

Doskonalenie zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych w celu poprawy ich parametrów mechanicznych

Improvement of cement slurries intended for sealing deep boreholes in order to improve their mechanical parameters

Łukasz Kut, Marcin Kremieniewski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Głęboki otwór wiertniczy podczas uszczelniania kolumny rur okładzinowych wymaga użycia specjalnie opracowanego zaczynu cementowego przystosowanego do specyficznych warunków panujących na dnie, tj. temperatury często przekraczającej 100°C oraz ciśnienia złożowego powyżej 60 MPa. Tak trudne warunki otworowe niejednokrotnie przysparzały wielu problemów w czasie opracowywania odpowiednich składów zaczynów cementowych wykorzystywanych podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych. Firmy wiertnicze wykonują coraz głębsze i bardziej skomplikowane otwory, przekraczające coraz częściej 3500 m, które podczas zabiegów cementowania wymagają zastosowania specjalnie opracowanych receptur zaczynów uszczelniających. Jednym z podstawowych problemów podczas zabiegów cementacyjnych w otworach o znacznej głębokości jest zapewnienie długiego czasu przetłaczania zaczynu cementowego, który ponadto powinien charakteryzować się dobrymi właściwościami reologicznymi, niewielkim lub zerowym odstożem wody oraz jak najniższą filtracją. Należy zatem dobierać odpowiednie domieszki opóźniające, odporne na działanie wysokich temperatur, oraz dodatki zapewniające właściwe parametry technologiczne świeżego i stwardniałego zaczynu cementowego. Wraz ze wzrostem głębokości otworu wiertniczego rosną również parametry ciśnienia i temperatury. W głębokich otworach wierconych poniżej 3500 metrów problem stanowią nie tylko wysoka temperatura i ciśnienie, ale również wody złożowe o różnej mineralizacji, które w dużym stopniu oddziałują na stwardniały zaczyn cementowy. Zaczyny cementowe przeznaczone do dużych głębokości powinny zawierać w swoim składzie dodatki lub/i domieszki: podnoszące odporność termiczną, opóźniające wiązanie, obniżające filtrację oraz poprawiające odporność na korozję chemiczną wywołaną działaniem solanek złożowych. Celem badań laboratoryjnych było doskonalenie obecnych oraz opracowanie innowacyjnych receptur zaczynów cementowych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach o temperaturze dennej 130°C – zarówno naftowych, jak i geotermalnych – w rejonie Karpat. Podczas realizacji tematu wykonywano badania laboratoryjne świeżych oraz stwardniałych zaczynów cementowych. Zaczyny cementowe zarabiano wodą wodociągową z dodatkiem chlorku potasu w ilości 3%, 6% i 10% bwow (w stosunku do ilości wody). Do wody zarobowej dodawano kolejno środki odpinające, regulujące czas wiązania i gęstnienia, upłynniające i obniżające filtrację. Zaczyny cementowe sporządzono z dodatkiem lateksu w ilości 1–1,2% bwoc (w stosunku do masy suchego cementu). Dla poprawy parametrów mechanicznych zastosowano również dodatek nanorurek węglowych oraz grafenu. Pozostałe składniki – mikrosilikę, hematyt i cement – mieszano ze sobą i wprowadzano następnie do wody zarobowej. Wszystkie zaczyny cementowe sporządzano na bazie cementu wiertniczego G (PN-EN ISO 10426-2). Po połączeniu wszystkich składników zaczyn cementowy mieszano przez 30 minut, a następnie wykonywano pomiary laboratoryjne, takie jak: gęstość, rozlewność, odczyt z aparatu Fann, odstój wody, filtracja, czas gęstnienia. Z opracowanych zaczynów cementowych wybrano te o najlepszych parametrach reologicznych, następnie sporządzono z nich próbki kamieni cementowych. Zaczyny cementowe wiązały przez 48 h w środowisku wysokiej temperatury i ciśnienia (warunki otworopodobne). Otrzymane kamienie cementowe poddano badaniom: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, przyczepności do rur stalowych, porowatości.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, otwór geotermalny, kamień cementowy, parametry reologiczne, parametry mechaniczne, parametry technologiczne.

ABSTRACT: When sealing a casing string, a deep borehole requires the use of a specially developed cement slurry adapted to the specific conditions at its bottom, i.e. temperature often exceeding 100°C and reservoir pressure above 60 MPa. Such difficult downhole conditions often caused many problems in the development of appropriate cement slurry compositions used for sealing casing strings. Drilling companies make deeper and more complicated boreholes, more and more often exceeding 3500 m, which during cementing

Autor do korespondencji: Ł. Kut, e-mail: lukasz.kut@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 24.11.2021 r. Zatwierdzono do druku: 27.01.2022 r.

procedures require the use of specially developed formulas of sealing slurries. During cementation procedures at boreholes of considerable depth, a serious problem is to ensure a long conveying time of the cement slurry, which, moreover, should be characterized by good rheological properties, little or no free water and the lowest possible filtration. Therefore, appropriate retardants that are resistant to high temperatures and additives ensuring the appropriate technological parameters of the cement slurry and stone should be selected. As the depth of the borehole increases, the pressure parameters and temperature also increase. Significant depths exceeding 3500 m are associated not only with high temperatures and pressures, but also with the presence of reservoir waters of various mineralization, which greatly affect the hardened cement slurry. Cement slurries intended for great depths should contain additives increasing thermal resistance, delaying setting, lowering filtration and improving resistance to chemical corrosion caused by the action of reservoir brines. The aim of the laboratory research was to improve current and to develop innovative formulas of cement slurries for sealing oil and geothermal boreholes with a bottomhole temperature of 130°C in the Carpathian region. Laboratory tests were carried out on both cement slurries and cement stones obtained from them. The cement slurries were made using tap water with the addition of potassium chloride in the amount of 3, 6 and 10% bwow (in relation to the amount of water). The defoaming agent was successively added to the mixing water, regulating the setting and thickening time, liquefying and reducing filtration. Cement slurries were made with the addition of 1–1.2% latex bwoc (in relation to the weight of dry cement). To improve the mechanical parameters, the addition of carbon nanotubes and graphene was also used. The other ingredients: microsilica, hematite and cement were mixed together and then added to the mixing water. All cement slurries were prepared on the basis of drilling cement G. After all components had been combined, the cement slurry was mixed for 30 minutes, followed by laboratory measurements such as: density, flow, readings from the Fann apparatus, water retention, filtration, thickening time. From among the developed cement slurries, those with the best rheological parameters were selected, then samples of cement stones were prepared from them and hardened for 48 hours in an environment of high temperature and pressure (borehole-like conditions). The obtained cement stones were tested for: compressive strength, bending strength, adhesion to steel pipes, porosity.

Key words: cement slurry, geothermal well, cement stone, rheological parameters, mechanical parameters, technological parameters.

Wprowadzenie

W ostatnich latach w naszym kraju firmy naftowe coraz częściej projektują i realizują wiercenia głębokich otworów, których końcowa głębokość przekracza 3000 metrów. Mogą to być zarówno otwory naftowe, jak i geotermalne. W rejonie Karpat takimi otworami były: K1, JG1, K2H i NS1. Temperatury dynamiczne panujące na dnie tych otworów dochodziły do 80–120°C, a ciśnienia złożowe – do 60–70 MPa.

Z roku na rok wody geotermalne w coraz większym stopniu stanowią alternatywę dla tradycyjnych źródeł energetycznych, tj. ropy naftowej i gazu ziemnego. Rejon Karpat – zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych – jest bogaty w zasoby energii geotermalnej niskotemperaturowej (temperatura poniżej 130°C). Wiąże się to z obecnością zasobnych w złoża ropy naftowej i gazu ziemnego basenów sedymentacyjnych, zajmujących około 1–2% powierzchni tego rejonu – pozostałe 98% to złoża wód geotermalnych (Sokołowski, 1999). W rejonie południowo-wschodniej Polski w ostatnich latach okazało się, że najbardziej obiecujące są okolice Korczowej oraz Wiśniowej, gdzie odkryto obecność gorących wód na głębokościach przekraczających 3000 m. Temperatury wód geotermalnych w tych rejonach oscylują w granicach 85–120°C.

Tak głębokie otwory (w których występuje wysoka temperatura i ciśnienie) wiążą się z poważnym problemem, jakim jest zapewnienie długiego czasu przetłaczania zaczynu cementowego, który powinien charakteryzować się dobrymi właściwościami reologicznymi, niewielkim odstożem wody oraz jak najniższą filtracją. Należy zatem dobrać odpowiednie dodatki

opóźniające i upłynniające, odporne na działanie wysokich temperatur, oraz inne dodatki zapewniające prawidłowe parametry technologiczne zaczynu i kamienia cementowego (Rzepka i Kaźna, 2006; Kremieniewski i Rzepka, 2009; Rzepka, 2010; Kremieniewski, 2012, 2013; Rzepka i Kremieniewski, 2017).

W INiG – PIB wykonywano do tej pory badania zaczynów cementowych w temperaturze dynamicznej przekraczającej 90°C dla rejonu południowo-wschodniej Polski. Opracowano innowacyjne receptury zaczynów cementowych dla temperatur 90–110°C, które można z powodzeniem zastosować w warunkach przemysłowych podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych zarówno w otworach naftowych, jak i geotermalnych. Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz analiza otrzymanych wyników dla temperatury 130°C wykazały, że konieczne były dalsze prace związane z udoskonaleniem receptur w celu uzyskania kamieni cementowych o wyższych parametrach mechanicznych. Wykonywanie otworów geotermalnych związane jest z występowaniem w przewiercanych formacjach wód termalnych o różnej mineralizacji. Obecność wód termalnych wymaga zastosowania zaczynów cementowych zarabianych wodą o różnym stopniu zasolenia. Ze względu na duże zasoby oraz ogromny potencjał energetyczny znajdujący się w wodach termalnych zasadne jest prowadzenie prac związanych z udostępnianiem tych złóż. Otwory wiertnicze, na których dnie panują temperatury sięgające 130°C i ciśnienia rzędu 80 MPa oraz występuje zróżnicowana mineralizacja wód wgłębnych, wymagają zastosowania specjalnie opracowanych zaczynów uszczelniających, które utworzą szczelną i trwałą barierę z płaszczu cementowego.

Oprócz czynników wpływających na skuteczność uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych, takich jak prawidłowe przygotowanie otworu i wybranie odpowiedniej technologii wykonania zabiegu, główną rolę odgrywa zaczyn cementowy, który powinien cechować się określonymi właściwościami. Skład i parametry zaczynu uzależnione są przede wszystkim: od warunków geologicznych oraz hydrogeologicznych otworu, w którym następuje proces wiązania i tworzenia się kamienia cementowego, od rodzaju przewiercanych skał, głębokości, temperatury i ciśnienia na dnie otworu wiertniczego. W artykule przedstawiono opis badań wybranych zaczynów cementowych proponowanych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w temperaturze dynamicznej 130°C (Nalepa, 2001; Hodne, 2007; Dębińska, 2012; Machowski i Machowski, 2013; Kremieniewski et al., 2016).

Badania laboratoryjne

Podczas realizacji badań statutowych w INiG – PIB opracowano szereg różnych składów zaczynów cementowych do określonych warunków otworopodobnych, tj. 130°C i 80 MPa, zaś w niniejszym artykule zamieszczono wyniki najlepszych składów zaczynów oraz otrzymanych z nich kamieni cementowych sporządzanych na bazie wody o różnym stopniu zasolenia. Zaczyny cementowe zarabiano wodą wodociągową z dodatkiem chlorku potasu w ilości 3%, 6% i 10% bwow (w stosunku do ilości wody). Do wody zarobowej dodawano kolejno środek regulujący czas wiązania, odpieniający, upłynniający i obniżający filtrację. Zaczyny cementowe przygotowano z dodatkiem lateksu w ilości 1–1,2% bwoc (w stosunku do masy suchego cementu). Pozostałe składniki – mikrosilike, hematyt i cement – mieszano ze sobą, a następnie wprowadzano do wody zarobowej. W celu poprawy parametrów mechanicznych kamieni cementowych w niektórych skła-

dach zastosowano nanorurki węglowe lub grafen. Wszystkie zaczyny cementowe powstały na bazie cementu wiertniczego klasy G (PN-EN ISO 10426-2).

Sporządzone zaczyny cementowe poddawano badaniu ich gęstości, rozlewności, odczytów z aparatu Fann, odstojów wody, filtracji oraz czasów gęstnienia. Wytypowano receptury o najlepszych parametrach reologicznych, które posłużyły do dalszych badań stwardniałych zaczynów cementowych. Na sporządzonych próbkach przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie, zginanie, przyczepności do rur stalowych oraz porowatości.

Próbki utwardzano w środowisku o określonej temperaturze i ciśnieniu przez 48 godzin (warunki otworopodobne). Następnie umieszczano je w autoklawach wykonanych ze stali nierdzewnej i przez cały okres sezonowania przetrzymywano w cieplarni. Otrzymane próbki stwardniałego zaczynu po założonych okresach poddawano badaniom laboratoryjnym.

W tabelach 1–6 i na rysunkach 1–6 przedstawiono szczegółowe wyniki badań parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych powstałych z wybranych receptur. W artykule zamieszczono wyniki badań składów, dla których uzyskano najlepsze parametry – zarówno dla zaczynów, jak i otrzymanych z nich kamieni cementowych (Kut, 2011; Liu et al., 2012; Stryczek et al., 2013; Dobrzańska-Danikiewicz et al., 2015).

Niepewność zaprezentowanych wyników pomiarów oznaczono na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych na poziomie: dla pomiarów reologicznych – 0,2%, dla pomiarów wytrzymałości na ściskanie oraz przyczepność do rur – 0,4%. Badania laboratoryjne wykonywano dla trzech podobnych receptur ze współczynnikiem w/c = 0,56 oraz dodatkiem 3%, 6% i 10% KCl. Różne ilości chlorku potasu wpływały na czas gęstnienia, który regulowano środkiem opóźniającym wiązanie. Wszystkie pozostałe składniki syplkie dodawano w takich samych ilościach (mikrosilika, hematyt).

Tabela 1. Parametry technologiczne wybranych zaczynów cementowych z dodatkiem nanorurek węglowych w warunkach 130°C i 80 MPa
Table 1. Technological parameters of selected cement slurries at 130°C and 80 MPa with carbon nanotubes

Ramowy skład zaczynu		Zaczyny proponowane do uszczelniania otworów wiertniczych					
		ρ	rozł.	filtr.	Cz_{g30}	Cz_{g100}	W_{s28}
		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h-min]	[h-min]	[MPa]
Woda	w/c = 0,56	1990	240	25	5-18	5-34	17,5
Odpieniacz	0,3% bwoc						
Upłynniacz	1,0% bwoc						
Dodatek antyfiltr.	0,2% bwoc						
Opóźniacz	0,66% bwoc						
KCl	3,0% bwoc						
Lateks	1,0% bwoc						
Hematyt	20% bwoc						
Mikrosilika	20% bwoc						
Cement wiertniczy G	100%						
Nanorurki	0,1% bwoc (nr 1)						

cd. Tabela 1/cont. Table 1

Ramowy skład zaczynu		Zaczyny proponowane do uszczelniania otworów wiertniczych					
		ρ	rozl.	filtr.	Cz_{g30}	Cz_{g100}	W_{s28}
		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h-min]	[h-min]	[MPa]
Woda Odpieniacz Uplynniciarz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCI Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G Nanorurki	w/c = 0,56 0,3% bwoc 1,2% bwoc 0,2% bwoc 0,67% bwoc 6,0% bwoc 1,0% bwoc 20% bwoc 20% bwoc 100% 0,1% bwoc (nr 2)	1990	250	26	6-16	6-32	20,5
Woda Odpieniacz Uplynniciarz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCI Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G Nanorurki	w/c = 0,56 0,3% bwoc 1,2% bwoc 0,2% bwoc 0,63% bwoc 10,0% bwoc 1,0% bwoc 20% bwoc 20% bwoc 100% 0,1% bwoc (nr 3)	1995	245	23	6-54	7-15	16,0
Oznaczenia: ρ – gęstość zaczynu cementowego; rozl. – rozlewność; filtr. – filtracja; Cz_{g30} – czas gęstnienia (30 Bc); Cz_{g100} – czas gęstnienia (100 Bc); W_{s28} – wytrzymałość kamienia cementowego na ściskanie po 28 dniach.							

Tabela 2. Parametry mechaniczne stwardniałych zaczynów z dodatkiem nanorurek węglowych**Table 2.** Mechanical parameters of cement stones with carbon nanotubes

Nr	Temperatura 130°C			
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach
1	12,0	23,4	22,5	17,5
2	10,3	27,8	29,5	20,5
3	8,3	18,3	20,8	16,0
Przyczepność do rur stalowych [MPa]				
1	3,2	3,8	3,7	3,9
2	1,5	1,8	2,5	3,7
3	1,7	2,1	3,1	4,6
Wytrzymałość na zginanie [MPa]				
1	9,75	10,50	11,25	10,50
2	10,50	11,25	11,25	10,50
3	9,75	10,50	11,25	9,75

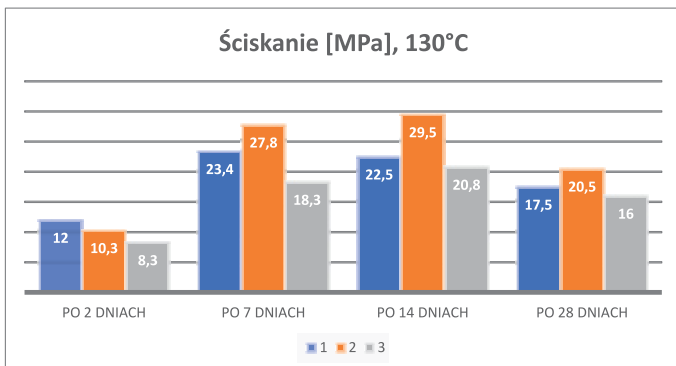
W celu zwiększenia parametrów mechanicznych stwardniałego zaczynu dodano nanorurki węglowe w ilości 0,1% w stosunku do masy suchego cementu.

Zaczyny od 1 do 3 miały gęstości od 1990 kg/m³ do 1995 kg/m³ i nie wykazały odstoju wody. Wszystkie receptury

posiadały niskie filtracje, wynoszące od 23 cm³/30 min do 26 cm³/30 min. Rozlewności mieściły się w przedziale od 240 mm do 250 mm, co świadczy o dobrej płynności zaczynów cementowych. Opracowane receptury miały odpowiednie czasy gęstnienia i konsystencję 30 Bc (początek gęstnienia)

uzyskiwały powyżej 5 h, a 100 Bc (koniec gęstnienia – brak przetłaczalności) poniżej 7 h 20 min.

W tabeli 2 i na rysunkach 1–3 zamieszczono wyniki badań parametrów mechanicznych kamieni cementowych.

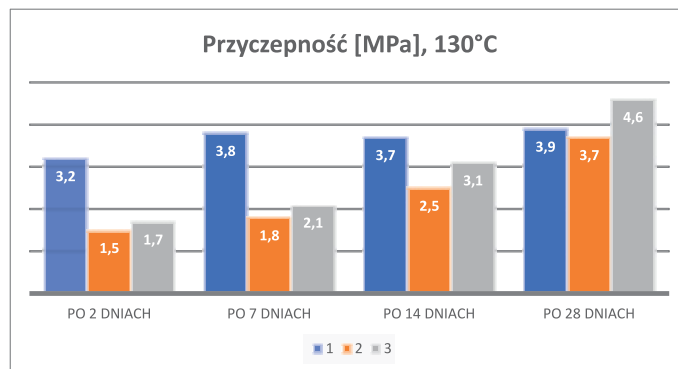


Rysunek 1. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów na ściskanie
Figure 1. Compressive strength of cement stones

Wykonane badania wytrzymałości stwardniałych zaczynów na ściskanie wykazały jej wzrost pomiędzy 2. a 28. dniem sezonowania próbek. Po 28 dniach wynosiła ona od 16,0 MPa do 20,5 MPa, najmocniejsza była próbka nr 2 – z zawartością 6% KCl, 20% hematytu i 20% mikrosiliki.

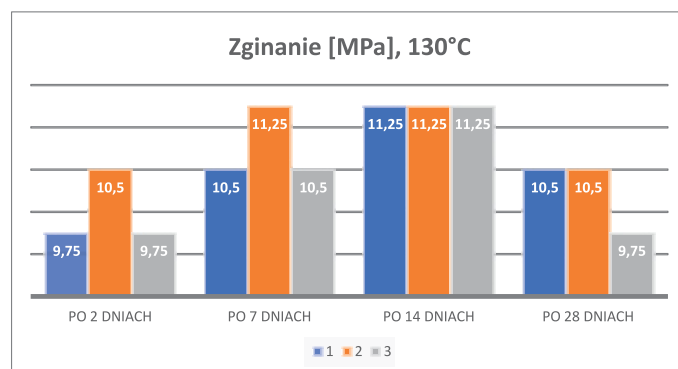
Drugim mierzonym parametrem mechanicznym była przyczepność kamienia do rur stalowych. Wykonane badania wykazały, że po 28 dniach przyczepność dla temperatury 130°C wynosiła od 3,7 MPa do 4,6 MPa, najwyższą odnotowano dla próbki nr 3 – z zawartością 10% KCl, 20% hematytu i 20% mikrosiliki.

Trzecim i ostatnim badaniem, z którego wyniki zamieszczono w tabeli 2, były pomiary wytrzymałości stwardniałych zaczynów na zginanie. Dla wszystkich przebadanych próbek po 28 dniach ich sezonowania otrzymano zbliżone wartości wynoszące od 9,75 MPa do 10,5 MPa. Wykonano również badania parametrów reologicznych dla zaczynów cementowych,



Rysunek 2. Przyczepność stwardniałych zaczynów do rur stalowych

Figure 2. Adhesion of cement stones to steel pipes



Rysunek 3. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów na zginanie
Figure 3. Bending strength of cement stones

do których w celu podniesienia parametrów mechanicznych dodano grafen w ilości 0,01% bwoc (w stosunku do masy suchego cementu). Poza tym zaczyny cementowe sporządzono z dodatkiem lateksu, hematytu i mikrosiliki, tak jak w przypadku składów zawierających nanorurki węglowe. Tu także zastosowano trzy różne ilości chlorku potasu, tj. 3%, 6% i 10%.

Zaczyny cementowe o gęstości w zakresie 1990–1995 kg/m³ nie wykazały odstoju wody. Zmierzone filtracje mieściły się

Tabela 3. Parametry technologiczne wybranych zaczynów cementowych z dodatkiem grafenu dla warunków 130°C i 80 MPa

Table 3. Technological parameters of selected cement slurries at 130°C and 80 MPa with graphene

Ramowy skład zaczynu		Zaczyny proponowane do uszczelniania otworów wiertniczych					
		ρ	rozł.	filtr.	Cz _{g30}	Cz _{g100}	W _{s28}
		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h-min]	[h-min]	[MPa]
Woda	w/c = 0,56	1990	250	26	5-10	5-36	19,0
Odpieniacz	0,3% bwoc						
Uplynniciarz	1,2% bwoc						
Dodatek antyfiltr.	0,2% bwoc						
Opóźniacz	0,65% bwoc						
KCl	3,0% bwoc						
Lateks	1,0% bwoc						
Hematyt	20% bwoc						
Mikrosilika	20% bwoc						
Cement wiertniczy G	100%						
Grafen	0,01% bwoc (nr 4)						

cd. Tabela 3/cont. Table 3

Ramowy skład zaczynu		Zaczyny proponowane do uszczelniania otworów wiertniczych					
		ρ	rozl.	filtr.	Cz_{g30}	Cz_{g100}	W_{s28}
		[kg/m ³]	[mm]	[cm ³ /30 min]	[h-min]	[h-min]	[MPa]
Woda Odpieniacz Upłynniacz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCl Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G Grafen	w/c = 0,56 0,3% bwoc 1,2% bwoc 0,2% bwoc 0,66% bwoc 6,0% bwoc 1,0% bwoc 20% bwoc 20% bwoc 100% 0,01% bwoc (nr 5)	1990	255	28	5-42	5-56	17,4
Woda Odpieniacz Upłynniacz Dodatek antyfiltr. Opóźniacz KCl Lateks Hematyt Mikrosilika Cement wiertniczy G Grafen	w/c = 0,56 0,3% bwoc 1,2% bwoc 0,2% bwoc 0,6% bwoc 10,0% bwoc 1,0% bwoc 20% bwoc 20% bwoc 100% 0,01% bwoc (nr 6)	1995	255	27	6-00	6-17	17,3
Oznaczenia: ρ – gęstość zaczynu cementowego; rozl. – rozlewność; filtr. – filtracja; Cz_{g30} – czas gęstnienia (30 Bc); Cz_{g100} – czas gęstnienia (100 Bc); W_{s28} – wytrzymałość kamienia cementowego na ściskanie po 28 dniach.							

Tabela 4. Parametry mechaniczne stwardniałych zaczynów z dodatkiem grafenu

Table 4. Mechanical parameters of cement stones with graphene

Nr	Temperatura 130°C			
	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach
4	16,8	20,5	12,1	19,0
5	17,0	16,3	12,5	17,4
6	21,3	19,6	10,5	17,3
Przyczepność do rur stalowych [MPa]				
4	3,2	3,9	3,7	4,1
5	3,3	3,5	3,4	3,8
6	3,6	3,7	3,6	3,9
Wytrzymałość na zginanie [MPa]				
4	9,75	10,5	9,75	10,5
5	10,50	10,5	9,75	10,5
6	10,50	10,5	9,75	10,5

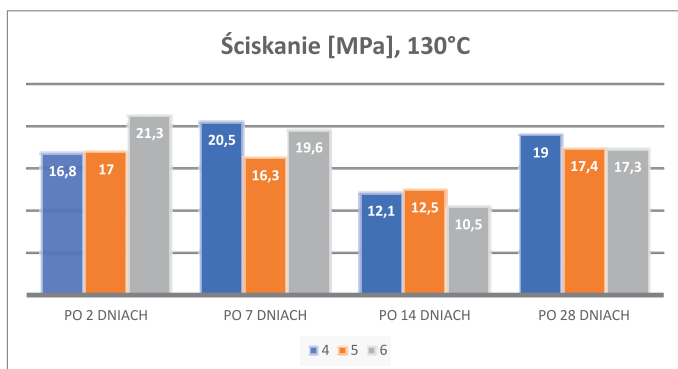
w przedziale 26–28 cm³/30 min, zaś rozlewności: 250–255 mm. W przypadku tych receptur również otrzymano odpowiednie czasy gęstnienia dla założonych warunków otworowych, mieszczące się między 5 a 7 godzin. Najszybciej początek gęstnienia (30 Bc) nastąpił po 5 h 10 min (skład nr 4), zaś

najpóźniej koniec gęstnienia (100 Bc) otrzymano w czasie 6 h 17 min (skład nr 6).

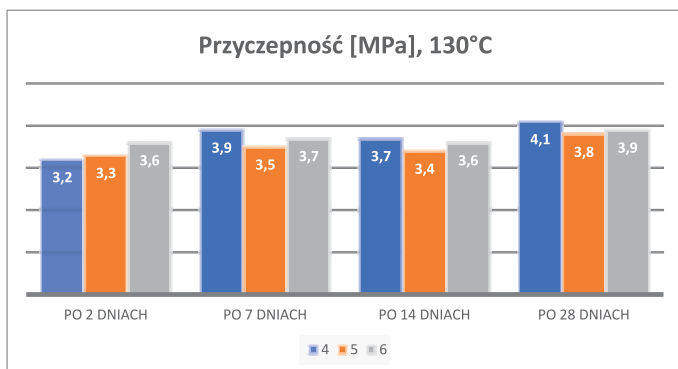
W tabeli 4 i na rysunkach 4–6 zamieszczono wyniki badań parametrów mechanicznych kamieni cementowych. Próbkę stwardniałych zaczynów z dodatkiem grafenu po

28 dniach miały zbliżoną wytrzymałość na ściskanie do składów z domieszką nanorurek węglowych i wynosiła ona od 17,3 MPa do 19,0 MPa. Po 28 dniach najmocniejsza okazała się próbka z zawartością 3% KCl, 20% hematytu i 20% mikrosiliki (nr 4).

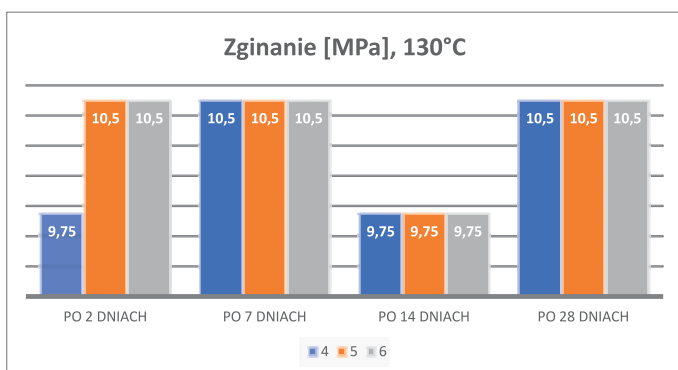
Następnie zmierzono przyczepność stwardniałych zaczynów do rur stalowych. Przeprowadzone badania wykazały, że między 2. a 28. dniem nastąpił nieznaczny wzrost przyczepności, zaś najwyższą posiadała próbka nr 4, z zawartością 3% KCl, 20% hematytu i 20% mikrosiliki, która po 28 dniach cechowała się przyczepnością 4,1 MPa.



Rysunek 4. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów na ściskanie
Figure 4. Compressive strength of cement stones



Rysunek 5. Przyczepność stwardniałych zaczynów do rur stalowych
Figure 5. Adhesion of cement stones to steel pipes



Rysunek 6. Wytrzymałość stwardniałych zaczynów na zginanie
Figure 6. Bending strength of cement stones

Ostatnim badaniem, z którego wyniki zamieszczono w tabeli 4, były pomiary wytrzymałości stwardniałych zaczynów na zginanie. Dla wszystkich przebadanych próbek po 28 dniach ich sezonowania otrzymano zbliżone wartości wynoszące 10,5 MPa.

Po wykonaniu pomiarów parametrów mechanicznych stwardniałych zaczynów przeprowadzono również badania porowatości wybranych próbek kamieni po 28 dniach ich sezonowania przy użyciu porozymetru rtęciowego. Porowatości wytypowanych próbek mieściły się w przedziale od 34,0% do 35,6%. Najniższą porowatość po 28 dniach miała próbka otrzymana ze składu nr 4, która zawierała 20% hematytu, 20% mikrosiliki, grafen oraz 3% KCl. Wskaźnik w/c wynosił 0,56. Najwyższą porowatość odnotowano natomiast w przypadku próbki nr 3, która w swoim składzie zawierała m.in. 20% hematytu, 20% mikrosiliki, nanorurki węglowe oraz 10% KCl, zaś jej wskaźnik wodno-cementowy w/c również wynosił 0,56. W tabelach 5 i 6 przedstawiono wyniki badań wybranych próbek stwardniałych zaczynów.

Tabela 5. Porowatości wybranych próbek stwardniałych zaczynów po 28 dniach sezonowania próbek

Table 5. Porosity of selected samples of cement stones after 28 days of sample seasoning

Nr próbki	Współczynnik porowatości [%]
1	34,5
2	35,3
3	35,6
4	34,0
5	34,3
6	34,5

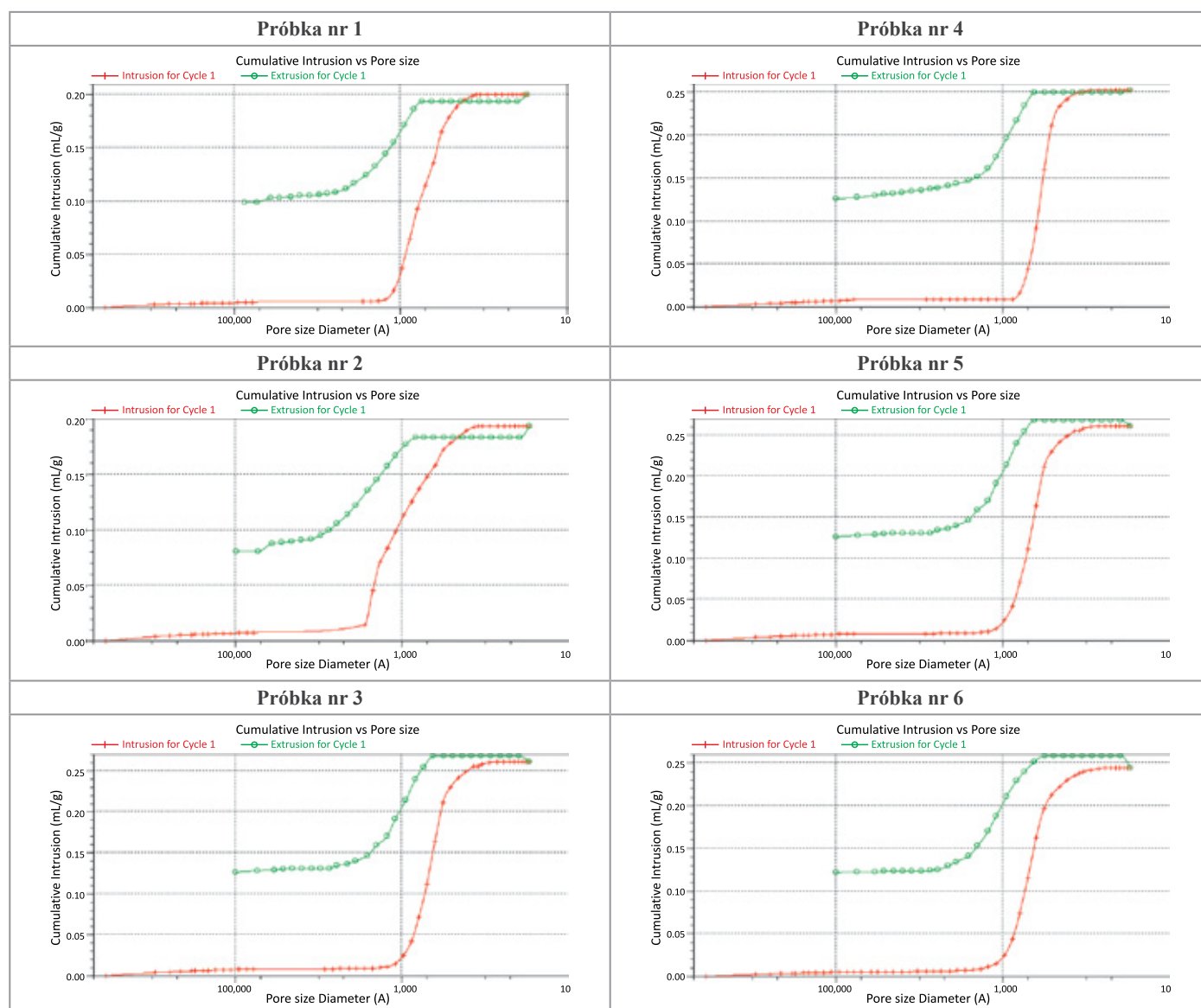
Wykresy umieszczone w tabeli 6 przedstawiają zależność ilości wtłaczanej pod ciśnieniem rtęci od wielkości porów występujących w próbce. Wyniki badań wykazały, że największą ilość stanowią pory (o niewielkich rozmiarach) z przedziału wielkości 10 000–100 nm – od 73% do 96%.

Wnioski i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań wytypowanych składów zaczynów cementowych można wyciągnąć poniższe wnioski:

1. Celem badań laboratoryjnych było opracowanie receptur zaczynów uszczelniających dla temperatury dynamicznej 130°C i ciśnienia 80 MPa. Zaczyny te zarabiano wodą zasoloną chlorkiem potasu w ilościach 3%, 6% i 10%.

Tabela 6. Wykresy rozkładów porów w wybranych próbkach
Table 6. Charts of pore distribution in selected samples



- Opracowane zaczyny cementowe miały gęstości od 1990 kg/m³ do 1995 kg/m³ i były zaprojektowane z myślą o zastosowaniu ich podczas uszczelniania kolumn rur okładzinowych głównie w rejonie południowo-wschodniej Polski.
- Parametry technologiczne opracowanych zaczynów cementowych można z powodzeniem regulować dodatkami lub/i domieszkami powszechnie stosowanymi w krajowym przemyśle wiertniczym.
- Zaczyny cementowe po zastosowaniu odpowiednich domieszek chemicznych charakteryzowały się dobrymi parametrami reologicznymi.
- Zaczyny cementowe nie wykazały odstojów wody, zaś zmierzone filtracje były niskie i wynosiły od 23,0 cm³/30 min (nr 3) do 28,0 cm³/30 min (nr 5).
- Zmierzone rozlewności mieściły się w przedziale od 240 mm (nr 1) do 255 mm (nr 5 i 6).
- Czasy gęstnienia opracowanych zaczynów cementowych mieściły się w przedziale od około 5 godzin do około 7 godzin i można je z powodzeniem regulować za pomocą środka opóźniającego wiązanie w ilości około 0,6–0,67%.
- Stwardniałe zaczyny po 28 dniach sezonowania próbek cechowały się wysokimi parametrami mechanicznymi. Wytrzymałość na ściskanie badanych próbek kamieni cementowych przekraczała 16 MPa. Najmocniejsza okazała się próbka wykonana ze składu nr 2 (20% hematytu, 20% mikrosiliki, 0,1% nanorurki), której wytrzymałość wyniosła 20,5 MPa.
- Przyczepność stwardniałych zaczynów do rur stalowych po 28 dniach była również wysoka – po 28 dniach wynosiła od około 3,7 MPa (skład nr 2) do 4,6 MPa (skład nr 3).
- Przeprowadzone badania wytrzymałości stwardniałych zaczynów na zginanie wykazały, że zarówno po 2 dniach,

jak i po 28 dniach sezonowania próbek zmierzone wartości mieściły się w przedziale 9,75–10,5 MPa.

11. Opracowane receptury zaczynów mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych (130°C i 80 MPa) w środowisku o różnym stopniu zasolenia, które to warunki mogą występować podczas wierceń otworów sięgających głębokości 3500–5000 metrów.

Celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było udoskonalenie zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych, a w szczególności poprawa ich parametrów mechanicznych dla temperatury 130°C. Opracowane w 2020 roku próbki kamieni cementowych dla temperatury 130°C miały niskie wartości zmierzonych parametrów mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie, zginanie, przyczepność do rur stalowych) po 28 dniach sezonowania próbek, dlatego składy zaczynów cementowych wymagały

dalszych modyfikacji. W tabeli 7 zestawiono parametry mechaniczne otrzymanych próbek stwardniałych zaczynów opracowanych w latach 2020 i 2021.

Na podstawie badań laboratoryjnych wytypowano ramowe składy zaczynów cementowych proponowane do zastosowania w warunkach przemysłowych. W tabelach 1 i 3 zamieszczono składy zaczynów o gęstościach od 1990 kg/m³ do 1995 kg/m³, które mogą być użyte do uszczelniania eksploatacyjnych kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych w rejonie Karpat. Receptury te są rekomendowane do otworów, w których temperatura dennej wynosi około 130°C, a ciśnienie około 80 MPa.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Doskonalenie zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych w celu poprawy ich parametrów mechanicznych* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN, nr zlecenia: 0016/KW/2021, nr archiwalny: DK-4100-0004/2021.

Tabela 7. Zestawienie parametrów mechanicznych dla próbek stwardniałych zaczynów otrzymanych w latach 2020 i 2021

Table 7. Mechanical parameters for cement stones obtained in 2020 and 2021

Temperatura [°C]	Skład	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				Wytrzymałość na zginanie [MPa]				Przyczepność do rur stalowych [MPa]			
		po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach	po 2 dniach	po 7 dniach	po 14 dniach	po 28 dniach
130°C	2020 r.	8,4	11,4	10,8	11,5	7,50	9,00	9,8	10,50	1,5	2,7	3,2	3,0
		9,6	11,1	11,4	12,9	7,50	8,30	9,0	9,00	1,5	1,6	1,5	1,6
		11,1	11,8	10,9	12,1	7,50	8,30	8,3	9,00	1,8	1,9	1,8	2,1
	2021 r.	12,0	23,4	22,5	17,5	9,75	10,50	11,25	10,50	3,2	3,8	3,7	3,9
		10,3	27,8	29,5	20,5	10,50	11,25	11,25	10,50	1,5	1,8	2,5	3,7
		8,3	18,3	20,8	16,0	9,75	10,50	11,25	9,75	1,7	2,1	3,1	4,6
		16,8	20,5	12,1	19,0	9,75	10,50	9,75	10,50	3,2	3,9	3,7	4,1
		17,0	16,3	12,5	17,4	10,50	10,50	9,75	10,50	3,3	3,5	3,4	3,8
		21,3	19,6	10,5	17,3	10,50	10,50	9,75	10,50	3,6	3,7	3,6	3,9

Literatura

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

Dobrzańska-Danikiewicz A., Łukowiec D., Cichocki D., Wolany W., 2015. Nanokompozyty złożone z nanorurek węglowych pokrytych nanokryształami metali szlachetnych. *Open Access Library, Annal* 5(2): 1–131.

Hodne H., 2007. Rheological performance of cementitious materials used in well cementing. *Faculty of Science and Technology Department of Petroleum Engineering, Stavanger*.

Kremieniewski M., 2012. Modyfikacja przestrzeni porowej kamieni cementowych. *Nafta-Gaz*, 68(3): 165–170.

Kremieniewski M., 2013. Wpływ warunków hydratacji na strukturę przestrzenną kamieni cementowych. *Nafta-Gaz*, 69(1): 51–56.

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

Kremieniewski M., Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., 2016. Zmniejszanie porowatości stwardniałych zaczynów wiertniczych poprzez wprowadzenie dodatków drobnoziarnistych. *Cement Wapno Beton*, 5: 325–335.

Kut Ł., 2011. Wpływ mikrocementu na parametry zaczynu i kamienia cementowego. *Nafta-Gaz*, 67(12): 903–908.

Liu Y., Xie B., Zhang Z., Zheng Q., Xu Z., 2012. Mechanical properties of graphene papers. *J. Mech. Phys. Solids*, 60: 591–605. DOI.org/10.1016/j.jmps.2012.01.002.

Machowski W., Machowski G., 2013. Ocena możliwości pracy dubletu geotermalnego na strukturze Wiśniowej koło Strzyżowa, jako wynik modelowań dynamicznych. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 52(2): 95–104.

Nalepa J., 2001. Problemy związane z cementowaniem głębokich otworów wiertniczych. *Symposium Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”*, Piła–Płotki: 95–103.

- Rzepka M., 2010. Zaczyny cementowe do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych, w temperaturze dynamicznej do ok. 120°C. *Nafta-Gaz*, 66(4): 274–279.
- Rzepka M., Kątna Z., 2006. Zaczyny cementowe z dodatkiem mikrocementu do uszczelniania rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych. *Nafta-Gaz*, 62(7–8): 364–369.
- Rzepka M., Kremieniewski M., 2017. Zaczyny cementowe do uszczelniania głębokich otworów wiertniczych. *Oil and Gas Engineering, Poltava National Technical University*, 2: 43–56.
- Sokołowski J., 1999. Możliwości zagospodarowania wód geotermalnych w trzech prowincjach Europy północno-zachodniej i centralnej stykających się w rejonie Krakowa. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geosynoptyka i Geotermia*, 4–5: 77–97.
- Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., Złotkowski A., Ziaja J., 2013. Wpływ superplastyfikatorów z grupy polikarboksylanów na właściwości reologiczne zaczynów cementowych stosowanych w technologiach wiertniczych. *Archives of Mining Sciences*, 58(3): 719–728.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- PN-EN ISO 10426-2:2006 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych. Część 2: jBadania cementów wiertniczych.



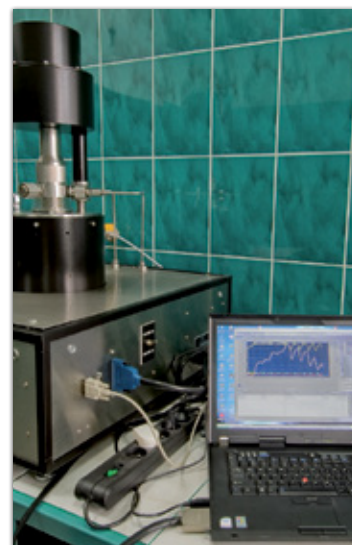
Mgr inż. Łukasz KUT
Starszy specjalista badawczo-techniczny
w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: lukasz.kut@inig.pl



Dr hab. 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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU TECHNOLOGII WIERCENIA

- opracowywanie składów i technologii sporządzania wodnodispersyjnych i olejowodispersyjnych płuczek wiertniczych, cieczy specjalnych (roboczych, nadpakerowych, buforowych, przemylających) i zaczynów cementowych do wiercenia otworów i rekonstrukcji odwiertów w warunkach normalnej i wysokiej temperatury oraz występowania różnych ciśnień złożowych i skażeń chemicznych;
- dobór właściwości płuczek wiertniczych, zaczynów cementowych, cieczy buforowych oraz opracowanie metod usuwania osadów filtracyjnych w celu poprawy skuteczności cementowania otworów wiertniczych;
- badania serwisowe płuczek wiertniczych podczas wiercenia otworu oraz zaczynów cementowych w trakcie zabiegu cementowania;
- specjalistyczne badania laboratoryjne dotyczące oznaczania: wpływu cieczy wiertniczych na przewiercane skały, napięcia powierzchniowego na granicy faz, współczynnika tarcia w warunkach HPHT, sedymentacji materiału obciążającego, wynoszenia zwiercin w otworach kierunkowych i poziomych, doboru materiałów uszczelniających do zapobiegania ucieczkom płuczki wiertniczej i zaczynu cementowego w warstwy szczelinowate, odporności na migrację gazu w wiążącym zaczynie cementowym w warunkach otworopodobnych, odporności korozyjnej kamienia cementowego, związków chemicznych w cieczach wiertniczych i ich toksyczności przy użyciu bakterii jako bioindykatorów;
- zagospodarowywanie zużytych płuczek wiertniczych i urobku.



Kierownik: dr inż. Małgorzata Uliasz Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5219 Faks: 13 436 79 71 E-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy