

Zaczyny cementowe od uszczelniania otworów wiertniczych na Niżu Polskim w trudnych warunkach geologiczno-technicznych

Cement slurries for sealing boreholes in the Polish Lowlands in difficult geological and technical conditions

Marcin Rzepka, Miłosz Kędziński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł omawia zagadnienia związane z uszczelnianiem kolumn rur okładzinowych na obszarze Niżu Polskiego. W części wstępnej publikacji omówiono uwarunkowania geologiczno-techniczne panujące podczas wykonywania prac wiertniczych w głębokich otworach Niżu Polskiego oraz trudności jakie mogą wystąpić podczas realizowania wierceń. W części badawczej zaprezentowano wyniki testów receptur zaczynów cementowych prowadzonych w warunkach HPHT. Badania laboratoryjne wykonywano w Zakładzie Technologii Wiercenia w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym. Ramowe składy receptur zaczynów cementowych opracowane zostały w INiG – PIB przy współpracy z Serwisem Cementacyjnym działającym przy firmie Exalo należącej do grupy PGNiG. Testy zaczynów cementowych wykonywane były zgodnie z normami: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja* (PN-EN ISO 10426-1:2009) oraz *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych* (PN-EN ISO 10426-2:2003). Zaczyny cementowe sporządzano na bazie 10% lub 20% solanki NaCl. W testowanych recepturach jako spoiwo wiążące zastosowano cement wiertniczy G HSR o wysokiej odporności na siarczany. Do uszczelniania kolumn rur o średnicy 9 5/8” zaproponowano dwa rodzaje zaczynów: „lekkie” oraz o „normalnej” gęstości, które badano w temperaturze 80°C. Dla kolumny rur o średnicy 7” zamieszczono propozycję ciężkich zaczynów cementowych (o regulowanej gęstości) testowanych w 95°C i 120°C. Z kolei dla kolumn rur o średnicy 5” opracowano receptury o „normalnej” gęstości dla temperatur 130°C i 160°C. Wprowadzenie do zaczynu dodatków obniżających gęstość (w przypadku zaczynu górnego dla rur o średnicy 9 5/8”) pozwoliło na uzyskanie receptur o regulowanej gęstości od około 1500–1650 kg/m³. Z kolei dodatek obciążający (dodawany do receptur proponowanych do uszczelniania rur 7”) pozwolił na opracowanie zaczynów o gęstości w granicach od około 2060 do około 2350 kg/m³. Zastosowanie odpowiednio dobranych opóźniaczy wiązania nowej generacji, umożliwiło sporządzanie receptur dla bardzo wysokich temperatur (do 160°C). Opracowane receptury zaczynów mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych podczas prac prowadzonych na Niżu Polskim w trudnych warunkach geologiczno-technicznych.

Słowa kluczowe: zaczyn cement, kamień cementowy, wysoka temperatura, wysokie ciśnienie, cementowanie.

ABSTRACT: The article discusses issues related to casing pipe columns sealing in the Polish Lowlands. The introductory part of the publication presents geological and technical conditions prevailing during drilling the deep boreholes in the Polish Lowlands and difficulties that may occur during drilling. The authors present the results of cement slurries recipes tests conducted under HPHT conditions. Laboratory tests were carried out at the Drilling Technology Department in Oil and Gas Institute – National Research Institute. Slurry recipes had been developed in the Oil and Gas Institute – NRI in collaboration with the Cementing Service operating at the Exalo company belonging to the PGNiG group. Cement slurry tests were carried out in accordance with the following standards: *Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 1: Specification* (PN-EN ISO 10426-1:2009) and *Petroleum and natural gas industries – Cements and materials for well cementing – Part 2: Testing of well cements* (PN-EN ISO 10426-2:2003). Cement slurries were prepared with 10% or 20% NaCl brine as a base. The G HRS cement with high sulfate resistance was used as a binder. Two types of slurry were proposed for sealing 9 5/8” casing: “lightweight” and “normal” density, which were tested at 80°C. High-density cement slurries (with adjustable density) tested at 95°C and 120°C were proposed for 7” casing column. In turn, for 5” casing column recipes with “normal” density were developed for temperatures of 130°C and 160°C. The application of density-reducing additives to the slurry (in the case of lead cement slurry of 9 5/8” casing) allowed us to obtain formulations with adjustable density from 1500 to 1650 kg/m³. In turn, the weighting material added to the slurries for sealing 7” casings allowed us to

Autor do korespondencji: M. Rzepka, e-mail: marcin.rzepka@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 6.11.2019 r. Zatwierdzono do druku: 27.01.2020 r.

develop slurries with a density ranging from 2060 to 2350 kg/m³. The use of appropriately selected new generation setting retarders made it possible to prepare formulations for very high temperatures (up to 160°C). The developed cement slurry formulations can be used in the process of cementing casing columns in boreholes in the Polish Lowlands in difficult geological and technical conditions.

Key words: cement slurry, set cement, high temperature, high pressure, cementing.

Wprowadzenie

Firmy naftowe w naszym kraju w ostatnich latach coraz częściej wykonują wiercenia otworów, których końcowe głębokości sięgają ponad czterech tysięcy metrów. Dzieje się tak szczególnie na obszarze Niżu Polskiego, gdzie złoża węgłowodorów zalegają przeważnie poniżej 3–3,5 km pod powierzchnią ziemi. Temperatury dynamiczne panujące na dnach tych otworów wynoszą około 120–130°C lub nawet przewyższają te wartości. Według informacji napływających z przemysłu w najbliższych latach planowane są kolejne wiercenia głębokich otworów w tym rejonie (Rzepka et al., 2012; Rzepka i Kremieniewski, 2017).

Jak wiadomo, na dużych głębokościach w otworze wiertniczym panują specyficzne warunki. W zależności od głębokości oraz budowy geologicznej górotworu zmienia się stopień geotermiczny a tym samym temperatura statyczna i dynamiczna (Souza et al., 2012; Salim i Amani, 2013). W różnych utworach geologicznych zmieniają się także gradienty ciśnienia złożowego i szczelinowania. Ciśnienie hydrostatyczne w otworze wiertniczym zależy od wysokości i gęstości cieczy wiertniczej (np. na głębokości około 3000 metrów w przypadku ciężkiego zaczynu cementowego ciśnienie to może wynosić około 70 MPa). Solanki złożowe w dużym stopniu oddziałują na stwardniały zaczyn cementowy (szczególnie agresywne w stosunku do płaszcza cementowego są jony Mg⁺², SO₄⁻², zawarte w wodach złożowych oraz gaz toksyczny – siarkowodór). Dlatego też zaczyny przeznaczone do zatłaczania na dużych głębokościach powinny zawierać w swoim składzie m.in. dodatki i domieszki podnoszące wytrzymałość kamienia cementowego w wysokiej temperaturze oraz poprawiające odporność korozyjną płaszcza cementowego (Rzepka i Stryczek, 2008).

Przy dużych głębokościach otworu poważnym problemem jest zatem zapewnienie długiego czasu przetłaczalności zaczynu cementowego, który powinien charakteryzować się niską lepkością, niewielkim odstożem wody oraz jak najniższą filtracją. Głównym zadaniem stojącym przed projektantem receptur cementowych jest zatem odpowiednie dopasowanie środków opóźniających, upłynniających oraz spoiwa wiążącego, które będą odporne na działanie warunków HPHT oraz dobór innych dodatków i domieszek zapewniających prawidłowe parametry technologiczne zaczynu i kamienia cementowego (Bensted, 1991).

Ogólna charakterystyka warunków panujących podczas prac wiertniczych w głębokich otworach Niżu Polskiego oraz trudności jakie mogą wystąpić podczas wiercenia

Rejon Niżu Polskiego zaliczany jest do obszarów o dużych trudnościach wiertniczych. Wynika to głównie ze skomplikowanej budowy geologicznej obszaru, na którym występują między innymi aktywne czerwone ropy solne, wysokie gradienty ciśnienia złożowego w dolomicie głównym oraz inne możliwe problemy jakie mogą wystąpić podczas prowadzenia prac związanych z głębinieniem otworu (Nalepa, 2001). W tabeli 1 przedstawiono uproszczony profil stratygraficzny przykładowego otworu G-1 o głębokości 3750 metrów

Tabela 1. Przykładowy uproszczony profil stratygraficzny otworu G-1 o głębokości 3750 m (zaznaczono najważniejsze poziomy stratygraficzne – głębokości zalegania podano z dokładnością do 10 metrów)

Table 1. An example of a simplified stratigraphic profile of the G-1 borehole with a depth of 3750 m (the most important stratigraphic levels are marked – the deposition depths are given with an accuracy of 10 meters)

Stratygrafia		Strop warstwy [m]
KENOZOIK		0
MEZOZOIK	KREDA	220
	JURA	880
	TRIAS	1360
	Retyk	1360
	Kajper	1550
	Wapień muszlowy	1880
PALEOZOIK	PERM	2670
	cechsztyn w tym:	2670
	sól najmłodsza	2680
	czerwony il solny	2740
	sól młodsza	2750
	anhydryt główny	2910
	anhydryt podstawowy	3400
	dolomit główny	3410
	sól najstarsza	3480
	anhydryt dolny	3540
	czerwony spągowiec	3590
	Głębokość końcowa	3750

zlokalizowanego na złożu węglowodorów w okolicy Międzychodu. Schemat zarurowania tego otworu zamieszczono w tabeli 2, natomiast zastawienie gradientów ciśnień (warunkujących między innymi gęstości używanych płynów wiertniczych) w tabeli 3. Kolumna rur 18 $\frac{5}{8}$ ” zapuszczana jest do głębokości 40 m. Następnie, w warstwach kredy, zapuszczana i cementowana jest kolumna rur 13 $\frac{3}{8}$ ”. Rury okładzinowe o średnicy 9 $\frac{5}{8}$ ” – posadowiane i uszczelniane są w warstwach soli najmłodszej, rury 7” – w anhydrycie dolnym, a rury 5” – w warstwach czerwonego spągowca. Temperatura dynamiczna panująca na dnie otworu wynosi około 135°C. W tabeli 4 zestawiono przewidywane występowanie węglowodorów (możliwe przyływy gazu) i wód złożowych (solanek) oraz trudności jakie mogą wystąpić w czasie wiercenia, tj.: sypanie, zaniki płuczki, kawernowanie ścian otworu, dopływy H₂S, zagrożenie erupcyjne i in. (Herman i Migdał, 1998; Stryczek i Gonet, 2001).

Tabela 2. Schematy zarurowania i cementowania otworu
Table 2. Schemes of borehole casing and cementing

Zarurowanie	Interwał [m]	Uwagi odnośnie do cementowania rur
18 $\frac{5}{8}$ ”	0–40	rury cementowane do wierzchu (c.d.w.)
13 $\frac{3}{8}$ ”	0–270	rury cementowane do wierzchu (c.d.w.)
9 $\frac{5}{8}$ ”	0–2710	rury cementowane do wierzchu (c.d.w.)
Liner 7”	2560–3585	liner cementowany na całej długości
Liner 5”	3350–3750	liner cementowany na całej długości

Tabela 3. Przybliżone gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania występujące w profilu otworu

Table 3. Approximate formation pressure and fracture gradient occurring in the well profile

Poziom stratygraficzny	Gradient ciśnienia złożowego	Gradient ciśnienia szczelinowania
	[MPa/m]	
Kenozoik	0,0098	0,0127
Kreda i jura	0,0102	0,0130
Trias	0,0106	0,0147
Wapień muszlowy	0,0108	0,0150
Cechsztyń – dolomit główny	0,014–0,018	0,020–0,023
Czerwony spągowiec	0,0110	0,0150

Tabela 4. Przewidywane występowanie węglowodorów i wód złożowych oraz trudności jakie mogą wystąpić w czasie wiercenia

Table 4. The expected presence of hydrocarbons and formation water and problems that can occur during a drilling operation

Poziom stratygraficzny	Przewidywane występowanie horyzontów wodonośnych i złóż węglowodorów oraz przewidywane trudności podczas wiercenia
Kenozoik	Możliwe występowanie wód słodkich. Możliwe sypanie i kawernowanie ścian otworu
Kreda i jura	Spodziewane horyzonty wód zmineralizowanych lub solanek złożowych. Możliwe zaniki płuczki, sypanie i kawernowanie ścian otworu
Trias	Możliwe występowanie solanek złożowych. Możliwe sypanie ścian otworu, przyływy solanki lub zaniki płuczki (głównie w utworach retyku i kajpru)
Cechsztyń	W poziomie dolomitu głównego możliwy przyływ węglowodorów i solanki ze znaczną zawartością H ₂ S W dolomicie głównym klasa zagrożenia erupcyjnego – A, kategoria zagrożenia H ₂ S – III W osadach cechsztyńskich możliwość zaciskania ścian otworu przez plastyczne czerwone ility solne
Czerwony spągowiec	Możliwy przyływ gazu ziemnego W utworach czerwonego spągowca klasa zagrożenia erupcyjnego – B

Środki modyfikujące stosowane w zaczynach cementowych używanych podczas uszczelniania głębokich otworów wiertniczych na Niżu Polskim

Uszczelnianie głębokich otworów wiertniczych zwłaszcza w końcowych interwałach wiąże się z koniecznością opracowania odpowiednich receptur zaczynów cementowych, odpornych na wysoką temperaturę i ciśnienie (Nelson, 1990). Dodatkowo w rejonie Niżu Polskiego niezbędne jest utrzymanie zasolenia zaczynu w ilości od 10% do 20% NaCl w zależności od potrzeb. Poza tym, podczas projektowania receptury, opracowany zaczyn i powstały z niego kamień powinien być

najdłużej trwały w warunkach działania zmineralizowanych wód złożowych o dużej zawartości jonów agresywnych czy też siarkowodoru (tj. jak najwolniej ulegać korozji). Dlatego niezbędne jest zastosowanie do zaczynów uszczelniających wielu dodatków i domieszek modyfikujących recepturę cementową (Gonet et al., 2004; Anjos et al., 2013). Należą do nich między innymi:

- odpieniacze, które redukują ilość powietrza zawartego w zaczynie cementowym;
- upłynniacze (plastyfikatory), które obniżają lepkość zaczynu i regulują jego parametry reologiczno-strukturalne;
- środki antyfiltracyjne i redukujące odstój wody, które

zabezpieczają przed utratą wody z zaczynu oraz sedymentacją fazy stałej;

- opóźniacze czasu gęstnienia i wiązania, które pozwolą bezpiecznie przepompować zaczyn cementowy do uszczelnianej przestrzeni pierścieniowej;
- dodatki zapobiegające migracji gazu (np. lateksy) poprawiające jednocześnie szczelność matrycy cementowej i jej odporność na korozję;
- krzemionka (mikrosilica), wprowadzana do receptury w celu podniesienia odporności termicznej kamienia cementowego.

Szczególne znaczenie odgrywają tu tzw. opóźniacze czasu wiązania zaczynu, które w wysokich temperaturach pozwalają wydłużyć proces hydratacji i utrzymać tłoczony zaczyn w stanie płynnym przez cały okres czasu, w którym następuje proces cementowania.

W literaturze (Dębińska, 2012; Boul at al., 2016) podaje się kilka teorii wyjaśniających mechanizm działania opóźniaczy. Są to teorie:

- adsorpcji – w której opóźnienie wiązania zaczynu związane jest z adsorpcją opóźniacza na powierzchni produktów hydratacji, a co się z tym wiąże utrudnionym kontakcie ziaren cementu z wodą;
- wytrącania – opóźniacz reaguje z cementem w fazie wodnej tworząc przez pewien czas nierozpuszczalną i nieprzepuszczalną warstwę wokół ziaren cementu;
- krystalizacji – opóźniacz adsorbując się na kryształach produktów hydratacji i opóźnia bądź niszczy ich dalszy wzrost,

W praktyce wszystkie wymienione czynniki mogą się ze sobą łączyć, dając ogólny efekt w postaci spowolnionego procesu hydratacji zaczynu w warunkach HPHT.

Do stosowanych obecnie na świecie środków opóźniających można zaliczyć między innymi: lignosulfoniany, kwasy hydrokarboksyłowe, pochodne celulozy, fosforany czy też używane ostatnio nowoczesne komponenty nieorganiczne o zastrzeżonym przez producentów składzie.

Najczęściej stosowanymi w zaczynach cementowych środkami opóźniającymi są sole wapnia i sodu kwasów lingosulfonowych. Związki lingosulfonowe powstają jako produkt uboczny przy produkcji celulozy. Są one bardzo efektywne w stosunku do większości grup cementów, a ich koncentracja waha się od około 0,05% do 1,5% bwoc (tj. w stosunku do masy suchego cementu).

Badania laboratoryjne zaczynów i kamieni cementowych proponowanych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach na Niżu Polskim

Badania laboratoryjne dla zaczynów cementowych przeznaczonych do głębokich otworów wiertniczych wykonywane były zgodnie z normami: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 1: Specyfikacja* (PN-EN ISO 10426-1:2009) oraz *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych* (PN-EN ISO 10426-2:2003). W badanych zaczynach cementowych jako spoiwo wiążące zastosowano cement wiertniczy G HSR (o wysokiej odporności na siarczany). Skład cementu podano w tabeli 5. Użyty w badaniach cement spełniał wszystkie wymagania obowiązującej normy i był wykorzystywany tak w badaniach prowadzonych w INiG – PIB, jak i w serwisach wykonujących zabiegi cementowania rur okładzinowych w Polsce.

Zastosowanie cementu G HSR na Niżu Polskim jest podyktowane występowaniem znacznych ilości siarkowodoru w gazie ziemnym. Przykładowe stężenia H₂S w wybranych odwiertach przedstawiono w tabeli 6. Jak wynika z tych danych stężenie siarkowodoru w gazie ziemnym wynosi od kilku do kilkunastu procent objętości gazu ziemnego (z reguły jednak jest to kilka procent).

Tabela 5. Wymagany skład chemiczny cementu wiertniczego klasy G HSR odpornego na działanie siarczanów (według normy PN-EN ISO 10426-1:2009)

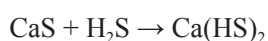
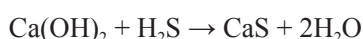
Table 5. Required chemical composition of well cement class G (HSR) high sulfate-resistant (according to PN-EN ISO 10426-1:2009)

CEMENT WIERTNICZY klasy G – gatunek wysokoodporny na działanie siarczanów (HSR)	
Składnik cementu G HSR	(PN-EN ISO 10426-1:2009)
Tlenek magnezu (MgO), co najwyżej, procent	6,0
Trójtlenek siarki (SO ₃), co najwyżej, procent	3,0
Strata prażenia, co najwyżej, procent	3,0
Pozostałość nierozpuszczalna, co najwyżej, procent	0,75
Krzemian trójwapniowy (C ₃ S) co najmniej – co najwyżej, (od – do), procent	48–65
Glinian trójwapniowy (C ₃ A), co najwyżej, procent	3
Glińnożelazian czterowapniowy (C ₄ AF) plus dwa razy glinian trójwapniowy (C ₃ A), co najwyżej, procent	24
Ogólna zawartość alkaliów wyrażona jako równoważnik tlenku sodu (Na ₂ O), co najwyżej, procent	0,75

Tabela 6. Zestawienie zawartości H₂S w składzie gazu ziemnego na w wybranych otworach na Niziu Polskim
Table 6. List of H₂S content in the natural gas composition in selected wells in the Polish Lowlands

Symbol odwiertu na Niziu Polskim	Zawartość procentowa H ₂ S w składzie gazu ziemnego	Symbol odwiertu na Niziu Polskim	Zawartość procentowa H ₂ S w składzie gazu ziemnego
	H ₂ S [%]		H ₂ S [%]
L-4	7,39	S-G 2 K	13,32
G-2	4,58	B-6	14,82
S-G 1	8,00	B-9	11,09

Destrukcyjne oddziaływanie siarkowodoru na stwardniały zaczyn cementowy polega na wywołaniu reakcji korozji kwasowej, opisaney w następujący sposób:



Powolny rozpad kamienia zachodzi na skutek eliminowania ze stwardniałego zaczynu cementowego wodorotlenku wapniowego (portlandytu). Po usunięciu lub zmniejszeniu koncentracji Ca(OH)₂ dochodzi do rozkładów uwodnionych krzemianów i glinianów wapniowych (Brylicki, 2001). Powstały w wyniku reakcji chemicznej wodorosiarczki wapnia, znajdujący się w stwardniałym zaczynie, jest dobrze rozpuszczalny w wodzie i może być łatwo wypłukany z matrycy cementowej. Korozja wywołana działaniem H₂S jest procesem dyfuzyjnym. Decydującą rolę odgrywa w niej dyfuzja kationów wodorowych i anionów reszty kwasowej w głąb matrycy stwardniałego zaczynu cementowego. Kamień cementowy sporządzony z cementu nieodpornego na H₂S posiada wysoką podatność na korozję i może ulegać szybkiej destrukcji. Rysunek 1 (belka stwardniałego zaczynu w nieosłoniętej przestrzeni) i rysunek 2 (kamień cementowy wypełniający przestrzeń międzyrurową) obrazują wygląd próbek stwardniałych zaczynów cementowych testowanych w INiG – PIB na bazie cementu o małej odporności na korozję siarczanową po 36 miesiącach ekspozycji. Kamień cementowy „nieosłonięty” widoczny na rysunku 1 skorodował bardzo wyraźnie. Próbkę uległa praktycznie całkowitemu rozpadowi. Kamień cementowy wypełniający przestrzeń międzyrurową (rys. 2) wolniej ulegał korozji (oznaki destrukcji widoczne są jedynie w strefie bezpośredniego kontaktu z solanką nasyconą H₂S). Próbkę „nieosłoniętą” ekspozycjonowaną 36 miesięcy i sporządzoną z cementu o podwyższonej odporności na siarczany, tj. cementu G HSR zamieszczono na rysunku 3. Próbkę ta wykazywała minimalne oznaki destrukcji (znacznie mniejsze jak w przypadku próbki z rysunku 1), a jej wytrzymałość na ściskanie była około dziesięciokrotnie wyższa niż analogicznej próbki sporządzonej z cementu nieodpornego na siarczany.



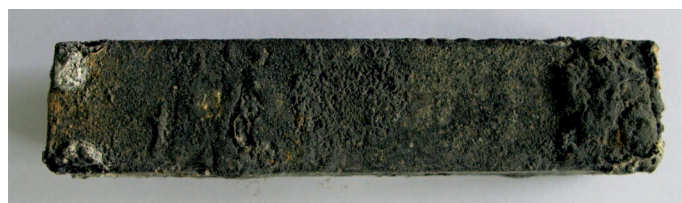
Rys. 1. Wygląd próbki stwardniałego zaczynu cementowego nieodpornego na H₂S, deponowanego w wodzie złożowej nasyconej siarkowodorem (wytrzymałość na ściskanie około 1,5–2 MPa)

Fig. 1. Sample of set cement not resistant to H₂S, deposited in formation water saturated with hydrogen sulfide (compressive strength 1.5–2.0 MPa)



Rys. 2. Wygląd stwardniałego zaczynu cementowego, wypełniającego przestrzeń pierścieniową pomiędzy dwoma stalowymi rurami. Próbkę deponowaną w wodzie złożowej nasyconej siarkowodorem

Fig. 2. Set cement filling the annular space between two steel pipes. The sample was deposited in formation water saturated with hydrogen sulfide



Rys. 3. Wygląd próbki stwardniałego zaczynu cementowego o podwyższonej odporności na H₂S, Próbkę deponowaną w wodzie złożowej nasyconej siarkowodorem (wytrzymałość na ściskanie 16,3 MPa)

Fig. 3. Sample of set cement with increased resistance to H₂S. The sample was deposited in formation water saturated with hydrogen sulfide (compressive strength 16.3 MPa)

Receptury zaczynów proponowane do uszczelniania poszczególnych kolumn rur okładzinowych

Ramowe składy receptur zaczynów cementowych opracowane zostały w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym przy współpracy z Serwisami Cementacyjnymi działającym przy firmie Exalo należącej do grupy PGNiG.

Uwaga:

Podano orientacyjne przedziały głębokości zapuszczania poszczególnych rur okładzinowych podczas wykonywania prac wiertniczych na Niżu Polskim. Jako zaczyny lekkie traktowano te receptury, których gęstości były mniejsze od 1700 kg/m^3 . Zaczyny o ciężarze około $1800\text{--}1900 \text{ kg/m}^3$ określano mianem receptur o „normalnej” gęstości. Zaczyny o ciężarze ponad 2000 kg/m^3 traktowano jako ciężkie.

Receptury zaczynów do uszczelniania rur okładzinowych o średnicach 18” oraz 13” (w głębokości od kilkudziesięciu do kilkuset metrów)

Receptury zaczynów do uszczelniania początkowych kolumn rur okładzinowych, tj. 18” czy 13” nie są skomplikowane, a ich przygotowanie nie sprawia znaczących problemów. Są to zwykle zaczyny o niedużej liczbie składników na bazie cementu portlandzkiego zarabiane wodą słodką z dodatkiem przyspieszacza wiązania i upłynniacza oraz ewentualnie niewielkich ilości innych dodatków modyfikujących. W przypadku konieczności zastosowania dwóch partii zaczynów do górnego (lżejszego) wprowadza się bentonit i mikrosfery w zależności od potrzeb. Jeśli chodzi o ich ewentualną modyfikację możliwe jest dodatkowe wprowadzenie 10–20% mikrocementu w celu poprawy ich wytrzymałości mechanicznej (choć w praktyce nie jest to niezbędne). Zaczyny takie o gęstości około $1500\text{--}1650 \text{ kg/m}^3$ (górnym) i około $1800\text{--}1850 \text{ kg/m}^3$ (dolnym) badane w Laboratorium INiG – PiB posiadały bardzo dobre parametry technologiczne, zerowe odstoje wody i odpowiednio czasy wiązania.

Receptury zaczynów do uszczelniania technicznych kolumn rur okładzinowych o średnicy 9” – posadawianych w soli najmłodszej (w głębokości około 2300–2900 metrów)

Do uszczelniania kolumn rur technicznych 9” stosuje się najczęściej dwie partie zaczynów cementowych: górne (lekkie) oraz dolne (o „normalnej” gęstości). W INiG – PiB wykonano badania szeregu tych zaczynów w temperaturze 80°C zarabianych 20% solanką NaCl na bazie cementu G HSR. W skład zaczynów wchodziły dodatki odpieniające, upłynniające, antyfiltracyjne oraz opóźniacze wiązania. Zaczyny zawierały także mikrocement. W tablicy 7 oraz 8 zamieszczono przykładowe receptury oraz uzyskane wyniki badań. Zaczyny oznaczane symbolami A oraz B (tzw. górne) cechowały się obniżoną gęstością (wynoszącą odpowiednio 1530 i 1620 kg/m^3), którą uzyskano stosując zwiększony współczynnik wodno-cementowy oraz dodatki bentonitu i mikrosfer. Zaczyny C oraz D (tzw. dolne) posiadały „normalną” gęstość (wynoszącą 1820 i 1850 kg/m^3). Wszystkie badane zaczyny nie posiadały odstoju wody i cechowały się odpowiednimi parametrami reologicznymi. Czasy

gęstnienia zaczynów opracowano w ten sposób, aby możliwe było bezpieczne zatłoczenie ich do przestrzeni pierścieniowej (początki gęstnienia 30 Bc wynosiły w zależności od receptury około 5–5½ godziny). Filtracje zaczynów nie przekraczały $200 \text{ cm}^3/30$ minut. Wytrzymałości na ściskanie kamieni cementowych powstałych z badanych receptur zamieszczono na rysunku 4. Zaczyny lekkie w okresie od 2 do 7 dni posiadały wytrzymałość na ściskanie wynoszące około 14–17 MPa. W tym samym okresie czasu wytrzymałość zaczynów o „normalnej” gęstości wynosiła około 20–24 MPa.

Receptury zaczynów do uszczelniania rur okładzinowych o średnicy 7 cali (liner 7”) – posadawianych w anhidrycie dolnym (w głębokości około 3100–3700 metrów)

Uszczelnianie rur 7” odbywa się przy użyciu ciężkich zaczynów cementowych z uwagi na podwyższone wartości gradientów ciśnienia złożowego. W INiG – PiB opracowano szereg receptur obciążonych zaczynów o gęstości od około $2000\text{--}2400 \text{ kg/m}^3$. Zaczyny te badano w temperaturach od około 90°C do około 120°C . Zaczyny zarabiane były 10% solanką NaCl. Sporządzano je na bazie cementu wiertniczego G HSR. Do receptur wprowadzano między innymi lateks (około 20%) a także dodatki odpieniające, upłynniające, obniżające filtrację oraz opóźniające wiązanie. Przykładowe składy receptur i uzyskane wyniki dla czterech zaczynów oznaczonych symbolami E, F, G i H zamieszczono w tabeli 9 i 10. W celu uzyskania wymaganej gęstości do zaczynów wprowadzano od 30% do 110% (bwoc – w stosunku do masy suchego cementu) materiału obciążającego. Poprawę wytrzymałości mechanicznej w wysokiej temperaturze uzyskiwano dzięki dodaniu do składów mączki krzemionkowej. Zaczyny uszeregowano w kolejności rosnącej gęstości od 2060 kg/m^3 (zaczyn najlżejszy – E) do 2350 kg/m^3 (zaczyn najcięższy – H). Odstoje wody z badanych zaczynów były zerowe. Zaczyny posiadały lepkości plastyczne o około 115 do $220 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (w zależności od ilości dodawanego środka obciążającego). Czasy początku gęstnienia (30 Bc) badanych zaczynów wynosiły od około 3½ do 4½ godziny natomiast ich filtracje nie przekraczały $50 \text{ cm}^3/30$ minut. Na rysunku 5 zamieszczono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie omawianych próbek (w okresie od 2 do 7 dni ich wytrzymałość na ściskanie wynosiła około 23–28 MPa).

Receptury zaczynów do uszczelniania rur okładzinowych 5 cali (liner 5”) – posadawianych w warstwach czerwonego spągowca (w głębokości około 3400–3900 metrów)

W niektórych przypadkach, po przewierceniu cechsztynu, w projekcie otworu przewidziane jest zapuszczanie i cementowanie kolejnej kolumny rur (linera 5”) w stropie czerwonego spągowca. Gradienty ciśnienia złożowego są tam

Tabela 7. Składy zaczynów cementowych dla kolumn rur technicznych (temperatura badania 80°C – rury 9^{5/8}"**Table 7.** Compositions of cement slurries for 9^{5/8}" intermediate casing tested at 80°C

Symbol zaczynu temperatura i ciśnienie/ Składniki w [%] bwoc*	Zaczyn A (80°C/40 MPa)	Zaczyn B (80°C/40 MPa)	Zaczyn C (80°C/40 MPa)	Zaczyn D (80°C/40 MPa)
Woda wodociągowa (w/c)**	0,9	0,75	0,55	0,53
Bentonit	1,5	1,0	–	–
Dodatek odpieniający (I) lub (II)	0,3 (I)	0,3 (I)	0,4 (II)	0,4 (II)
Dodatek upłynniający (I) lub (II)	0,2 (I)	0,2 (I)	0,2 (II)	0,5 (II)
Dodatek antyfiltracyjny (I) polimer na wysokie temperatury (II)	0,6 (I)	0,6 (I)	0,6 (II)	0,5 (II)
Opóźniacz czasu gęstnienia (I) lub (II)	0,5 (I)	0,5 (I)	0,4 (II)	0,4 (II)
NaCl***	20	20	20	20
Mikrocement (drobno mielony cement)	10	10	5	10
Mikrosfery (obniżające gęstość zaczynu)	10	5	–	–
Cement wiertniczy G HSR	100	100	100	100

* bwoc: tj. w stosunku do masy suchego cementu

** w/c – stosunek wody (wyrażony w litrach) do masy suchego cementu (wyrażonej w kilogramach)

*** NaCl dodawany był w stosunku do masy wody zarobowej (bwow)

Tabela 8. Parametry technologiczne zaczynów cementowych dla kolumn rur technicznych (temperatura badania 80°C – rury 9^{5/8}"**Table 8.** Parameters of cement slurries for 9^{5/8}" intermediate casing tested at 80°C

Symbol zaczynu, temperatura i ciśnienie/ Oznaczany parametr	Zaczyn A (80°C/40 MPa)	Zaczyn B (80°C/40 MPa)	Zaczyn C (80°C/40 MPa)	Zaczyn D (80°C/40 MPa)
Gęstość zaczynu [kg/m ³]	1530	1620	1820	1850
Odstój wody z zaczynu mierzony pod kątem 90° [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Lepkość plastyczna zaczynu [mPa · s]	33,0	40,5	76,5	88,5
Granica płynięcia zaczynu [Pa]	7,7	6,5	18,5	20,4
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 30 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	5:23	5:34	5:15	5:10
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 100 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	5:50	6:08	5:42	5:38
Filtracja zaczynu cementowego [cm ³ /30 minut]	192	188	160	174

Tabela 9. Składy obciążonych zaczynów cementowo-lateksowych dla kolumn rur eksploatacyjnych (temperatury badania 90°C i 120°C – rury 7")**Table 9.** Compositions of heavyweight latex cement slurries for 7" production casing tested at 90° and 120°C

Symbol zaczynu temperatura i ciśnienie/ Składniki w [%] bwoc	Zaczyn E (90°C/60 MPa)	Zaczyn F (90°C/60 MPa)	Zaczyn G (120°C/70 MPa)	Zaczyn H (120°C/70 MPa)
Woda wodociągowa (w/c)	0,34	0,40	w/c = 0,38	w/c = 0,42
Dodatek odpieniający (I) lub (II)	0,5 (I)	0,5 (I)	0,3 (II)	0,3 (II)
Dodatek upłynniający (I) lub (II)	0,5 (I)	0,5 (I)	0,4 (II)	0,4 (II)
Dodatek antyfiltracyjny (I) lub (II)	0,15 (I)	0,3 (I)	0,2 (II)	0,2 (II)
Opóźniacz czasu gęstnienia (I) lub (II)	0,2 (I)	0,2 (I)	0,4 (II)	0,45 (II)
NaCl (bwow)	10	10	10	10
Lateks zagraniczny (odporny na wysokie temperatury)	20	20	20	20
Materiał obciążający (podnoszący gęstość zaczynu cementowego)	30	60	70	110
Mączka krzemionkowa	10	35	10	10
Cement wiertniczy G HSR	100	100	100	100

Tabela 10. Parametry technologiczne obciążonych zaczynów cementowo-lateksowych dla kolumn rur eksploatacyjnych (temperatury badania 90°C i 120°C – rury 7")

Table 10. Parameters of heavyweight latex cement slurries for 7" production casing tested at 90° and 120°C

Symbol zaczynu, temperatura i ciśnienie/ Oznaczany parametr	Zaczyn E (90°C/60 MPa)	Zaczyn F (90°C/60 MPa)	Zaczyn G (120°C/70 MPa)	Zaczyn H (120°C/70 MPa)
Gęstość zaczynu [kg/m ³]	2060	2180	2200	2350
Odstój wody z zaczynu mierzony pod kątem 90° [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Lepkość plastyczna zaczynu [mPa · s]	115,5	189,0	198,0	223,5
Granica płynięcia zaczynu [Pa]	15,1	17,8	12,8	23,7
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 30 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	3:30	3:01	3:52	4:18
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 100 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	3:43	3:13	4:20	4:40
Filtracja zaczynu cementowego [cm ³ /30 minut]	46	40	44	42

Tabela 11. Składy zaczynów cementowo-lateksowych dla kolumn rur eksploatacyjnych (temperatury badania 130°C i 160°C – rury 5")

Table 11. Compositions of latex cement slurries for 5" production casing tested at 130° and 160°C

Symbol zaczynu temperatura i ciśnienie/ Składniki w [%] bwoc	Zaczyn J (130°C/70 MPa)	Zaczyn K (130°C/70 MPa)	Zaczyn L (160°C/70 MPa)	Zaczyn M (160°C/70 MPa)
Woda wodociągowa (w/c)	0,54	0,54	0,50	0,50
Dodatek odpieniający (I) lub (II)	0,3 (I)	0,3 (I)	0,5 (II)	0,5 (II)
Dodatek upłynniający (I) lub (II)	0,3 (I)	0,3 (I)	1,5 (II)	1,5 (II)
Dodatek antyfiltracyjny (I) lub polimer na wysokie temperatury (II)	0,2 (I)	0,2 (I)	1,2 (II)	1,2 (II)
Opóźniacz czasu gęstnienia (I) lub (II)	0,45 (I)	0,55 (I)	1,0 (II)	1,2 (II)
NaCl (bwow)	10	10	10	10
Mączka krzemionkowa	15	15	10	10
Cement wiertniczy G HSR	100	100	100	100

Tabela 12. Parametry technologiczne zaczynów cementowo-lateksowych dla kolumn rur eksploatacyjnych (temperatury badania 130°C i 160°C – rury 5")

Table 12. Parameters of latex cement slurries for 5" production casing tested at 130° and 160°C

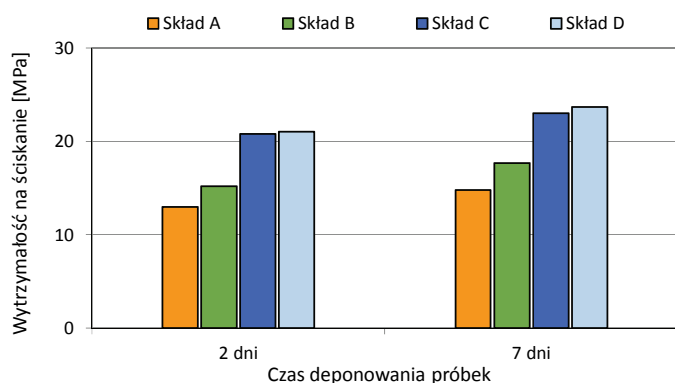
Symbol zaczynu, temperatura i ciśnienie/ Oznaczany parametr	Zaczyn J (130°C/70 MPa)	Zaczyn K (130°C/70 MPa)	Zaczyn L (160°C/70 MPa)	Zaczyn M (160°C/70 MPa)
Gęstość zaczynu [kg/m ³]	1870	1870	1910	1910
Odstój wody z zaczynu mierzony pod kątem 90° [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Lepkość plastyczna zaczynu [mPa · s]	91,5	93,0	123,0	129
Granica płynięcia zaczynu [Pa]	13,7	19,2	5,8	7,2
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 30 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	4:10	5:14	5:58	7:07
Czas uzyskania przez zaczyn konsystencji 100 Bc w warunkach HPHT [godziny:minuty]	4:25	5:27	6:11	7:19
Filtracja zaczynu cementowego [cm ³ /30 minut]	72	74	nie badano	nie badano

znacznie niższe niż w dolomicie głównym cechsztynu i z tego powodu wymagane jest stosowanie zaczynów o gęstości około 1850–1900 kg/m³, tj. bez udziału środków obciążających. Z uwagi na głębokie zaleganie warstw temperatura na dnie otworu może sięgać 120–130°C, a nawet więcej. Opracowane

w INiG – PIB receptury pozwalają na sprawne przeprowadzenie zabiegu uszczelniania linera 5". W tabeli 11 i 12 zaproponowano cztery receptury oznaczone symbolami: J, K, L oraz M (dwie pierwsze receptury badano w 130°C, a dwie kolejne w 160°C). Zaczyny sporządzano na 10% solance

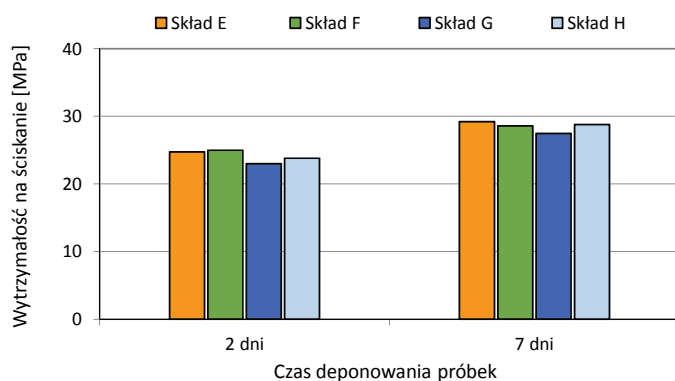
NaCl na bazie cementu G HSR. W skład zaczynów wchodziły dodatki odpieniające, upłynniające, antyfiltracyjne oraz opóźniacze wiązania, a także mączka krzemionkowa podnosząca wytrzymałość mechaniczną. Zaczyny cechowały się gęstością od około 1870 do około 1910 kg/m³ i zerowym odstożem wody. Ich lepkości wynosiły od około 90 mPa · s

do około 130 mPa · s. Czasy początku gęstnienia (30 Bc) zaczynów J i K (badanych w 130°C) były równe około 4½–5½ godziny, a zaczynów L i M około 6–7 godzin. Parametry mechaniczne kamieni cementowych powstałych z badanych receptur zamieszczono na rysunku 6. Wartości wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach osiągały wartości około 30 MPa, a po 7 dniach około 33–35 MPa.



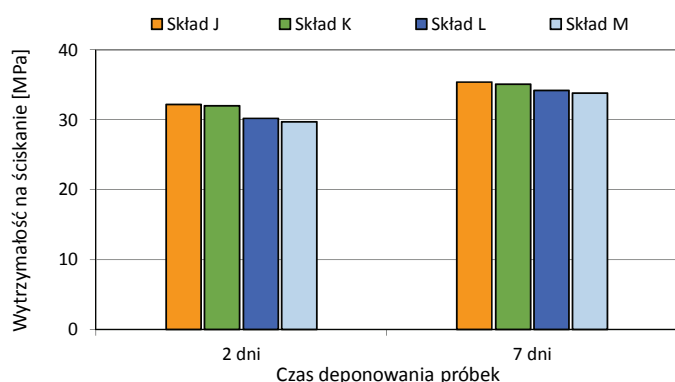
Rys. 4. Wytrzymałości na ściskanie po 2 i 7 dniach dla próbek A, B, C oraz D badanych w temperaturze 80°C

Fig. 4. Compressive strength after 2 and 7 days for samples A, B, C and D tested at 80°C



Rys. 5. Wytrzymałości na ściskanie po 2 i 7 dniach dla próbek E, F, G oraz H badanych w temperaturze 90°C i 120°C

Fig. 5. Compressive strength after 2 and 7 days for samples E, F, G and H tested at 90°C and 120°C



Rys. 6. Wytrzymałości na ściskanie po 2 i 7 dniach dla próbek J, K, L oraz M badanych w temperaturze 130°C i 160°C

Fig. 6. Compressive strength after 2 and 7 days for samples J, K, L and M tested at 130°C and 160°C

Podsumowanie

Na podstawie badań laboratoryjnych w INiG – PIB opracowane zostały receptury zaczynów cementowych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych o średnicach 9½”, 7” oraz 5” na obszarze Niżu Polskiego. Sporządzane zaczyny zarobiane były 10% lub 20% solanką NaCl. Wykonywano je na bazie cementu wiertniczego G HSR o podwyższonej odporności na siarczany.

1. Receptury dla poszczególnych kolumn rur technicznych i eksploatacyjnych dobierano w zależności od warunków otworowych panujących podczas prowadzenia prac wiertniczych.
2. Do uszczelniania kolumn rur 9½” zaproponowano dwa rodzaje zaczynów: „lekkie” oraz o „normalnej” gęstości, które badano w temperaturze 80°C. Dla kolumny rur 7” zamieszczono propozycję ciężkich zaczynów cementowych (o regulowanej gęstości) testowanych w 95°C i 120°C. Z kolei dla kolumn rur 5” opracowano receptury o „normalnej” gęstości dla temperatur 130°C i 160°C.
3. Parametry technologiczne opracowanych receptur cementowych mogą być z powodzeniem regulowane za pomocą dodatków i domieszek dostępnych na krajowym rynku.
4. Wprowadzenie do zaczynu dodatków obniżających gęstość (w przypadku zaczynu górnego dla rur 9½”) pozwoliło na uzyskanie receptur o regulowanej gęstości od około 1500–1650 kg/m³.
5. Dodatek obciążający dodawany do receptur proponowanych do uszczelniania rur 7” pozwolił na opracowanie zaczynów o gęstości w granicach od około 2060 do około 2350 kg/m³.
6. Zastosowanie odpowiednio dobranych opóźniaczy wiązania nowej generacji umożliwiło sporządzanie receptur dla bardzo wysokich temperatur (do 160°C).
7. Wykonane w INiG – PIB zaczyny cementowe po dobraniu odpowiednich środków upłynniających charakteryzują się dobrymi parametrami reologicznymi. Ich lepkości plastyczne wynosiły około 35–40 mPa · s (w przypadku zaczynów „lekkich”) około 90–120 mPa · s (dla zaczynów o „normalnej” gęstości) około 180–220 mPa · s (w przypadku zaczynów obciążonych).

8. Czasy początku gęstnienia opracowanych zaczynów cementowych (tj. uzyskanie konsystencji 30 Bc) wynoszą w zależności od potrzeb od około 3½ do około 7 godzin i można je z powodzeniem regulować dodatkiem odpowiedniego środka opóźniającego. Lepkości początkowe zaczynów badanych w konsystometrycznym ciśnieniowym są niewielkie (około 10–15 Bc), a przebieg zmian konsystencji zaczynów cementowych ma charakter „prostokątny” (tzn. czas pomiędzy uzyskaniem konsystencji 30 Bc a 100 Bc jest krótki).
9. Filtracje zaczynów z dodatkiem lateksu nie przekraczały 50 cm³/30 minut. Zaczyny nie zawierające lateksu posiadały filtrację poniżej 200 cm³/30 minut. Wszystkie opracowane w INiG – PIB zaczyny cechowały się zerowym odstożem wody.
10. Kamienie cementowe powstałe po związaniu zaczynów posiadały odpowiednio wysokie parametry mechaniczne. Po okresie 2 dni hydratacji wytrzymałość na ściskanie lekkich kamieni cementowych badanych w temperaturze 80°C przekraczała 13 MPa. Kamienie cementowe powstałe z zaczynów ciężkich testowane w temperaturze od 95 do 120°C posiadały wytrzymałość na ściskanie około 22–25 MPa, a próbki o „normalnej” w temperaturze 130–160°C około 30 MPa. Wytrzymałości mechaniczne próbek po okresie 7 dni hydratacji wzrastały z reguły o około 15% w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi po 2 dniach.
11. Opracowane receptury zaczynów mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych podczas prac prowadzonych na Niżu Polskim w trudnych warunkach geologiczno-technicznych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Zaczyny cementowe o regulowanych parametrach reologicznych dla wysokich temperatur złożowych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0061/KW/2017, nr archiwalny: DK-4100-0048/2017.

Literatura

- Anjos M.A.S., Martinelli A.E., Melo D.M.A., Renovato T., Souza P.D.P., Freitas J.C., 2013. Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109: 291–297. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.08.016.
- Bensted J., 1991. Retardation of Cement Slurries to 250°F. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/23073-MS.
- Boul P.J., Ellis M., Thaeamlitz C.J., 2016. Retarder Interactions in Oil Well Cements. *American Association of Drilling Engineers AADE, Houston, TX*: 1–7.
- Brylicki W., 2001. Czynniki determinujące trwałość betonu i iniekcyjnych zaczynów cementowych. *Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Pila–Plotki*: 57–79.

- Dębińska E., 2012. Ocena działania dodatków opóźniających czas wiązania zaczynów cementowych na podstawie badań laboratoryjnych. *Nafta-Gaz*, 4: 225–232.
- Gonet A., Stryczek S., Pinka J., 2004. Analysis of Rheological Models of Selected Cement Slurries. *Acta Montanistica Slovaca*, 9(1): 16–20.
- Herman Z., Migdał M., 1998. Problemy cementowania rur okładzinowych na Niżu Polskim. *Nafta-Gaz*, 12: 542–553.
- Nalepa J., 2001. Problemy związane z cementowaniem głębokich otworów wiertniczych. *Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Pila–Plotki*: 95–103.
- Nelson E.B., 1990. Well Cementing. *Schlumberger Educational Service, Houston, TX, USA*.
- Rzepka M., Kremieniewski M., 2017. Zaczyny cementowe do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych. *Oil and Gas Engineering, Poltava National Technical University*, 2: 43–56.
- Rzepka M., Kremieniewski M., Dębińska E., 2012. Zaczyny cementowe przeznaczone do uszczelniania eksploatacyjnych kolumn rur okładzinowych na Niżu Polskim. *Nafta-Gaz*, 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.
- 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.
- Souza P.P., Soares R.A., Anjos M.A., Freitas J.O., Martinelli A.E., Melo D.F., 2012. Cement slurries of oil wells under high temperature and pressure: the effects of the use of ceramic waste and silica flour. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 6(3): 104–113. DOI: 10.5419/bjpg2012-0009.
- Stryczek 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–Plotki*: 31–41.

Akty prawne i normatywne

- PN-EN ISO 10426-1:2009 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 1: Specyfikacja*.
- PN-EN ISO 10426-2:2003 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych*.



Dr inż. Marcin RZEPKA
Kierownik Laboratorium Zaczynów Uszczelniających w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: marcin.rzepka@inig.pl



Mgr inż. Miłosz KĘDZIERSKI
Specjalista inżyniersko-techniczny w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: milosz.kedzierski@inig.pl