

Analiza parametrów technologicznych wybranych zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C

Analysis of technological parameters of selected lightweight cement slurries used for sealing shallow boreholes with a downhole temperature of up to 45°C

Marcin Kremieniewski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Projektowane do uszczelnienia płytkich otworów lekkie zaczyny cementowe, jak również powstałe z tych zaczynów stwardniałe zaczyny powinny spełniać wymagania odpowiednich norm. W ostatnich latach widoczne jest znaczne nasilenie prac wiertniczych w rejonie przedgórze Karpat i w Karpatach, gdzie stosowane są zaczyny o obniżonej gęstości. Aby zaprojektować recepturę takiego zaczynu, najczęściej stosuje się lekki dodatek wypełniający, który pozwala obniżyć gęstość zaczynu. Jednak obecność takiego wypełniacza w strukturze zarówno płynnego, jak i stwardniałego zaczynu skutkuje pojawianiem się problemów w uzyskaniu wymaganych parametrów technologicznych zaczynu. Do testów świeżych zaczynów używa się takich urządzeń, jak np.: konsystometry ciśnieniowe, prasy filtracyjne, lepkościomierze. Natomiast struktura powstałego stwardniałego zaczynu analizowana jest za pomocą następujących urządzeń: porozymetr rtęciowy, ultradźwiękowy analizator cementu, maszyna wytrzymałościowa. Prowadzone badania zaczynów cementowych mają na celu opracowanie grupy receptur przeznaczonych do uszczelnienia kolumn rur okładzinowych w otworach wierconych na danym obszarze geologicznym. Jednakże równie istotne jest wykonanie analizy parametrów technologicznych dla zaczynów stosowanych dotychczas w perspektywnym rejonie. Na podstawie uzyskanych wyników i interpretacji składów zaczynów możliwe jest wprowadzenie takich modyfikacji, które mają na celu poprawę parametrów w nowo opracowywanych bądź modyfikowanych zaczynach. W artykule omówiono parametry technologiczne zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C. Na potrzeby artykułu wytypowano 5 receptur zaczynów, które były stosowane w rejonie Karpat w otworach o głębokości od 1000 m do 1500 m. Temperatura panująca w tych otworach, na określonych głębokościach wynosiła od 35°C do 45°C, a ciśnienia denne od 7 do 15 MPa. Receptury zaczynów zostały wykonane zgodnie z projektem cementowania. Następnie wykonano badania parametrów technologicznych zarówno dla świeżych zaczynów, jak i dla próbek powstałych po związaniu zaczynu. Przeprowadzona analiza parametrów technologicznych dla wybranej grupy zaczynów stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C pozwala na podjęcie dalszych prac mających na celu wprowadzenie modyfikacji zaczynów stosowanych obecnie bądź zaprojektowania nowych receptur przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w płytkich otworach.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, zaczyn lekki, stwardniały zaczyn cementowy, parametry technologiczne zaczynu cementowego.

ABSTRACT: Light cement slurries designed for sealing shallow boreholes, as well as hardened cement slurries derived from these slurries should meet the requirements of relevant standards. In recent years, there has been a significant increase in drilling work in the Carpathian Foreland and in the Carpathians where low density cement slurry is used. To design the recipe for such slurry, a lightweight filler is most often used to reduce the slurry density. However, the presence of such a filler in the structure of both liquid and hardened cement slurry results in problems in obtaining the required technological parameters of the slurry. Therefore, research is necessary. For testing fresh cement slurry, devices such as pressure consistometers, filter presses, and viscometers are used. However, the structure of the resulting hardened slurries is analyzed using the following devices: mercury porosimeter, ultrasonic cement analyzer, strength testing machine. The research carried out on cement slurries is aimed at developing a group of recipes for sealing columns of casing pipes in boreholes in a given geological area. However, it is equally important to perform an analysis of technological parameters for slurries used so far in the perspective area. Based on the results obtained and the interpretation of slurry compositions, it is possible to introduce such modifications that will result in improved parameters in newly developed or modified slurries. The article discusses the technological parameters of lightweight cement slurries used for sealing shallow boreholes in the temperature range up to 45°C. For the

purposes of the article, five cement slurry recipes were selected, which were used in the Carpathian region in boreholes with a depth of 1000 m to 1500 m. The temperature prevailing in these boreholes at specific depths ranged from 35°C to 45°C, and pressures ranged from 7 to 15 MPa. The slurry recipes were made in accordance with the cementing design. Then, technological parameters were tested for both fresh slurries and samples obtained after slurry binding. An analysis of technological parameters was carried out for a selected group of slurries used for sealing shallow boreholes at temperatures up to 45°C. This analysis allows for further work to be carried out to modify the slurries used currently or to design new recipes for sealing columns of casing pipes in shallow boreholes.

Key words: cement slurry, lightweight cement slurry, hardened cement slurry, technological parameters of cement slurry.

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się większą intensywność realizacji odwiertów w celu poszukiwania i udostępnienia złóż w rejonie przedgórze Karpat i w Karpatach. Są to złoża zalegające głównie na głębokościach do 1500 m, występujące niekiedy w warstwach słabozwiązłych (Kremieniewski, 2019, 2020c). Występowanie takich warunków geologiczno-łożowych wymaga stosowania zaczynów cementowych charakteryzujących się niższą gęstością niż np. zaczyny stosowane w rejonie Niżu Polski. Ponadto zaczyny lekkie stosuje się również w przypadku, gdy konieczne jest (Nelson, 1990; Brown i Ferg, 2005; Stryczek et al., 2009):

- wtłoczenie zaczynu cementowego w przestrzeni pozarurowej na dużą wysokość lub cementowanie rur do wierzchu;
- uszczelnienie otworu, który był wiercony w profilu geologicznym, gdzie występowały skały chłonne;
- uszczelnienie kolumn rur okładzinowych posadowionych w otworze, w którym występowały skały słabozwiązłe oraz poziomy produktywny o niskim ciśnieniu złożowym;
- zacementowanie skawernowanej czapy solnej w wysadach solnych np.: typu Mogilno, Góra.

Bardzo ważny jest w tego typu recepturach rodzaj oraz parametry stosowanego zaczynu uszczelniającego. Skład lekkiego zaczynu cementowego dobierany jest do warunków występujących w otworze podczas procesu wiązania zaczynu i formowania się płaszcza cementowego. Związane jest to z rodzajem przewierczanych formacji geologicznych, głębokości końcowej, temperatury dynamicznej i statycznej oraz ciśnienia złożowego i ciśnienia szczelinowania (Wiśniowski et al., 2007; Al-Yami et al., 2010; Kremieniewski, 2020d). Dlatego też w celu odpowiedniego zaprojektowania receptury zaczynu cementowego istotne jest przeanalizowanie parametrów zaczynów stosowanych do uszczelnienia wcześniej wierconych otworów w danej strukturze geologicznej. Działanie takie jest niezbędne, ponieważ brak odpowiedniej skuteczności uszczelnienia (zwłaszcza strefy horyzontów produktywnych) powoduje powstawanie komplikacji oraz trudności w likwidowaniu ekshalacji i ewentualnych wypływów medium złożowego z przestrzeni międzyrurowych i pozarurowych. Należy również zaznaczyć, że koszty dodatkowych prac, w których odwiert będzie doszczelniany są bardzo wysokie.

Wymogi techniczno-technologiczne zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania płytkich otworów w rejonie, w którym występują temperatury do 50°C

Świeże zaczyny cementowe przeznaczone do uszczelniania przestrzeni pierścieniowej kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych, w których występują temperatury do 50°C powinny spełniać następujące warunki:

- powinny charakteryzować się odpowiednią przetłaczalnością w czasie niezbędnym do wytlóczenia zaczynu cementowego w przestrzeń pierścieniową, powiększoną o margines bezpieczeństwa (Stryczek et al., 2014);
- zaczyny powinny wiązać niezwłocznie po wtłoczeniu do przestrzeni pierścieniowej. W rejonie o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu w celu wyeliminowania tego zjawiska, czas od momentu wytlóczenia płynnego zaczynu cementowego w wypełnianą przestrzeń pierścieniową do chwili, w której przechodzi on w fazę stałą powinien być możliwie krótki (Stryczek et al., 2005; Jordan et al., 2018);
- niezbędne jest również uzyskanie krótkiego czasu przejścia (*Transition Time*) od wartości 50 Pa do wartości 250 Pa, podczas pomiaru narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej (SWS), co także przyczynia się do ograniczenia możliwości wtargnięcia gazu w strukturę wiążącego zaczynu (Peng i Jacobsen, 2013; Kremieniewski i Kędzierski, 2020);
- wymagane jest, aby zaczyny posiadały odpowiednie wartości parametrów reologicznych, które pozwolą na skuteczne wyparcie płuczki i cieczy buforowej z przestrzeni pierścieniowej otworu przy zachowaniu minimalnych oporów przepływu. Dodatkowo zaczyn tego rodzaju powinien umożliwiać uzyskanie jak największego promienia wypełnienia uszczelnianego ośrodka (Stryczek et al., 2005; Kremieniewski 2020e);
- zaczyny muszą być stabilne pod względem sedymentacyjnym (posiadać zerowy odstój wody), a filtracja w warunkach HPHT powinna posiadać możliwie niską wartość (Stryczek et al., 2005; Kremieniewski 2020a).

Z kolei stwardniałe zaczyny cementowe po związaniu w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego powinny:

- wykazywać odpowiednią izolację międzystrefową (po związaniu posiadać wymagane wartości przyczepności na kontakcie z powierzchnią rur okładzinowych oraz powierzchnią ściany otworu), (Chung et al., 2018);
- posiadać jak najniższe wartości przepuszczalności dla gazu, porowatości i wykazywać izotropię struktury płaszcza cementowego), (Dohnalik i Zalewska, 2013; Kremieniewski et al., 2016);
- posiadać wymagane wartości wytrzymałości mechanicznej na ściskanie (Sadowski et al., 2017);
- charakteryzować się brakiem skurczu podczas twardnienia (Shabbar et al., 2017);
- posiadać odpowiednią odporność korozyjną (Blanco et al., 2000; Kremieniewski i Stryczek, 2019; Kremieniewski, 2020b).

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie składów zaczynów wybranych otworów wierconych w wybranym rejonie przedgórza Karpat i w Karpatach, w których wykonano zabiegi cementowania kolumn rur okładzinowych w ostatnich latach. Przegląd stosowanych zaczynów dotyczy otworów, w których temperatury nie przekraczały 45°C. Niniejsze zestawienie zawiera krótką charakterystykę warunków otworowych dotyczącą głębokości otworu, temperatury oraz ciśnienia na dnie otworu oraz średnicy uszczelnianej kolumny rur okładzinowych. Ponadto w tabeli zastawiono skład receptur zaczynów cementowych stosowanych podczas zabiegu cementowania danej kolumny rur okładzinowych w konkretnym otworze.

Przebieg prac badawczych

Serię badań mających na celu analizę parametrów technologicznych zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów, w których temperatury nie przekraczały 45°C wykonano w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających Zakładu Technologii Wiercenia INiG – PIB. Badania wykonano zgodnie z normami: API Spec 10 oraz PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2*.

Testy dla zaczynów cementowych prowadzono przy użyciu aparatury pomiarowej, którą dysponuje Laboratorium Zaczynów Uszczelniających INiG – PIB (aparatura firmy Chandler i Ofite, tj.:

miksery, waga Baroid, konsystometr ciśnieniowy, prasa filtracyjna, wiskozymetr Fann, porozymetr, przepuszczalnościomierz gazowy, ultradźwiękowy analizator cementu UCA + SGSM do badania wytrzymałości mechanicznej i statycznej wytrzymałości strukturalnej żeli cementowych, maszyna wytrzymałościowa do oznaczania wytrzymałości na ściskanie i przyczepności kamienia cementowego do rur stalowych i inne).

Analizę parametrów technologicznych przeprowadzono dla 5 wybranych składów zaczynów przedstawionych w tabeli 1. Wytypowane receptury zaczynów cementowych to najczęściej stosowane zaczyny do uszczelniania rur w otworach wiertniczych w zakresie temperatur do 45°C. Są to głównie zaczyny do uszczelniania kolumny rur 9½”, oraz jeden zaczyn, który stosowano podczas uszczelniania kolumny rur 7”. W tabeli 2 zestawiono otrzymane wyniki badań. Badania parametrów reologicznych zostały wykonane przy użyciu lepkościomierza obrotowego Ofite model 900. Dokonano pomiaru zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi (τ) a szybkościami ścinania ($\dot{\gamma}$). Zmierzona została wartość lepkości plastycznej oraz granica płynięcia. Uzyskane wartości zestawiono w tabeli 2.

Analizowane wartości filtracji zaczynów badano za pomocą prasy filtracyjnej HPHT, Model 7120 firmy Chandler, która służy do pomiaru filtracji zaczynów cementowych w warunkach dynamicznych.

Tabela 1. Składy zaczynów wytypowanych do badań

Table 1. Composition of the slurries selected for the tests

SKŁAD z otworu	G2	R12	B26	D4	S1
Kolumna ["]	7	9½	9½	9½	9½
Głębokość [m]	1500	1250	1000	1300	1400
Temperatura [°C]	35	40	40	40	45
Ciśnienie [MPa]	7	10	8	10	15
Woda wodociągowa	w/c = 0,80	w/c = 0,54	w/c = 0,80	w/c = 0,48	w/c = 0,98
Bentonit (bwow)	2,0	–	1,2	–	1,5
KCl (bwow)	–	3,0	–	3,0	–
NaCl	–	–	20,0	–	10,0
Dodatek odpieniający [%]	1,0	0,5	0,3	0,5	0,5
Dodatek antyfiltracyjny	0,5	0,1	–	0,2	–
Dodatek upłynniający	0,3	0,3	0,1	–	0,1
Dodatek opóźniający	–	0,15	0,1	0,3	0,45
Lateks	18,0	8,0	–	10,0	–
Stabilizator lateksu	1,0	0,5	–	1,0	–
Mikrocement [%]	20,0	10,0	–	20,0	5,0
Mikrosfera	25,0	10,0	5,0	10,0	15,0
Cement CEM G HSR [%]	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Dodatek spęczniający [%]	0,3	0,1	–	0,3	–

Oznaczenia:

w/c – współczynnik wodno-cementowy

bwow – w stosunku do masy wody zarobowej;

pozostałe składniki dodawano w stosunku do masy cementu

Następnym parametrem technologicznym w omawianej grupie zaczynów była statyczna wytrzymałość strukturalna (SWS) oraz czas przejścia (*Transition Time* – TT) pomiędzy wartością wytrzymałości strukturalnej równą 50 Pa, a wartością 250 Pa. Badania wykonano za pomocą urządzenia Static Gel Strength Measurement. Urządzenie pozwala zarejestrować przyrost statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu uszczelniającego w trakcie jego żelowania.

Czas gęstnienia dla analizowanej grupy receptur zaczynów uszczelniających, określono za pomocą konsystometru ciśnieniowego firmy OFITE model 130. Urządzenie pozwala przeprowadzić pomiar zmiany konsystencji zaczynu cementowego w funkcji czasu oraz określić jego czas gęstnienia.

Z próbek stwardniałego zaczynu cementowego analizie poddano wartości uzyskanych parametrów mechanicznych, czyli wytrzymałość na ściskanie, przyczepność do rur stalowych oraz porowatość. Badania wytrzymałości wykonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej firmy Chandler model 4207, która umożliwia pomiar statycznych prób zginania, ściskania, oraz przyczepności kamienia cementowego do stali.

Z kolei badania określające mikrostrukturę stwardniałych zaczynów uszczelniających wykonano za pomocą porozymetru rtęciowego firmy MicroMetrics.

Z uzyskanych wyników pomiarowych wykonane zostały obliczenia statystyczne (tabela 3 i 4) na podstawie, których wyznaczono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i przyczepności do rur stalowych dla poszczególnych próbek

Tabela 2. Parametry wytypowanych zaczynów

Table 2. Parameters of selected slurries

Parametr	Skład	G2	R12	B26	D4	S1
Oznaczenie próbki do obliczeń wytrzymałości		s. 1	s. 2	s. 3	s. 4	s. 5
Kolumna rur ["]		7	9%	9%	9%	9%
Gęstość [kg/m ³]		1360	1600	1600	1700	1440
Rozlewność [mm]		230	240	235	230	250
Lepkość plastyczna [mPa · s]		108,0	60,0	73,5	43,5	54,0
Granica płynięcia [Pa]		5,76	5,76	8,4	13,7	1,44
Filtracja [cm ³ /30 min]		42,0	54,0	198,0	48,0	290
Czas przejścia [godz:min]		1:12	1:00	0:35	0:30	0:38
Czas gęstnienia [godz:min]	30 Bc	4:40	3:02	5:33	4:00	4:22
	100 Bc	5:40	3:54	5:55	4:25	4:48
Przepuszczalność (7 dni) [mD]		0,21	0,18	0,20	0,16	0,19
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	24 godz.	4,8	6,5	8,2	6,8	5,4
	48 godz.	5,9	7,7	10,8	8,1	6,2
Przyczepność do rur [MPa]	24 godz.	2,4	2,6	2,9	2,8	2,5
	48 godz.	3,2	3,7	4,1	4,0	3,6
Porowatość [%]		43,12	39,94	35,25	37,59	41,16

Tabela 3. Obliczenia statystyczne dla uzyskanych wyników badań wytrzymałości na ściskanie próbek stwardniałych zaczynów cementowych deponowanych 24 godziny i 48 godzin w warunkach otworopodobnych.

Table 3. Statistical calculations for the obtained results of compressive strength tests of samples of hardened cement slurries deposited 24 hours and 48 hours in borehole-like conditions

nr składu	czas hydratacji	Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie (<i>Ws</i>) dla trzech próbek stwardniałego zaczynu cementowego [MPa]			Średnia arytmetyczna <i>Ws</i> [MPa]	Odchylenie standardowe z próby	Poziom ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)	Przedział ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)
		próba 1	próba 2	próba 3				
Skład 1	24 godz.	4,7	4,8	4,9	4,8	0,0816	0,2484	4,5516–5,0484
	48 godz.	5,8	5,8	6,0	5,9	0,0943	0,2869	5,5798–6,1535
Skład 2	24 godz.	6,4	6,5	6,5	6,5	0,0471	0,1434	6,3232–6,6101
	48 godz.	7,5	7,7	7,9	7,7	0,1633	0,4969	7,2031–8,1969
Skład 3	24 godz.	8,0	8,2	8,4	8,2	0,1633	0,4969	7,7031–8,6969
	48 godz.	10,5	10,8	11,2	10,8	0,2867	0,8725	9,9609–11,7058
Skład 4	24 godz.	6,5	6,8	7,1	6,8	0,2449	0,7453	6,0547–7,5453
	48 godz.	8,0	8,1	8,2	8,1	0,0816	0,2484	7,8516–8,3484
Skład 5	24 godz.	5,4	5,4	5,5	5,4	0,0471	0,1434	5,2899–5,5768
	48 godz.	6,1	6,2	6,2	6,2	0,0471	0,1434	6,0232–6,3101

Tabela 4. Obliczenia statystyczne dla uzyskanych wyników badań przyczepności stwardniałego zaczynu cementowego do rur stalowych próbek deponowanych 24 godziny i 48 godzin w warunkach otworopodobnych.

Table 4. Statistical calculations for the obtained results of tests of adhesion of the hardened cement slurry to steel pipes of samples deposited 24 hours and 48 hours in borehole-like conditions

Próbka stwardniałego zaczynu cementowego		Wyniki badań przyczepności do rur stalowych (<i>Pr</i>) dla trzech próbek stwardniałego zaczynu cementowego [MPa]			Średnia arytmetyczna <i>Pr</i> [MPa]	Odchylenie standardowe z próby	Poziom ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)	Przedział ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)
nr składu	czas hydratacji	próba 1	próba 2	próba 3				
Skład 1	24 godz.	2,2	2,4	2,6	2,4	0,1633	0,4969	1,9031–2,8969
	48 godz.	3,0	3,2	3,4	3,2	0,1633	0,4969	2,7031–3,6969
Skład 2	24 godz.	2,6	2,6	2,6	2,6	0,0000	0,0000	2,6000–2,6000
	48 godz.	3,7	3,7	3,8	3,7	0,0471	0,1434	3,5899–3,8768
Skład 3	24 godz.	2,5	2,9	3,4	2,9	0,3682	1,1202	1,8131–4,0536
	48 godz.	4,0	4,1	4,2	4,1	0,0816	0,2484	3,8516–4,3484
Skład 4	24 godz.	2,7	2,8	2,8	2,8	0,0471	0,1434	2,6232–2,9101
	48 godz.	3,6	4,0	4,4	4,0	0,3266	0,9937	3,0063–4,9937
Skład 5	24 godz.	2,5	2,5	2,5	2,5	0,0000	0,0000	2,5000–2,5000
	48 godz.	3,5	3,6	3,7	3,6	0,0816	0,2484	3,3516–3,8484

oraz określono przedział ufności (dla przyjętego współczynnika ufności: $1 - \alpha = 0,95$). Zestawiono wartości wytrzymałości na ściskanie stwardniałego zaczynu i przyczepności do rur stalowych dla trzech próbek (zgodnie z PN-EN ISO 10426). Następnie obliczono średnią arytmetyczną wartość analizowanych parametrów w MPa. W kolejnych rubrykach tabel 3 i 4 zamieszczono obliczenia:

- odchylenia standardowego z próby

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

- poziomu ufności^{*)}

$$p_u = t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} \quad (2)$$

- przedziału ufności^{*)}

$$p \left\{ \bar{x} - t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} < x < \bar{x} + t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} \right\} = 1 - \alpha \quad (3)$$

^{*)} W obliczeniach przyjęto współczynnik ufności $1 - \alpha = 0,95$, gdzie:

n – liczebność próby,

x_i – wyniki próby,

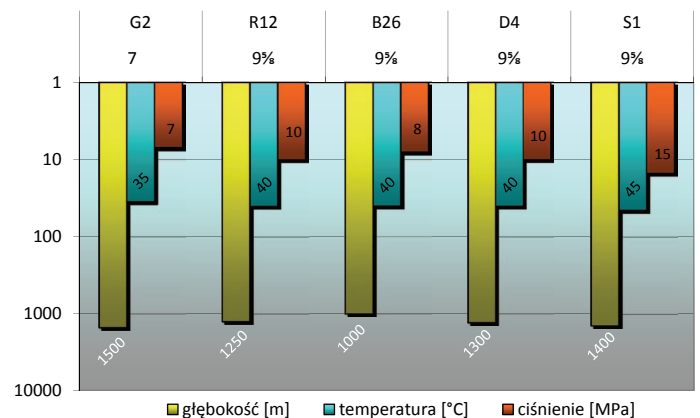
\bar{x} – średnia arytmetyczna z próby,

t_α – wartość zmiennej *t*-Studenta odczytana z tablicy tego rozkładu dla *n*-1 stopni swobody,

p – prawdopodobieństwo, że wytrzymałość na ściskanie kamienia cementowego jest równa $1-\alpha$ w przedziale opisanym równaniem (3).

Analiza warunków otworowych

Analizując składy zaczynów lekkich stosowanych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C (zestawienie tabela 1 oraz rys. 1) zaobserwowano, iż receptury dla kolumn 95%” przeznaczone były do uszczelniania kolumn rur posadowionych w głębokości od 1000 metrów (otwór B26) do głębokości 1400 metrów (otwór S1). Temperatury występujące w tych głębokościach zawierały się w zakresie od 40°C do 45°C, natomiast ciśnienia na dnie otworu wynosiły od 8 MPa do 15 MPa. Kolumna rur 7” w otworze G2 posadowiona była na głębokości 1500 metrów, gdzie temperatura na dnie otworu wynosiła 35°C, a ciśnienie było równe 7 MPa. Zestawienie graficzne głębokości, temperatury i ciśnienia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Porównanie warunków otworowych analizowanych otworów
Fig. 1. Comparison of the borehole conditions of the analyzed boreholes

Analiza receptur zaczynów

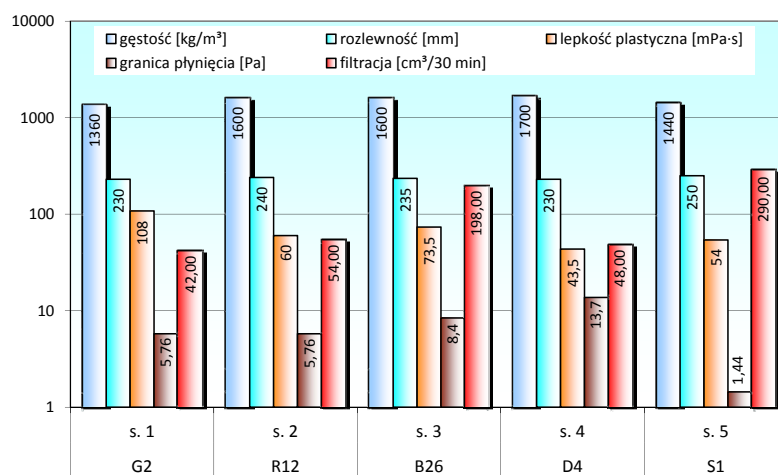
Lekkie zaczyny cementowe przeznaczone do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C zawierały w składzie dodatek mikrosfer w zakresie od 5% BWOC¹ (otwór B26) do 25% BWOC (otwór G7). W grupie analizowanych receptur dwa zaczyny (otwór B26 i otwór S1) posiadały domieszkę bentonitu, którego zadaniem było przeciwdziałanie „rozwarstwianiu” się frakcji o różnych gęstościach. Zaczyny do uszczelniania otworu R12 i D4 sporządzono na wodzie o 3 procentowym zasoleniu chlorkiem potasu, natomiast zaczyn w otworze B26 posiadał 20% chlorku sodu. Parametry technologiczne zaczynów były regulowane odpowiednimi, zestawionymi w tabeli 1, ilościami środków: antyfiltracyjnego, upłynniającego i opóźniającego wiązanie. W analizowanej grupie, receptury z otworu R12 i D4 zawierały odpowiednio 8% i 10% lateksu oraz w celu doszczelnienia matrycy płaszczu cementowego zastosowano dodatek mikrocementu w ilości 10% (otwór R12) i 20% (otwór D4). Zaczyny zawierały 10% mikrosfer. Z kolei zaczyn bez dodatku lateksu (otwór B26) zawierał tylko 5% mikrosfer, a zaczyn użyty do uszczelnienia otworu S1 posiadał 15% mikrosfer i 5% mikrocementu. Natomiast zaczyn użyty do uszczelnienia kolumny 7 cali w otworze G2 posiadał w składzie 2% bentonitu, 18% lateksu oraz ze względu na znaczną 25 procentową ilość mikrosfer zastosowano 20% mikrocementu, aby doszczelnić przestrzeń międzyziarnową zaczynu cementowego. Wszystkie zaczyny sporządzone zostały na wodzie wodociągowej, a spoiwem wiążącym był cement wiertniczy klasy G HSR. Wytypowane do analizy receptury zaczynów zestawione zostały w tabeli 1.

Analiza parametrów świeżych zaczynów

Lekkie zaczyny cementowe stosowane do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C posiadały gęstości w zakresie od 1360 kg/m³ do 1700 kg/m³ (tab. 2, rys. 2). Przy czym najniższą wartość gęstości miał zaczyn przeznaczony do uszczelniania kolumny rur 7 cali w otworze G2. Analizując wartości rozlewności zaczynów to zawarte są one w zakresie od 230 mm dla zaczynu stosowanego w otworze G2 i D4 do wartości 250 mm dla zaczynu z otworu S1. Lepkość plastyczna zaczynów zawiera się w przedziale od 43,5 mPa · s (zaczyn z otworu D4)

do 108 mPa · s (zaczyn z otworu G2). Takie różnice mogą być spowodowane obecnością dużej ilości mikrosfery i bentonitu w zaczynie z otworu G2. Wartości granicy płynięcia zawierały się w przedziale od 1,44 Pa (otwór S1) do 13,7 Pa (otwór D4). Zestawienie przedstawia rysunek 2 oraz wartości w tabeli. 2. Na podstawie analizy powyższych parametrów reologicznych można stwierdzić, iż rozlewność zaczynów jest na porównywalnym poziomie, natomiast lepkość plastyczna wzrasta wraz z udziałem ilości mikrosfer w recepturze zaczynu. Dodatkowym czynnikiem powodującym wzrost lepkości w zaczynie o dużej ilości mikrosfer (otwór G2) jest obecność 2% bentonitu, którego obecność jest niezbędna w celu wyeliminowania frakcjonowania zaczynu.

Najniższe wartości filtracji w lekkich zaczynach przeznaczonych do uszczelniania płytkich otworów o temperaturze do 45°C posiadały receptury zastosowane w otworze G2 i D4 (posiadały one filtrację odpowiednio 42 i 48 cm³/30 min). Natomiast najwyższe wartości odnotowano w zaczynach użytych do uszczelniania otworu S1 (filtracja 176 cm³/30 min). Niskie wartości filtracji mogą być spowodowane obecnością 20% mikrocementu. Zestawienie opisywanych parametrów zamieszczono w tabeli 2 oraz na rysunku 2.



Rys. 2. Porównanie parametrów świeżych zaczynów stosowanych w analizowanej grupie otworów

Fig. 2. Comparison of parameters of fresh cement slurries used in the analyzed group of boreholes

Porównując wyniki badań wzrostu statycznej wytrzymałości strukturalnej analizowanych zaczynów lekkich, a także czas przejścia od wartości 50 Pa do 250 Pa, który dostarcza informacji o możliwości powstrzymania ewentualnej migracji gazu przez zaczyn w trakcie wiązania uzyskano wartości w zakresie od 30 minut do 1 godz. 12 minut. Najkrótszy czas TT posiadał zaczyn przeznaczony do uszczelniania otworu D4 = 30 min. (tab. 2 i rys. 3). Może być to spowodowane obecnością 3-procentowej koncentracji chlorku potasu. Jednak głównym czynnikiem wpływającym na uzyskanie takiego wyniku jest niski

¹BWOC – ang. *by weight of cement* – w stosunku do ilości cementu w zaczynie

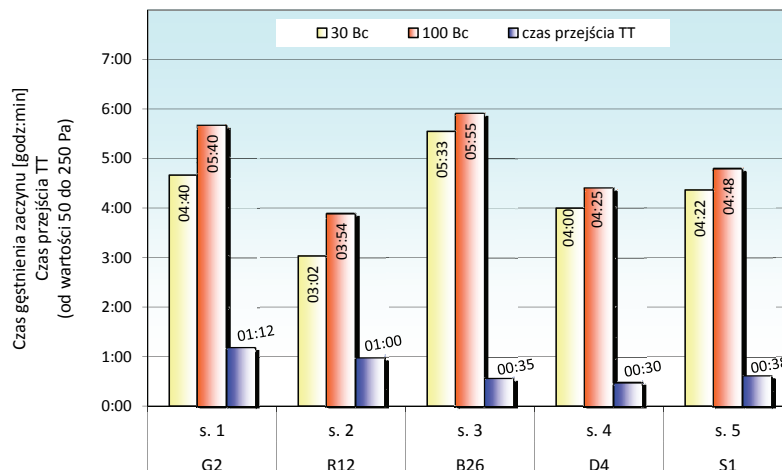
współczynnik wodno-cementowy. Z kolei najdłuższą wartością czasu przejścia podczas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej odnotowano w zaczynie przeznaczonym do uszczelniania otworu G2 (1 godz. 12 min). Może być to spowodowane obecnością 2 procentowej ilości bentonitu w zaczynie. Wyniki badań czasu przejścia podczas badania statycznej wytrzymałości strukturalnej zestawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 3.

Z kolei analizując uzyskane wyniki badań czasu gęstnienia grupy zaczynów lekkich zaobserwowano najkorzystniejsze wartości w zaczynie przeznaczonym do uszczelniania kolumny rur 9 5/8" w otworze R12, natomiast niekorzystne wartości uzyskano podczas badania zaczynu z otworu B26 (najdłuższy czas gęstnienia). Graficzne zestawienie uzyskanych wyników badań przedstawiono na rysunku 3.

Analiza parametrów stwardniałych zaczynów

Podczas analizy badań parametrów stwardniałych lekkich zaczynów skoncentrowano się na parametrach mechanicznych i porowatości próbek. Porównując uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie, najwyższe wartości zaobserwowano w próbce powstałej z zaczynu przeznaczonego do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworze B26. Otrzymano średnią wartość wytrzymałości na ściskanie równą 8,2 MPa po 24 godzinach hydratacji i 10,8 MPa po 48 godzinach hydratacji próbki. Takie wartości mogą być wynikiem najmniejszej ilości mikrosfer, których w tym zaczynie użyto tylko 5%. Próbka z otworu B26 posiada również największą wartość przyczepności do stali (2,9 MPa po 24 godz. i 4,1 MPa po 48 godz.) Z kolei najniższe wartości wytrzymałości na ściskanie uzyskano w próbkach z zaczynów G2 (4,8 MPa po 24 godz. i 5,9 MPa po 48 godz.) oraz S1 (5,4 MPa po 24 godz. i 6,2 MPa po 48 godz.). Próbki te posiadały również najniższe wartości przyczepności do rur stalowych. Takie wyniki można również skorelować z ilością mikrosfer, którego to dodatku w tych zaczynach było największej (odpowiednio 25% w G2 i 15% w S1). Zaczyny te posiadały również największą z badanych ilość wody zarobowej. Uzyskane wyniki badań zamieszczono w tabeli 3, 4 oraz na rysunku 4.

Analizując wartości porowatości uzyskano wartości od minimalnej wynoszącej 35,25% w próbce z otworu B26, do wartości maksymalnej 43,12% w próbce z otworu G2. Wyniki zestawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 4. Obserwowane różnice

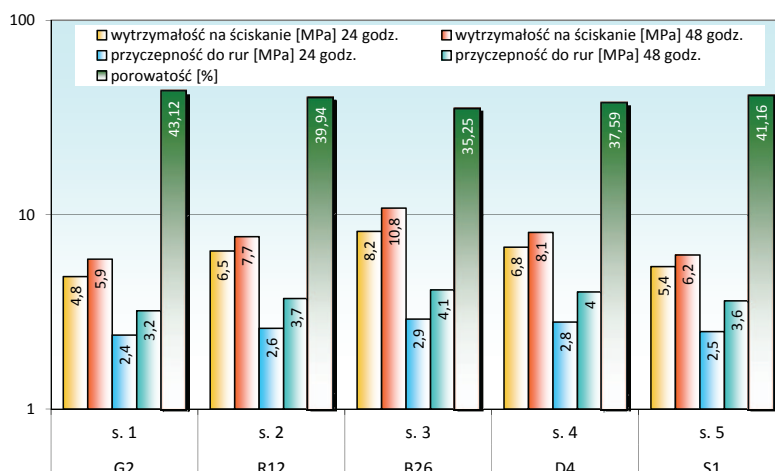


Rys. 3. Porównanie czasów gęstnienia oraz czasu przejścia (Transition Time) zaczynów stosowanych w analizowanej grupie otworów

Fig. 3. Comparison of the thickening times and the Transition Time of the slurries used in the analyzed group of boreholes

w wynikach dla badanych próbek zaczynów lekkich mogą być spowodowane ilością dodatku mikrosfery oraz stosunkiem wodno-cementowym.

Na podstawie wykonanej analizy parametrów technologicznych lekkich zaczynów cementowych wyciągnięto konkluzję, że w badanej grupie zaczynów parametry technologiczne są zbliżone, a ewentualne różnice wynikają głównie z ilości mikrosfer stosowanych w celu regulacji gęstości zaczynu oraz z ilości wody zarobowej. Przeprowadzona analiza tych parametrów miała na celu „wychwycenie” zaczynów o mniej korzystnych wartościach parametrów technologicznych i w konsekwencji wprowadzenie modyfikacji receptur. Stwierdza się, że korzystnym działaniem będzie poprawa wczesnej wytrzymałości płaszcza cementowego tworzącego się z zaczynów zawierających znaczną ilość wypełniaczy lekkich.



Rys. 4. Porównanie parametrów stwardniałych zaczynów cementowych w analizowanej grupie otworów

Fig. 4. Comparison of parameters of hardened cement slurries in the analyzed group of boreholes

Wnioski

Na podstawie analizy parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych lekkich zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych płyt-kich otworów o temperaturze do 45°C można postawić następujące wnioski:

- analizowane zaczyny cementowe użyte do uszczelniania przestrzeni pierścieniowej płytkich otworów o temperaturze do 45°C posiadają zbliżone wartości parametrów technologicznych;
- analizując wartości lepkości plastycznej analizowanej grupy zaczynów zaobserwowano, że zaczyn o największej gęstości posiadał najmniejszą lepkość, a zaczyn o najniższej wartości gęstości miał najwyższą lepkość. Takie zachowanie może być spowodowane znaczną ilością mikrosfer i obecnością bentonitu, który powoduje wzrost lepkości w celu utrzymania lekkich frakcji;
- w analizowanej grupie zaczynów najniższa wartość filtracji była w zaczynie zawierającym 20% mikrocementu, z kolei zaczyn z dodatkiem 5% mikrocementu posiadał filtrację 290 cm³/30 minut. Świadczy to o mocnym wypełnieniu przestrzeni międzyziarnowej płynnego zaczynu poprzez dodanie mikrocementu. Dodatek ten powoduje obniżenie filtracji;
- zaczyn zawierający 3% chlorku potasu posiadał najkrótszy czas przejścia TT. Jednak największy wpływ na skrócenie czasu przejścia pomiędzy 50 Pa a 250 Pa podczas badania statycznej wytrzymałości strukturalnej ma zaczyn o niskim współczynniku wodno-cementowym D4. Z kolei, duża ilość bentonitu 2% w zaczynie G2, skutkowałą wydłużeniem wartości czasu przejścia TT;
- najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie odnotowano w próbce powstałej z zaczynu B26, w której to recepturze zastosowano najmniejszą (5%) koncentrację dodatku mikrosfer;
- niskie wartości wytrzymałości mechanicznej na ściskanie w próbkach G2 i S1 spowodowane były znaczną ilością mikrosfer 25% i 15%. Ponadto do uzyskania tak niskich wartości wytrzymałości mechanicznej przyczyniła się również znaczna ilość wody zarobowej w zaczynie cementowym;
- uzyskane wartości przyczepności do rur stalowych korelują się z wartościami wytrzymałości na ściskanie. W próbkach o wysokich wartościach wytrzymałości na ściskanie odnotowano podwyższoną wartość przyczepności do rur stalowych, natomiast próbki o niskich wartościach wytrzymałości na ściskanie posiadały także najniższe wartości przyczepności płaszczu cementowego do stali;
- najmniejszą wartość porowatości próbki odnotowano w zaczynie z dodatkiem 5% mikrosfery, a największą

w recepturze o zawartości 25% mikrosfer. Obecność wypełniacza lekkiego powoduje wzrost porowatości i jednocześnie zmniejszenie wartości parametrów mechanicznych płaszczu cementowego z zaczynów lekkich.

Artykuł powstał na podstawie pracy pt.: *Analiza możliwości poprawy parametrów technologicznych zaczynu cementowego za pomocą domieszki grafenu* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0024/KW/2020, nr archiwalny: DK-4100/0024/2020.

Literatura

- Al-Yami A.S., Nasr-El-Din H.A., Al-Humaidi A.S., Al-Saleh S.H., Al-Arfaj M.K., 2010. Evaluation and Optimization of Low-Density Cement: Laboratory Studies and Field Application. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/113090-PA.
- Blanco F., García P., Mateos P., Ayala J., 2000. Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres. *Cem. Concr. Res.*, 30: 1715–1722. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00357-4.
- Brown D.L., Ferg T.E., 2005. The Use of Lightweight Cement Slurries and Downhole Chokes on Air-Drilled Wells. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/84561-PA.
- Chung S.-Y., Abd Elrahman M., Stephan D., Kamm P.H., 2018. The influence of different concrete additions on the properties of lightweight concrete evaluated using experimental and numerical approaches. *Constr. Build. Mater.*, 189: 314–322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.189.
- Dohnalik M., Zalewska J., 2013. Korelacja wyników laboratoryjnych uzyskanych metodą rentgenowskiej mikrotomografii, jądrowego rezonansu magnetycznego i porozymetrii ręcicowej. *Nafta-Gaz*, 10: 735–743.
- 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*, 8: 451–457. DOI: 10.18668/NG.2019.08.01.
- Kremieniewski M., 2020a. Badania środków poprawiających stabilność sedimentacyjną zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 6: 387–395. DOI: 0.18668/NG.2020.06.04.
- Kremieniewski M., 2020b. Recipe of Lightweight Slurry with High Early Strength of the Resultant Cement Sheath. *Energies*, 13: 1583. DOI: 10.3390/en13071583.
- Kremieniewski M., 2020c. Ultra-Lightweight Cement Slurry to Seal Wellbore of Poor Wellbore Stability. *Energies*, 13: 3124. DOI: 10.3390/en13123124.
- Kremieniewski M., 2020d. Zaczyny do uszczelniania otworów w warunkach niskich wartości gradientów ciśnienia szczelinowania skał oraz do prac rekonstrukcyjnych. *Nafta-Gaz*, 2: 102–109. DOI: 10.18668/NG.2020.02.04.
- Kremieniewski M., 2020e. Zmiana parametrów reologicznych zaczynu lateksowego pod wpływem dodatku mikrosfery. *Nafta-Gaz*, 1: 37–45. DOI: 10.18668/NG.2020.01.05.
- Kremieniewski M., Kędzierski M., 2020. Wpływ wybranych domieszek obniżających gęstość na parametry zaczynu cementowego. *Nafta-Gaz*, 3: 143–153. DOI: 10.18668/NG.2020.03.01.
- Kremieniewski M., Stryczek S., 2019. Zastosowanie cementu wysokoglinowego do sporządzania zaczynów uszczelniających w technologiach wiertniczych. *Cement Wapno Beton*, 22/84(3): 215–226.

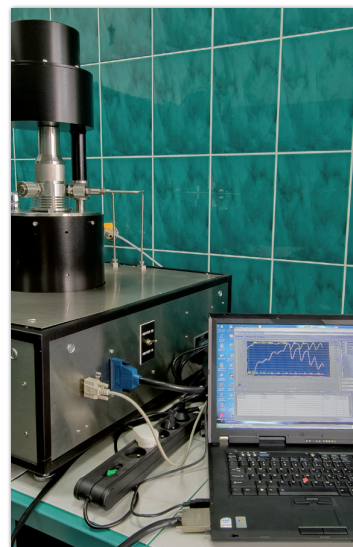
- Kremieniewski M., Stryczek S., Wiśniowski R., Gonet A., 2016. Zmniejszanie porowatości stwardniałych zaczynów wiertniczych poprzez wprowadzenie dodatków drobnoziarnistych. *Cement Wapno Beton*, 21/83(5): 325–335.
- Nelson E.B. (ed.), 1990. Well Cementing. *Schlumberger Educational Service, Houston, Texas, USA*.
- Peng Ya, 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.
- Sadowski Ł., Popek M., Czarnecki S., Mathia T.G., 2017. Morphogenesis in solidification phases of lightweight concrete surface at early ages. *Constr. Build. Mater.*, 148: 96–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.026.
- Shabbar R., Nedwell P., Wu Z., 2017. Mechanical properties of lightweight aerated concrete with different aluminum powder content. *MATEC Web of Conf.*, 120: 02010. DOI: 10.1051/mateconf/201712002010.
- 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.
- Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K., 2007. Kierunki rozwoju badań nad reologią płynów wiertniczych. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 24: 595–607.



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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU TECHNOLOGII WIERCENIA

- opracowywanie składów i technologii sporządzania płuczek wiertniczych, cieczy do dowiercania, opróbowania i rekonstrukcji odwiertów, zaczynów cementowych i mieszanin wiążących dla różnych warunków geologiczno-technicznych wiercenia;
- kompleksowe badania i ocena nowych rodzajów środków chemicznych, materiałów płuczkowych i wiążących, przeznaczonych do sporządzania i regulowania właściwości płuczek wiertniczych i zaczynów cementowych;
- pomiary parametrów technologicznych cieczy wiertniczych i kamienia cementowego w warunkach HPHT;
- badania wpływu cieczy wiertniczych na przewiercane skały;
- dobór płuczek wiertniczych, zaczynów cementowych, cieczy buforowych w celu poprawy skuteczności cementowania otworów wiertniczych;
- badania serwisowe dla bieżących zabiegów cementowania;
- specjalistyczne badania laboratoryjne dotyczące oznaczania: współczynnika tarcia cieczy wiertniczych i napięcia powierzchniowego na granicy faz, czystości i temperatury krystalizacji solanek, typu emulsji, sedymentacji fazy stałej, efektywności wynoszenia zwiercin w otworach kierunkowych i poziomych oraz wyptukiwania osadów ilowych ze skał przed zabiegiem cementowania, odporności na migrację gazu w wiążącym zaczynie cementowym w warunkach otworopodobnych, wczesnej wytrzymałości na ściskanie kamienia cementowego, odporności korozyjnej kamienia cementowego w różnym środowisku złożowym, porowatości oraz przepuszczalności dla gazu kamienia cementowego i skał, zawartości związków chemicznych w cieczach wiertniczych, stopnia toksyczności środków chemicznych i cieczy wiertniczych przy użyciu bioindykatorów;
- badania właściwości fizyczno-mechanicznych skał pod kątem ich zwiercalności.



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