodzaju środkiem stosowanym do redukcji gęstości zączynu jest perlit. Stanowi on głównie kruszone szkło wulkaniczne, które po podgrzaniu do temperatury początkowej fuzji zwiększa swoją objętość (Herianto i Fathaddin, 2005; Stryczek et al., 2009; Uliasz-Misiak i Dubiel, 2015; Kremieniewski i Rzepka, 2017). Zączyn z dodatkiem perlitu może ulegać frakcjonowaniu, dlatego przy projektowaniu receptury należy zastosować od 2% do 4% (bwow¹) bentonitu

¹ bwow (od ang. *by weight of water*) – w stosunku do masy wody

w celu zwiększenia lepkości i wytrzymałości strukturalnej wody zarobowej zaczynu (Peng i Jacobsen, 2013; Jordan et al., 2018; Kremieniewski, 2020c). Mikrostruktura porowa perlitu charakteryzuje się obecnością porów otwartych oraz zamkniętych. Pod wpływem działania ciśnienia hydrostatycznego pory otwarte zostają wypełnione cieczą, a pory zamknięte ulegają destrukcji, w związku z czym gęstość zaczynu pod ciśnieniem atmosferycznym będzie wykazywać niższą wartość niż gęstość pod ciśnieniem w otworze (Nelson, 1990; Bensted, 2004; Kremieniewski, 2019). Zależność wzrostu gęstości wraz ze wzrostem ciśnienia przedstawiono na rysunku 5.



Rysunek 5. Zakres gęstości zaczynu przy różnych proporcjach zawartości cementu do perlitu w mieszaninie. Wyniki otrzymane w warunkach ciśnienia atmosferycznego – zielona linia trendu; wyniki pod ciśnieniem 20 MPa – czerwona linia trendu (Nelson, 1990)

Figure 5. The range of cement slurry density at different proportions of cement to perlite mixtures. Atmospheric pressure results – green trend line; results at 20 MPa pressure – red trend line (Nelson, 1990)

Należy mieć na uwadze, że proces hydratacji cementu jest bardzo skomplikowany i zależy od szeregu parametrów. Dlatego też analiza wpływu danego dodatku na parametry zaczynu powinna być poprzedzona cyklem wielu badań laboratoryjnych, dzięki czemu możliwe jest znaczne ograniczenie lub nawet wyeliminowanie nieprzewidzianych zachowań zaczynu podczas zabiegu cementowania otworu wiertniczego. Tego rodzaju testy przeprowadzone zostały w celu określenia wpływu wybranych dodatków obniżających gęstość zaczynu na zmianę jego parametrów technologicznych, a wybrane wyniki omówiono w dalszej części niniejszej publikacji.

Ponadto artykuł stanowi pewnego rodzaju uzupełnienie luki literaturowej związanej z wpływem materiałów lekkich na parametry zaczynów cementowych (Kremieniewski

i Rzepka, 2017; Kremieniewski, 2020a, 2021; Kremieniewski i Kędzierski, 2020).

Przebieg prac badawczych

Badania mające na celu określenie wpływu wybranych dodatków obniżających gęstość zaczynu na zmianę jego parametrów technologicznych były wykonywane 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*.

Zbadanie wpływu wybranych dodatków obniżających gęstość zaczynu na zmianę jego parametrów technologicznych jest bardzo ważne, ponieważ zaczyny charakteryzujące się obniżoną gęstością sprawiają trudności w odpowiednim doborze parametrów technologicznych – zarówno w fazie płynnej, jak i po związaniu. Wynika to z faktu, że do redukcji gęstości używa się dużych ilości dodatków lekkich. Materiały charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami i tym samym w różny sposób oddziałują na parametry technologiczne zaczynu cementowego. W związku z tym badania laboratoryjne określające wpływ dodatków obniżających gęstość zaczynu na zmianę parametrów zaczynów wykonano, wykorzystując 5 różnych receptur. Pierwsza receptura to zaczyn kontrolny – bez dodatku lekkiego wypełniacza. Badane zaczyny sporządzono na bazie cementu wiertniczego klasy G i zawierały one 3,0% (bwoc²) chlorku wapnia w celu przyspieszenia wiązania. Zawierały również 0,5% (bwoc) środka odpieniającego, 0,3% (bwoc) środka antyfiltracyjnego, a do utrzymania w zawiesinie materiału lekkiego użyto 1,5% (bwow) bentonitu. W celu doszczelnienia matrycy płaszczu cementowego zastosowano 10% (bwoc) mikrocementu, natomiast w recepturach od 2 do 5 użyto dodatkowo 5% (bwoc) lateksu. Dodatkami lekkimi zaczynów o numerach od 2 do 5 były: mikrosfera glinokrzemianowa, mikrosfera CSF K, mikrosfera szklana H5 oraz perlit filtracyjny E100F. Dodatków lekkich użyto do badań w ilości 15% w stosunku do masy cementu. Zaczyny sporządzono na wodzie wodociągowej. Składy i podstawowe wyniki badań zestawiono w tabeli 1.

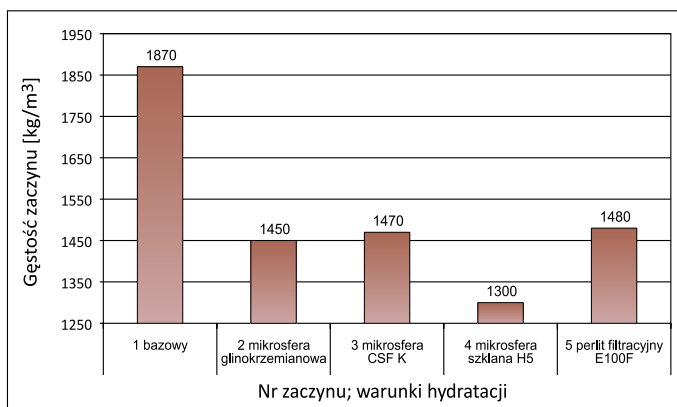
Modyfikacja zaczynu bazowego za pomocą 15-procentowej koncentracji dodatku lekkiego skutkuje dużym obniżeniem gęstości. Na rysunku 6 zestawiono gęstości zaczynów, które zawierają się w zakresie od 1300 kg/m³, po wprowadzeniu

² bwoc (od ang. *by weight of cement*) – w stosunku do masy cementu

Tabela 1. Badania różnego rodzaju dodatków obniżających gęstość zaczynu; składniki stałe: cement CEM G – 100%, bentonit – 1,5% (bwow), środek odpinający – 0,5% (bwoc), środek antyfiltracyjny – 0,3% (bwoc), przyspieszacz wiązania – 3,0% (bwoc), mikrocement – 10,0%

Table 1. Tests on various types of additives that reduce cement slurry density; solids: CEM G cement = 100%, bentonite = 1.5% (bwow), defoamer – 0.5% (bwoc), antifiltration agent – 0.3% (bwoc), setting accelerator – 3.0% (bwoc), microcement – 10.0%

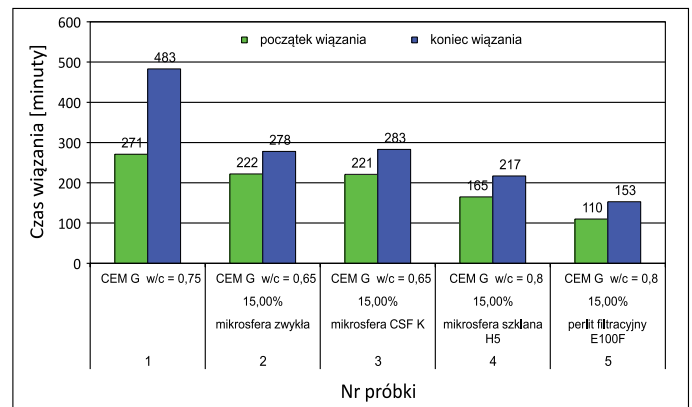
Nr próbki	Współczynnik wodno-cementowy Inne dodatki	Udział cementu [%]	Rodzaj domieszki	Udział domieszki [%]	Czas wiązania		Wytrzymałość na ściskanie (średnia arytmetyczna) 2 dni hydratacji [MPa]
					początek wiązania PW [minuty]	koniec wiązania KW [minuty]	
1	w/c = 0,75 CaCl ₂ 1,5% (bwoc)	100	–	0,0	271	483	19,0
2	w/c = 0,65 Dyspergator 0,2% Lateks 5%	100	mikrosfera zwykła (glinokrzemianowa)	15,0	222	278	8,5
3	w/c = 0,65 Dyspergator 0,3% Lateks 5%	100	mikrosfera CSF K	15,0	221	283	13,2
4	w/c = 0,80 Dyspergator 0,3% Lateks 5%	100	mikrosfera szklana H5	15,0	165	217	7,8
5	w/c = 0,80 Dyspergator 0,3% Lateks 5%	100	perlit filtracyjny E100F	15,0	110	153	8,1



Rysunek 6. Zestawienie gęstości zaczynów cementowych
Figure 6. Summary of cement slurry density

mikrosfery szklanej H5, do wartości 1480 kg/m³, w zaczynie zawierającym perlit filtracyjny E100F. Zaczyn kontrolny bez dodatków lekkich ma gęstość 1870 kg/m³. Najniższa gęstość w zaczynie zawierającym 15% (bwoc) mikrosfery H5 może być wynikiem znacznie większej powierzchni właściwej mikrosfer szklanych niż pozostałych dodatków lekkich.

Na podstawie uzyskanych wyników badań czasu wiązania zaobserwowano, że 15-procentowa koncentracja dodatku materiałów lekkich skutkuje skróceniem zarówno czasu początku wiązania, jak i czasu końca wiązania, co obserwowane jest na rysunku 7. Najbardziej efektywne działanie przyspieszające wiązanie odnotowano po zastosowaniu perlitu filtracyjnego. Początek wiązania uzyskano po 110 minutach, a koniec



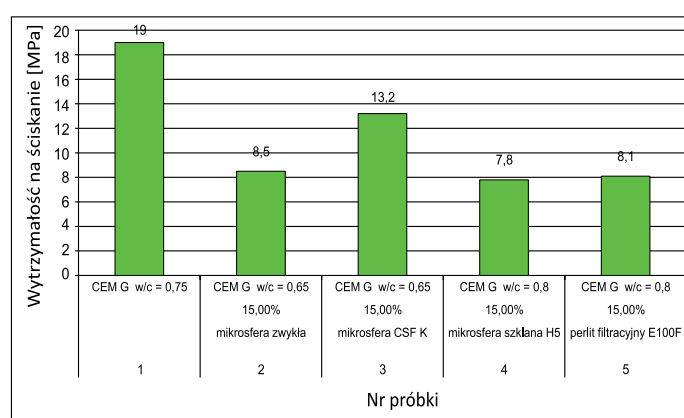
Rysunek 7. Zestawienie czasu początku wiązania i czasu końca wiązania badanych próbek z dodatkami obniżającymi gęstość zaczynu (spoiwo wiążące – cement CEM G, przyspieszacz wiązania 3% CaCl₂)

Figure 7. Comparison of the setting start time and setting end time of the tested samples with additives reducing the slurry density (binding binder – CEM G cement, binding accelerator 3% CaCl₂)

wiązania po czasie 153 minut. Natomiast czas wiązania zaczynu kontrolnego wynosił 271 minut dla początku wiązania oraz 483 minuty dla końca wiązania. Mocne działanie perlitu filtracyjnego na wiązanie zaczynu może wynikać ze wzrostu wodochłonności materiału w trakcie hydratacji cementu. Natomiast analizując wpływ dodatków lekkich na wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach hydratacji, zaobserwowano obniżenie wartości tego parametru (w stosunku do zaczynu kontrolnego – 19 MPa) dla wszystkich dodatków lekkich. Przy

czym najniższe wartości wytrzymałości (7,8 MPa) uzyskano wskutek wprowadzenia do zaczynu 15% (bwoc) mikrosfery szklanej, a najmniejsze obniżenie wytrzymałości – w zaczynie zawierającym 15% (bwoc) dodatku mikrosfery CSF K, dla którego wartość wytrzymałości wynosiła 13,2 MPa (rysunek 8). Obniżenie wartości wytrzymałości w zaczynach z dodatkiem materiału lekkiego może mieć związek ze wzrostem porowatości próbki, co wpływa na parametry mechaniczne stwardniałego zaczynu cementowego.

Pomiaru właściwości reologicznych zaczynów uszczelniających dokonano za pomocą lepkościomierza obrotowego współosiowo-cylindrycznego typu Fann 35 API Viscometer, przy zakresie dwunastu prędkości obrotowych, tzn.: 600,



Rysunek 8. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie dla próbek z dodatkami obniżającymi gęstość zaczynu (cement CEM G)

Figure 8. Comparison of the compressive strength for specimens with additives reducing cement slurry density (CEM G cement)

Tabela 2. Parametry reologiczne zaczynów cementowych

Table 2. Rheological parameters of tested cement slurries

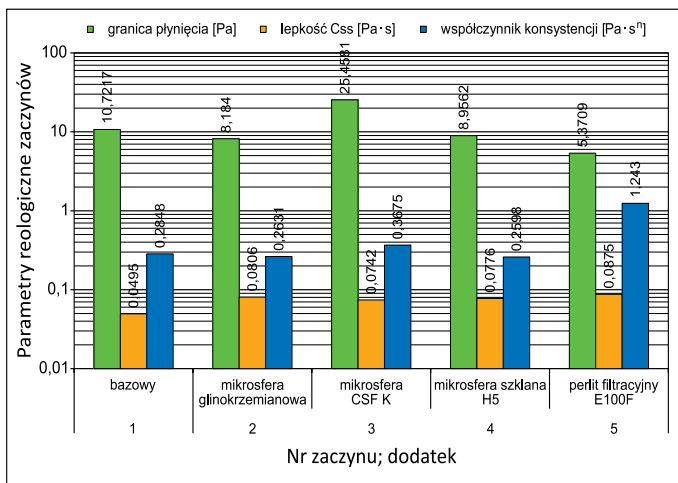
Model reologiczny	Parametry reologiczne	Zaczyn nr				
		1	2	3	4	5
Model Newtona	lepkość dynamiczna [Pa·s]	0,1079	0,1340	0,1901	0,1354	0,1527
	współczynnik korelacji [-]	0,9194	0,9693	0,8748	0,9701	0,9326
Model Binghama	lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0863	0,1170	0,1450	0,1175	0,1262
	granica płynięcia [Pa]	14,2563	11,1819	29,8250	11,9075	14,9329
	współczynnik korelacji [-]	0,9966	0,9945	0,9977	0,9985	0,9857
Model Ostwalda de Waele'a	współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	4,9752	2,8471	11,8934	3,6226	63,6705
	wykładnik potęgowy [-]	0,3888	0,5084	0,3421	0,4688	0,5026
	współczynnik korelacji [-]	0,9337	0,9483	0,9491	0,9833	0,9303
Model Cassona	lepkość Cassona [Pa·s]	0,0495	0,0806	0,0742	0,0776	0,0875
	granica płynięcia [Pa]	7,6720	4,6160	17,9498	5,3621	6,9687
	współczynnik korelacji [-]	0,9989	0,9956	0,9968	0,9987	0,9959
Model Herschela–Bulkleya	granica płynięcia [Pa]	10,7217	8,1840	25,4581	8,9562	5,3709
	współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,2848	0,2631	0,3675	0,2598	1,2430
	wykładnik potęgowy [-]	0,8277	0,8839	0,8668	0,8862	0,6751
	współczynnik korelacji [-]	0,9999	0,9958	0,9995	0,9999	0,9995

300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 (obr/min). Prędkości te odpowiadają szybkościom ścinania ($\dot{\gamma}$) równym (w s^{-1}): 1022; 511,2; 340,8; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 4,11; 3,41; 1,70.

Analizując parametry reologiczne zestawione w tabeli 2 oraz przedstawione na rysunku 9, można zauważyć, że wszystkie zaczyny wykazują najlepszą zgodność z modelem reologicznym Herschela–Bulkleya. Stwierdzono, że najwyższą wartość granicy płynięcia opisywanej modelem Herschela–Bulkleya (25,46 Pa) posiadał zaczyn zawierający mikrosferę CSF K. Natomiast zaczyn z dodatkiem 15% perlitu filtracyjnego charakteryzował się najniższą wartością granicy płynięcia, wynoszącą 5,37 Pa (rysunek 9). Wszystkie zaczyny z dodatkami lekkimi miały wartości lepkości opisywanej modelem Cassona wyższe niż lepkość zaczynu kontrolnego, która wynosiła 0,0495 Pa·s. Porównując wartość współczynnika konsystencji_{HB}³ zaczynów z dodatkami lekkimi z zaczynem kontrolnym, którego lepkość wynosiła 0,2848, stwierdza się, że najwyższą wartość posiadał zaczyn z dodatkiem perlitu filtracyjnego E100F. Może to być wynikiem znacznej wodochłonności dodatku perlitu w zaczynie.

Analizując wpływ badanych dodatków lekkich na parametry mechaniczne stwardniałego zaczynu cementowego (tabela 3) stwierdzono, że 15-procentowa koncentracja lekkich materiałów wypełniających powoduje obniżenie wczesnej wytrzymałości mechanicznej.

³ współczynnik konsystencji HB – współczynnik opisywany modelem Herschela–Bulkleya



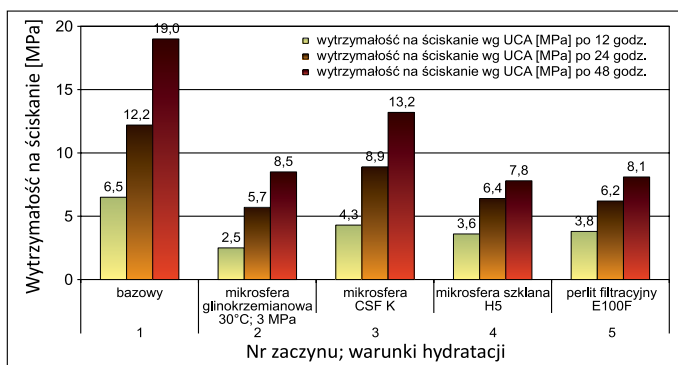
Rysunek 9. Zestawienie wyników badań parametrów reologicznych zmodyfikowanych zaczynów cementowych

Figure 9. Summary of the results of the rheological parameters of modified cement slurries

Tabela 3. Parametry badanych zaczynów cementowych

Table 3. Parameters of cement slurries

Nr zaczynu	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie z Ultrasonic Cement Analyzer po czasie hydratacji [MPa]			Czas osiągnięcia wytrzymałości 3,5 MPa [godz.:min]	Filtracja [cm ³ /30 min]	Czas gęstnienia [godz.:min]	
		12 godz.	24 godz.	48 godz.			30 Bc	100 Bc
1	1870	6,5	12,2	19,0	6:55	68,0	4:25	5:10
2	1450	2,5	5,7	8,5	14:35	175,0	5:05	6:10
3	1470	4,3	8,9	13,2	7:15	186,0	4:45	6:10
4	1300	3,6	6,4	7,8	10:45	245,0	4:20	4:40
5	1480	3,8	6,2	8,1	10:10	228,0	5:15	6:30



Rysunek 10. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie próbek z zaczynów cementowych po 12, 24 oraz 48 godzinach hydratacji – pomiar w Ultrasonic Cement Analyzer

Figure 10. Comparison of compressive strength of cement slurries samples after 12, 24 and 48 hours of hydration – measurement at Ultrasonic Cement Analyzer

Najwyższe wartości odnotowano w przypadku zaczynu kontrolnego, niezawierającego dodatków lekkich. Próbki z tego zaczynu miały wczesną wytrzymałość na ściskanie w zakresie od 6,5 MPa po 12 godzinach hydratacji do 19 MPa po

48 godzinach hydratacji (rysunek 10). Natomiast w analizowanej grupie zaczynów lekkich najwyższe wartości wczesnej wytrzymałości na ściskanie odnotowano w przypadku receptury z dodatkiem mikrosfery CSF K. Uzyskano wytrzymałość 4,3 MPa po 12 godzinach hydratacji i wartość ta wzrastała, dochodząc do 13,2 MPa po 48 godzinach hydratacji próbki stwardniałego zaczynu (rysunek 10).

Podczas analizy wyników wartości filtracji zaczynów stwierdzono, że 15-procentowy dodatek lekkich materiałów wypełniających powoduje niekorzystne działanie objawiające się znacznym wzrostem wartości filtracji. Zaczyn kontrolny bez dodatku lekkiego miał filtrację równą 68 cm³/30 min, natomiast zaczyny lekkie charakteryzowały się wartościami filtracji w zakresie od 175 cm³/30 min (zaczyn nr 2) do 228 cm³/30 min (zaczyn nr 5). Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

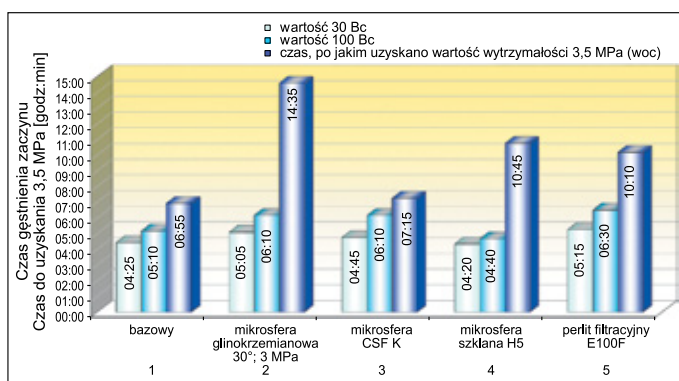
Podczas badania czasu gęstnienia zaczynów w warunkach otworopodobnych zaobserwowano wydłużenie czasu gęstnienia

w zaczynach z dodatkami lekkimi. Jedyne odstępstwo od tej zasady w badanej grupie receptur dotyczyło zaczynu z dodatkiem mikrosfery szklanej H5. W tym przypadku uzyskano skrócenie czasu gęstnienia i wartość 30 Bc⁴ uzyskano po upływie 4 godzin 20 minut (próbka kontrolna – czas 4 godziny 25 minut). Natomiast wartość 100 Bc w zaczynie z dodatkiem mikrosfery szklanej H5 otrzymano po upływie 4 godzin 40 minut (próbka kontrolna – 5 godzin 10 minut). Działanie mikrosfery szklanej H5 skracające czas gęstnienia może być wynikiem znacznie większej powierzchni właściwej tego dodatku, co powoduje przyspieszenie hydratacji zaczynu cementowego. Wyniki zestawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 11.

Istotnym parametrem cechującym zaczyny lekkie jest czas niezbędny do uzyskania wartości 3,5 MPa (wartość woc⁵). W trakcie badania upływu czasu do uzyskania minimalnej

⁴ Bc – jednostka Beardena (bezwymiarowa) – określa możliwości przetłaczania zaczynu podczas badania jego konsystencji w konsystometryze HPHT.

⁵ woc (od ang. *waiting on cement*) – czas niezbędny do uzyskania wartości 3,5 MPa w celu prowadzenia dalszych prac po cementowaniu.



Rysunek 11. Zestawienie wartości czasu gęstnienia zaczynów cementowych oraz czasu do uzyskania przez próbkę wartości 3,5 MPa (woc)

Figure 11. Summary of cement slurry thickening time values and the time until the sample reaches 3.5 MPa (woc)

wartości wytrzymałości mechanicznej równej 3,5 MPa, zaobserwowano, że wszystkie z badanych wypełniaczy lekkich powodują wydłużenie czasu niezbędnego do uzyskania tej wartości. Jednak najslabsze działanie opóźniające w tym zakresie widoczne było w zaczynie z dodatkiem mikrosfery CSF K. Uzyskano czas 7 godzin 15 minut w porównaniu z wartością 6 godzin 55 minut w przypadku próbki kontrolnej (rysunku 11).

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że testowane lekkie dodatki wykazują istotny wpływ na wybrane parametry zaczynu cementowego. Jest to bardzo ważne podczas projektowania zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów w warunkach podwyższonego ryzyka migracji gazu oraz podczas rekonstrukcji odwiertów. Szczególne znaczenie ma tutaj fakt, że podczas projektowania zaczynów o obniżonej gęstości może wystąpić pogorszenie stabilności sedymentacyjnej, której wartość powiązana jest z parametrami reologicznymi. Takie zachowanie zaczynu może skutkować brakiem szczelności otworu oraz migracją gazu. W związku z tym badania wpływu lekkich dodatków na zmianę parametrów technologicznych zaczynu cementowego powinny być prowadzone na bieżąco dla różnej grupy dodatków, co zostało udowodnione w niniejszej publikacji.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prac badawczych określających wpływ wybranych dodatków obniżających gęstość zaczynu na zmianę jego parametrów technologicznych sformułowane zostały następujące konkluzje:

- obecność 15-procentowej koncentracji dodatków lekkich w zaczynie cementowym powoduje skrócenie czasu wiązania w porównaniu z recepturą bazową;

- modyfikacja zaczynu bazowego za pomocą dodatków lekkich skutkuje obniżeniem wartości wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z recepturą kontrolną niezawierającą dodatku lekkiego;
- najmniejsze obniżenie wytrzymałości na ściskanie odnotowano po zastosowaniu 15% dodatku mikrosfery CSF K;
- wprowadzenie do zaczynu 15% dodatku mikrosfery szklanej H5 objawia się największym obniżeniem gęstości – z wartości początkowej równej 1870 kg/m³ dla zaczynu bazowego do wartości 1300 kg/m³;
- wszystkie zaczyny cementowe z dodatkiem lekkich frakcji wykazywały podobieństwo do modelu reologicznego Herschela–Bulkleya;
- zaczyn z dodatkiem 15% perlitu filtracyjnego miał najniższe wartości granicy płynięcia;
- wartości lepkości Cassona były wyższe we wszystkich recepturach zawierających dodatki lekkie w porównaniu z recepturą bez dodatku obniżającego gęstość. Może to być efektem znacznej, 15-procentowej koncentracji dodatku lekkiego, co wpływa na wzrost lepkości zaczynu;
- obecność 15% dodatków lekkich w zaczynach spowodowała obniżenie wartości wczesnej wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbką kontrolną. Jednak najslabsze obniżenie wartości wczesnej wytrzymałości na ściskanie w zaczynach lekkich (receptury 2 do 5) odnotowano w przypadku zaczynu z dodatkiem mikrosfery glinokrzemianowej CSF K;
- dodatek 15% mikrosfery szklanej H5 skutkowało uzyskaniem największej wartości filtracji, która wynosiła 245 cm³/30 min. Taki efekt można tłumaczyć większą ilością wody w zaczynie i brakiem właściwości sorpcyjnych mikrosfery szklanej H5 w porównaniu z zaczynem z perlitem filtracyjnym (nr 5), który posiadał tę samą ilość wody;
- wprowadzenie 15% dodatku mikrosfer szklanych H5 do receptury zaczynu spowodowało skrócenie czasu gęstnienia w stosunku do próbki kontrolnej. Natomiast dodatek 15% perlitu filtracyjnego E100F prowadził do wydłużenia czasu gęstnienia w porównaniu z próbką kontrolną.

Artykuł powstał na podstawie prac badawczych INiG – PIB pt. *Analiza możliwości regulowania współczynnika przewodności cieplnej stwardniałego zaczynu cementowego*; nr zlecenia: 0015/KW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0003/2021, oraz *Analiza możliwości opracowania zaczynów do uszczelniania otworów geotermalnych*; nr zlecenia: 0023/KW/2022, nr archiwalny: DK 4100-0011/2022.

Literatura

- Bensted J., 2004. Cementy wiertnicze. Cz. 2. Stosowanie cementów wiertniczych do cementowania odwiertów. *Cement Wapno Beton*, 2: 61–72.
- Falode O.A., Salam K.K., Arinkoola A.O., Ajagbe B.M., 2013. Prediction of compressive strength of oil field class G cement

- slurry using factorial design. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 3(4): 297–302. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0071-0>
- Herianto A., Fathaddin M.T., 2005. Effects of additives and conditioning time on comprehensive and shear bond strengths of geothermal well cement. *Proceedings of World Geothermal Congress, Antalya, Turkey*: 1–7.
- 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.
- Kremieniewski M., 2019. Receptury zaczynów do uszczelniania kolumn rur posadowionych w otworach wierconych w skałach chłonnych. *Nafta-Gaz*, 75(8): 451–457. DOI: 10.18668/NG.2019.08.01.
- Kremieniewski M., 2020a. Receptura zaczynu lekkiego do uszczelniania otworów w strefie niskich ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 76(9): 577–584. DOI: 10.18668/NG.2020.09.03.
- Kremieniewski M., 2020b. Ultra-Lightweight Cement Slurry to Seal Wellbore of Poor Wellbore Stability. *Energies*, 13(12): 3124. DOI: 10.3390/en13123124.
- Kremieniewski M., 2020c. Zmiana parametrów reologicznych zaczynu lateksowego pod wpływem dodatku mikrosfery. *Nafta-Gaz*, 76(1): 37–45. DOI: 10.18668/NG.2020.01.05.
- Kremieniewski M., 2021. Zaczyny o obniżonej gęstości stosowane w warunkach występowania komplikacji w otworze wiertniczym. *Nafta-Gaz*, 77(11): 736–743. DOI: 10.18668/NG.2021.11.03.
- Kremieniewski M., Kędzierski M., 2020. Wpływ wybranych domieszek obniżających gęstość na parametry zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 76(3): 143–153. DOI: 10.18668/NG.2020.03.01.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2017. Wpływ perlitu pylistego na własności technologiczne zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 73(12): 943–952. DOI: 10.18668/NG.2017.12.05.
- Kremieniewski M., Stryczek S., Wiśniowski R., Rzepka M., Gonet A., 2017. Wpływ dodatku montmorylonitu (bentonitu) na parametry świeżego i stwardniałego zaczynu cementowego. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 34: 323–334.
- Kremieniewski M., Wiśniowski R., Stryczek S., Orłowicz G., 2021. Possibilities of Limiting Migration of Natural Gas in Boreholes in the Context of Laboratory Studies. *Energies*, 14(14): 4251. DOI: 10.3390/en14144251.
- Kurdowski W., 2010. Chemia cementu i betonu. *Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa*.
- 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.
- Pórchlopek 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*.
- Rzepka M., Kremieniewski M., Dębińska E., 2012. Zaczyny cementowe przeznaczone do uszczelniania eksploatacyjnych kolumn rur okładzinowych na Niżu Polskim. *Nafta-Gaz*, 68(8): 512–522.
- Rzepka M., Stryczek S., 2008. Laboratoryjne metody określania parametrów technologicznych świeżych zaczynów uszczelniających przed zabiegiem związanym z procesem uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 25(2): 625–636.
- 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 dobozem zaczynów uszczelniających w warunkach wiercen w basenie pomorskim. *Wydawnictwa AGH, Kraków*.
- Uliasz-Misiak B., Dubiel S., 2015. Problemy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych. *Przegląd Górniczy*, 7: 55–61.
- Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K., 2007. Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 24: 595–607.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- 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
- API SPEC 10 Specification for materials and testing for well cements.



Dr hab. inż. Marcin KREMIEŃIEWSKI
 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