

Marcin Kremieniewski, Marcin Rzepka

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Poprawa szczelności płaszczu cementowego za pomocą innowacyjnych dodatków antymigracyjnych

Podczas wiercenia otworów bardzo istotne jest uzyskanie odpowiedniej szczelności po odwierceniu i zacementowaniu otworu. Wyeliminowanie niekontrolowanych przepływów mediów gazowych w przestrzeni pierścieniowej możliwe jest poprzez uszczelnienie określonego interwału odpowiednio zaprojektowanym zaczynem cementowym. Aby uzyskać takie uszczelnienie należy odpowiednio zaprojektować recepturę zaczynu poprzez przeprowadzenie badań, a następnie odpowiedni dobór dodatków i domieszek do zaczynów. Dostępne w ostatnich latach innowacyjne dodatki przeciwdziałające migracji gazu poddane zostały badaniom w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w celu określenia ich wpływu na parametry technologiczne zaczynu cementowego, a tym samym w celu określenia poprawy szczelności płaszczu cementowego. Dostępne dodatki antymigracyjne to głównie polimery wielkocząsteczkowe. Środki takie z reguły powinny wywierać korzystny wpływ na ograniczenie lub wyeliminowanie możliwości zachodzenia niekontrolowanych przepływów gazu przez wiążący i związany zaczyn cementowy. Jednak bez wykonania szczegółowych badań parametrów technologicznych zaczynów cementowych z wprowadzanymi na rynek środkami nie jest możliwe ich stosowanie w warunkach otworowych. W związku z powyższym w artykule przedstawiono wyniki prac nad oceną parametrów technologicznych zaczynów cementowych z innowacyjnymi środkami antymigracyjnymi. Celem realizowanych prac badawczych było sprawdzenie działania dodatków oraz modyfikacje zaczynów, mające na celu poprawę szczelności płaszczu cementowego wskutek odpowiedniego doboru receptur dla danych warunków otworowych. Oczekiwane rezultaty uzyskano poprzez zastosowanie dostępnych dodatków przeciwdziałających migracji gazu przez świeży i stwardniały zaczyn cementowy. Prowadzone prace badawcze miały na celu określenie skuteczności w przeciwdziałaniu migracji gazu zaczynów modyfikowanych przy użyciu nowych środków oraz ich wpływu na poprawę szczelności płaszczu cementowego.

Słowa kluczowe: migracja gazu, zaczyn cementowy, środki zapobiegające migracji gazu, cementowanie otworów wiertniczych, parametry zaczynu, wiertnictwo.

### Improving the cement sheath sealing by innovative gas migration control additives

The elimination of uncontrolled gas flows in the annular space is possible by sealing a specific interval with a properly designed cement slurry. In order to obtain such a seal, the cement slurry formulation should be properly designed by conducting laboratory tests and then the appropriate selection of additives and admixtures for cement slurries. Innovative gas migration control additives available in recent years have been tested in the Oil and Gas Institute – National Research Institute in order to determine their impact on the technological parameters of cement slurry, and thus to determine the improvement of the tightness of the cement sheath. Available anti-migration additives are mainly high molecular weight polymers. Such additives generally should have a beneficial effect on reducing or eliminating the possibility of uncontrolled gas flows through binding and set cement slurry. However, without performing detailed tests of the technological parameters of cement slurries with the available additives, it is not possible to use them in borehole conditions. Therefore, the paper presents the results of laboratory tests on the evaluation of technological parameters of cement slurries with innovative gas migration control additives. The purpose of the research work was the evaluation of additives and modifications of cement slurries in order to improve of tightness of the cement sheath due to the appropriate selection of recipes for the given borehole conditions. The expected results were obtained by the use of available additives which prevented gas migration through fresh and set cement slurry. The aim of the research work was to determine the effectiveness of modified cement slurries with new additives to prevent gas migration and their impact on improving the tightness of the cement sheath.

Key words: gas migration, cement slurry, gas migration control additives, well cementing, cement slurry parameters, drilling.

## Wprowadzenie

Ze względu na to, że skuteczność zabiegu cementowania rur okładzinowych w znacznym stopniu zależy od odpowiedniego doboru parametrów zaczynu uszczelniającego, wymaga się wprowadzania innowacyjnych i coraz skuteczniejszych środków regulujących powyższe właściwości. Przeznaczenie zaczynu cementowego do uszczelniania otworów wiertniczych wymusza wprowadzanie modyfikacji, skutkujących uzyskaniem wymaganych parametrów reologicznych, gęstości dostosowanej do konkretnych warunków geologiczno-złożowych oraz niskiej filtracji. Powstały z odpowiednio zaprojektowanego zaczynu płaszcz cementowy powinien się charakteryzować wysokimi parametrami mechanicznymi oraz być nieprzepuszczalny dla gazu [7, 12, 21].

Jednym z problemów, z którymi zmagają się serwisy cementacyjne jest możliwość wystąpienia niekontrolowanych przepływów gazu po zacementowaniu, będących wynikiem braku szczelności płaszcza cementowego. W związku z tym projektując recepturę zaczynu mającego za zadanie ograniczenie bądź wyeliminowanie migracji i ekshalacji gazu, należy dostosować dany skład do warunków geologicznych. W tym celu zaczyn powinien posiadać:

- odpowiednio dobraną gęstość oraz parametry reologiczne, a także konsystencję i czas przetłaczalności na poziomie zapewniającym bezawaryjne zatłoczenie zaczynu do otworu i wytłoczenie w miejsce założone w projekcie,

- odpowiedni dla warunków panujących w otworze czas wiązania zaczynu,
- odpowiednią stabilność sedymentacyjną oraz niską filtrację,
- krótki czas przejścia konsystencji zaczynu od 30 Bc do 100 Bc,
- krótki czas przejścia (ang. *Transition Time*) od wartości 50 Pa do wartości 250 Pa podczas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej,
- wzrost objętości zaczynu podczas wiązania (ekspansja zaczynu),
- odpowiednią wytrzymałość mechaniczną stwardniałego zaczynu uszczelniającego,
- jak najmniejszą przepuszczalność dla gazu przez stwardniały zaczyn uszczelniający,
- jak najmniejszą porowatość mikrostruktury stwardniałego zaczynu uszczelniającego,
- maksymalnie skompaktowaną strukturę stwardniałego zaczynu uszczelniającego,
- możliwie prostą technologię sporządzania zaczynu w warunkach przemysłowych [3, 6, 7, 9, 10, 22].

Z uwagi na to, że receptury przeznaczone do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji i ekshalacji gazu muszą spełniać szereg wymagań, niezbędne jest prowadzenie specjalistycznych badań, które pozwalają zaprojektować recepturę dla konkretnych warunków geologiczno-technicznych.

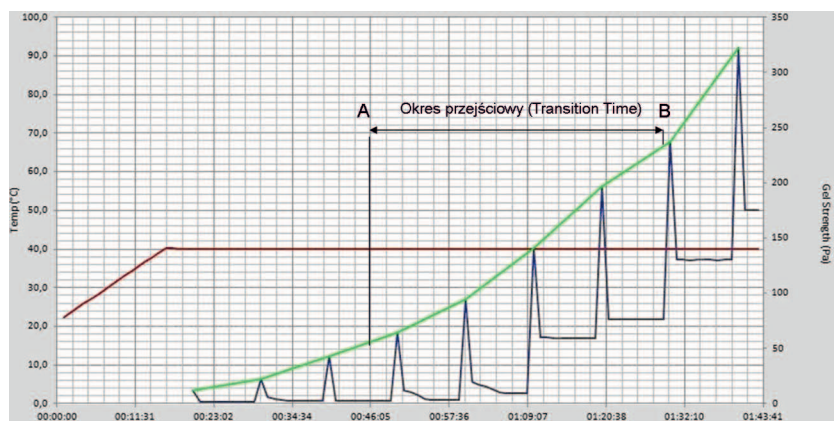
## Przeciwdziałanie migracji gazu przez zaczyn cementowy

Określenie możliwości przeciwdziałania migracji gazu przez wiążący zaczyn cementowy jest możliwe za pomocą analizatora UCA SGSM (fotografia 1). Dzięki temu urządzeniu możliwe jest zbadanie narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu w warunkach otworopodobnych. Urządzenie umożliwia określenie odstępu czasowego od pierwszego wykonanego pomiaru SWS (statycznej wytrzymałości strukturalnej) do czasu, w którym zaczyn cementowy uzyska konsystencję uniemożliwiającą powstawanie nowych kanałów gazowych [11, 10, 15, 17, 19]. Zaczyn cementowy transformuje z fazy ciekłej, poprzez żelową, aż do powstania fazy stałej (stwardniały zaczyn cementowy). Cały ten cykl zmian ma miejsce po wytłoczeniu zaczynu poza rury okładzinowe. Podczas tych zmian zaczyn nie zachowuje się ani jako ciecz, ani jako faza stała, wykazuje jednak cechy możliwe do przypisania obu tym stanom jednocześnie. Podczas transformacji, w związku z hydratacją zaczynu, jego statyczna wytrzymałość strukturalna wzrasta. Odczyt pierwszej wartości SWS następuje w początkowym punkcie przechodzenia ze stanu ciekłego (gdy zaczyn jest w stanie w pełni przekazywać ciśnienie hydrostatyczne) do stanu, w którym następuje

początek spadku ciśnienia hydrostatycznego [1, 2, 4, 11]. Doświadczalnie wyznaczona wartość odpowiadająca temu punktowi wynosi 50 Pa (zaznaczenie A, rysunek 1). Następne punkty pomiarowe rejestrowane są w określonych interwałach czasowych, aż do punktu, w którym zaczyn cementowy traci sposobność przekazywania ciśnienia hydrostatycznego. Punktem tym jest czas początku okresu przejściowego wiązania, a jego wartość wynosi 250 Pa (zaznaczenie B, rysunek 1) [5, 11, 15].



Fot. 1. Ultradźwiękowy analizator cementu z modułem SGSM



Rys. 1. Okres przejściowy zaczynu uszczelniającego

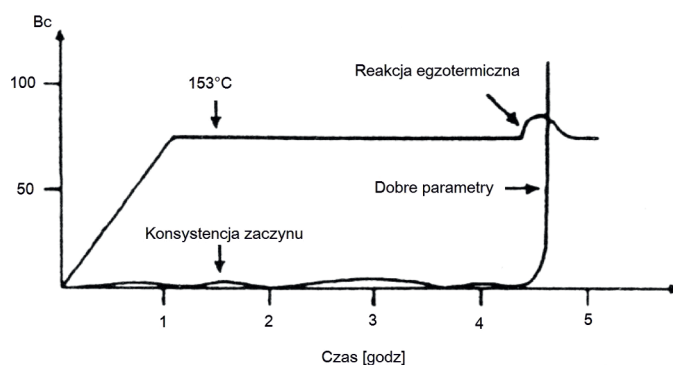
W celu wyeliminowania migracji gazu przez wiążący zaczyn cementowy, a tym samym zwiększenia szczelności płaszczka cementowego wymagane jest stosowanie zaczynów z dodatkami antymigracyjnymi.

Receptury stosowane do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w rejonach występowania migracji gazu są dosyć skomplikowane. Ekshalacje gazu pojawiają się zazwyczaj w obszarach, gdzie problemem podczas wykonywania prac wiertniczych jest występowanie w profilach litologicznych warstw sypkich. Bardzo często ma to miejsce na niewielkich głębokościach. Z uwagi na powyższe aspekty, receptury używane do cementowania zawierają zazwyczaj dodatki polimerów, mikrocementu i lateksu w celu doszczelnienia struktury płaszczka cementowego [20, 23, 24]. W celu zwiększenia efektywności uszczelniania rur okładzinowych, w rejonach o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu stosuje się dodatki do zaczynów umożliwiające zaprojektowanie zaczynów, takich jak:

- **zaczyny typu *gasblock*** – jest to grupa zaczynów, których stosowanie rekomenduje się w rejonie o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji i ekshalacji gazu. Przy projektowaniu i sporządzaniu zaczynów uszczelniających typu *gasblock*, należy uwzględnić opóźnienie czasu budowania początkowej statycznej wytrzymałości strukturalnej. Powyższa cecha zaczynu ma na celu wydłużenie czasu równoważenia ciśnienia złożowego przez ciśnienie hydrostatyczne zaczynu uszczelniającego. Zaczyny te są modyfikowane w taki sposób, aby czasy przejścia (okresy przejściowe *transition time* (rysunek 1) były jak najkrótsze (często poniżej 60 minut), pozwala to wyeliminować możliwość wtargnięcia gazu w strukturę wiążącego płaszczka cementowego [8, 13, 14].
- **zaczyny specjalne typu *Right Angle Set*** – to grupa zaczynów bardzo przydatnych z punktu widzenia przeciwdziałania możliwości powstawania migracji gazu. Zaczyny RAS są zdyspergowanymi systemami niewykazującymi progresywnych tendencji do żelowania. Zaczyny cementowe tego rodzaju wykazują szybkie wiązanie z uwagi na gwałtowną kinetykę reakcji [18]. Ich działanie polega na ciągłym prze-

ciwdziałaniu ciśnieniu złożowemu poprzez ciśnienie hydrostatyczne, wytwarzając od samego początku strukturę o małej przepuszczalności, zabezpieczając jednocześnie ewentualny dopływ gazu. W zaczynach typu RAS następuje gwałtowne gęstnienie od wartości 30 Bc do 100 Bc (rysunek 2) [7, 13, 18]. Wiązanie zaczynu polega na rehydratacji minerałów podlegających hydratacji. Zaczyny RAS wykazują niską temperaturę zanim nastąpi wiązanie, czyli w momencie, gdy konsystencja zaczynu wzrasta do wartości 100 Bc w ciągu kilku minut [18]. Podczas wiązania następuje wzrost temperatury (rysunek 2) oraz

wzrost konsystencji zaczynu wskutek egzotermicznego charakteru reakcji hydratacji. W literaturze [18] podaje się, że wytrzymałość strukturalna tego rodzaju zaczynów różni się od wytrzymałości ocenianej w czasie operacji cementowania. Pomocna jest również obecność w zaczynie dodatków upłynniających oraz obniżających wielkość filtracji z uwagi na ich działanie opóźniające [12].



Rys. 2. Przebieg gęstnienia zaczynu typu „RAS”

Proces migracji gazu wewnątrz płaszczka cementowego następuje wskutek „wtargnięcia” gazu w strukturę wiążącego zaczynu i wytworzenia „kanałków” gazowych. Jest to związane z obniżeniem się ciśnienia hydrostatycznego wiążącego zaczynu cementowego poniżej wartości ciśnienia złożowego. W celu wyeliminowania tego zjawiska parametry zaczynów cementowych są regulowane za pomocą różnego rodzaju dodatków. Są to głównie związki polimerów wielkocząsteczkowych o „zakodowanym” przez dystrybutorów składzie. Działanie tych środków opiera się między innymi na regulacji wody wolnej zaczynu, regulacji filtracji oraz działaniu mającym na celu budowanie wytrzymałości strukturalnej zaczynu w bardzo krótkim czasie. Analiza powyższych mechanizmów reakcji zachodzących w strukturze wiążącego zaczynu cementowego wymusza stosowanie innowacyjnych dodatków antymigracyjnych w celu wyeliminowania migracji gazu przez świeży i stwardniały zaczyn cementowy, a tym samym zwiększenie szczelności płaszczka cementowego [16].

**Przebieg prac badawczych**

Badania, których celem było przeprowadzenie analizy możliwości zwiększenia szczelności płaszczu cementowego za pomocą innowacyjnych dodatków antymigracyjnych wykonano w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających INiG – PIB na podstawie norm: PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*; PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych* oraz API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*.

Przedstawiony w publikacji cykl badawczy polegał na wykazaniu możliwości zwiększenia szczelności płaszczu cementowego poprzez zastosowanie różnego rodzaju dodatków antymigracyjnych. Do badań wytypowane zostały receptury dla warunków otworowych o temperaturze 25°C i 50°C i ciśnieniu odpowiednio 3 oraz 15 MPa. Zaczyny sporządzone zostały przy użyciu cementu portlandzkiego klasy CEM I 32,5R. Do sporządzania zaczynów użyto wodociągowej wody zarobowej.

Wykonane zostały podstawowe badania parametrów decydujących o efektywności uszczelniania kolumn rur okładzinowych, tj. gęstość zaczynu, parametry reologiczne, odstój wody, rozlewność, filtracja zaczynu oraz czas gęstnienia w warunkach otworopodobnych. W celu zbadania właściwości antymigracyjnych badanych zaczynów cementowych przeprowadzono badania statycznej wytrzymałości strukturalnej za pomocą urządzenia UCA SGSM (*Static*

*Gel Strength Measurement*). Powyższe testy pozwoliły wykażać efektywność działania środków mających za zadanie wyeliminowanie migracji gazu przez wiązany i związany zaczyn cementowy. W kolejnym etapie prac wykonano badania przepuszczalności i porowatości, co umożliwiło ocenę wpływu dodatków przeciwdziałających migracji gazu na zwiększenie szczelności stwardniałego zaczynu cementowego.

Cykl badawczy rozpoczęto od wytypowania zaczynu bazowego (Baz) dla warunków otworowych o określonej temperaturze i ciśnieniu. Receptura została poddana modyfikacjom polegającym na zastosowaniu różnego rodzaju dodatków antymigracyjnych (AM 1, AM 2, AM 3, AM 4) w ilości 7% (wagowo w stosunku do masy cementu). Receptury zaczynów oraz ilościowe zawartości poszczególnych dodatków i domieszek zestawiono w tabelcy 1, natomiast w tabelcy 2 przedstawiono

Tablica. 1. Receptury zaczynów cementowych

Temperatura 25°C, ciśnienie 3 MPa	Temperatura 50°C, ciśnienie 15 MPa
Składniki stałe – w/c = 0,52 – dodatek odpieniający – 0,2% – dodatek upłynniający – 0,4% – <b>dodatek antymigracyjny* – 7,0</b> – CaCl <sub>2</sub> – 1,0% – mikrocement – 5,0% – cement CEM I 32,5R – 100%	Składniki stałe – w/c = 0,54 – dodatek odpieniający – 0,3% – dodatek upłynniający – 0,3% – <b>dodatek antymigracyjny* – 7,0</b> – CaCl <sub>2</sub> – 1,0% – mikrocement – 5,0% – cement CEM I 32,5R – 100% – dodatek spęczniający – 0,3%

\* Stała ilość dodatku antymigracyjnego, zmienny rodzaj zastosowanego środka antymigracyjnego (AM1, AM2, AM3, AM4).

Tablica 2. Parametry decydujące o efektywności uszczelniania zaczynów cementowych

Symbol zaczynu	Rodzaj cementu	Temperatura [°C] Ciśnienie hydratacji [MPa]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Rozlewność [mm]	Odstój wody [%]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	Czas gęstnienia* [godz:min]		Odczyty z aparatu Fann [obr/min]					
							30 Bc	100 Bc	600	300	200	100	6	3
Baz**	Cement CEM I 32,5R	25°C 3 MPa	1800	275	1,0	350	01:50	03:30	220	190	140	92	15	8
AM1			1800	270	0,2	491	00:37	02:41	68	36	25	14	4	3
AM2			1800	265	0,2	429	02:03	03:11	68	37	26	15	4	3
AM 3			1800	265	0,2	108	01:32	02:20	152	84	59	33	7	5
AM 4			1800	250	0,0	45	01:46	02:19	230	132	100	58	9	7
Baz**		50°C 15 MPa	1800	255	0,5	310	03:10	05:05	250	215	165	120	30	12
AM 1			1800	250	0,0	428	02:50	04:50	69	39	29	20	9	8
AM 2			1800	240	0,0	348	02:44	04:54	72	46	36	25	14	13
AM 3			1800	240	0,0	18	04:15	04:45	160	91	64	37	9	7
AM 4			1810	230	0,0	12	03:59	04:09	192	110	79	45	7	5

\* Czas dojścia do temperatury: 25°C = 10 min; do temperatury 50°C = 30 min.

\*\* Zaczyn bazowy (Baz) to zaczyn bez dodatku antymigracyjnego.

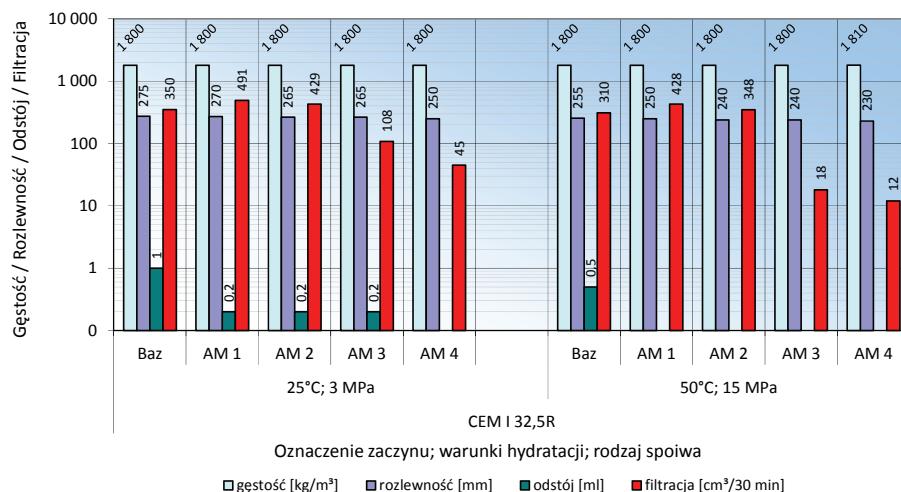
Tablica 3. Parametry reologiczne zaczynów cementowych

Model reologiczny	Parametry reologiczne	Zaczyn numer									
		Baz 1	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	Baz 2	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa · s]	0,0928	0,0238	0,0241	0,0586	0,0929	0,0898	0,0165	0,0135	0,0579	0,0794
	Granica płynięcia [Pa]	4,4633	0,6886	0,6993	1,1030	1,6843	8,7546	2,6955	4,9739	1,7486	1,0811
	Współczynnik korelacji [-]	0,9343	0,9975	0,9984	0,9998	0,9982	0,9368	0,9942	0,9966	0,9998	0,9990
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	16,7607	1,4996	1,3982	2,0832	1,7703	23,3410	4,1346	6,3740	2,9339	1,3330
	Współczynnik konsystencji [Pa · s <sup>n</sup> ]	10,6937	0,0366	0,0468	0,1473	0,4751	18,1190	0,0416	0,0849	0,1782	0,3128
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3643	0,9829	0,9484	0,9008	0,7928	0,3092	0,9546	0,8490	0,8795	0,8277
	Współczynnik korelacji [-]	0,9922	1,0000	0,9999	1,0000	0,9999	0,9955	0,9997	0,9999	0,9999	1,0000

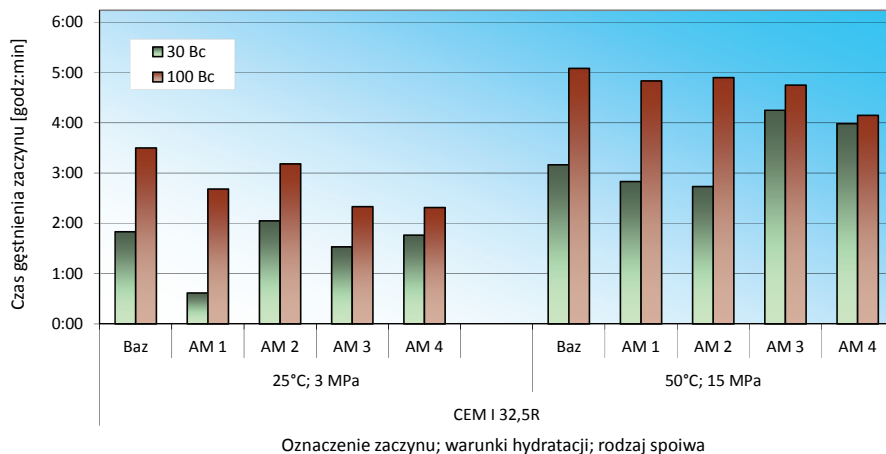
wyniki parametrów decydujących o efektywności uszczelniania zaczynów. Badania parametrów reologicznych polegały na określeniu modelu reologicznego zaczynów uszczelniających, czyli dopasowaniu krzywej reologicznej, która najlepiej opisywała wyniki pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne ( $\tau$ ) – szybkość ścinania ( $\dot{\gamma}$ ) [10, 16]. Obliczenia wykonano za pomocą modelu matematycznego, dopasowanego do krzywych płynięcia cieczy wiertniczych. W tablicy 3 zestawiono parametry reologiczne, oparte o model Cassona oraz Herschela-Bulkleya, ponieważ uzyskano w nich najwyższy współczynnik korelacji.

Analizowane zaczyny z dodatkiem dodatku antymigracyjnego podzielone zostały na dwie grupy. Pierwsza grupa to składki przeznaczone do uszczelniania kolumn rur okładzinowych na głębokościach od około 100 m do 600 m, uszczelnianych w temperaturze oscylującej w okolicach 25°C i ciśnieniu około 3 MPa. Druga grupa receptur to składki przeznaczone do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w głębokościach od 600 m do około 1300 m, gdzie panują temperatury w zakresie około 50°C i ciśnienie w granicach 15 MPa. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, że poddane badaniom dodatki przeciwmigracyjne nie powodują zmiany gęstości zaczynu cementowego (rysunek 3). Widoczne jest nieznaczne obniżenie wartości rozlewności zaczynów wskutek zastosowanych dodatków antymigracyjnych. Trend ten jest zauważalny zarówno w grupie

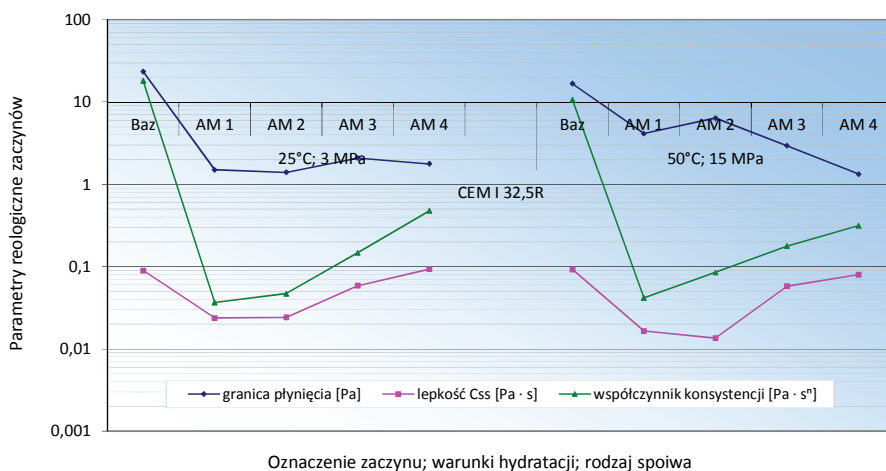
receptur dla temperatury 25°C, jak i w zaczynach przeznaczonych do uszczelniania otworów w temperaturze 50°C (rysunek 3). Również wartość odstoju wody została obniżona lub wyeliminowana wskutek zastosowania badanych dodatków antymigracyjnych. Jednak podczas analizy wyników badań widoczny jest wzrost wartości filtracji (w porównaniu do zaczynu bazowego Baz) wskutek zastosowania dodatku antymigracyjnego AM 1 oraz AM 2 (tablica 2 oraz rysunek 3). Dodatki antymigracyjne AM 3 oraz AM 4 powodują znaczne obniżenie filtracji, przy czym wartości w temperaturze 50°C są znacznie niższe niż w temperaturze 25°C (tablica 2 oraz rysunek 3). Analizując uzyskane czasy gęstnienia zaczynów zmodyfikowanych badanymi dodatkami antymigracyjnymi stwierdzono, że najlepsze właściwości wykazywały dodatki AM 3 oraz AM 4. Zastosowanie ich skutkowało



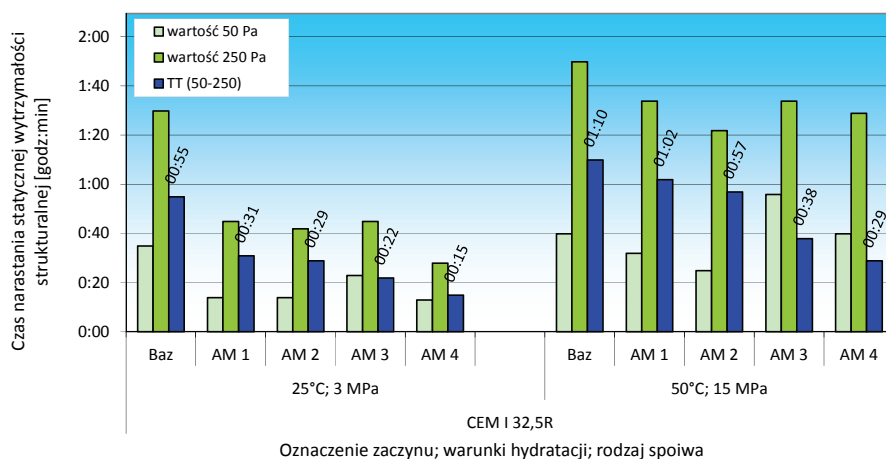
Rys. 3. Zestawienie wyników gęstości, rozlewności, odstoju oraz filtracji zaczynów cementowych



Rys. 4. Zestawienie pomiarów czasu gęstnienia zaczynów cementowych



Rys. 5. Zestawienie wyników badań parametrów reologicznych zaczynów cementowych



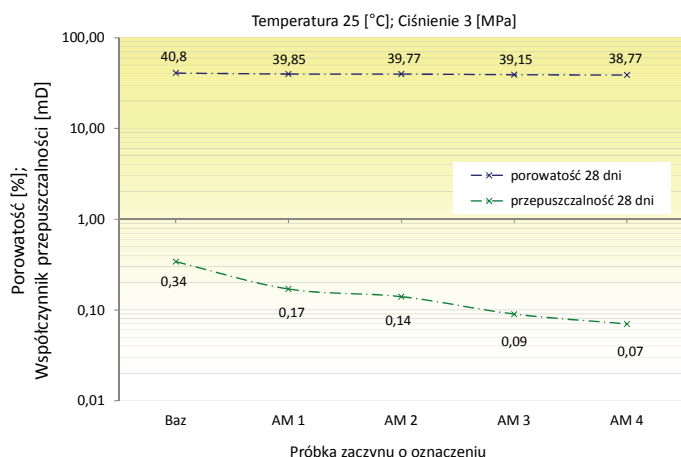
Rys. 6. Zestawienie pomiarów wytrzymałości strukturalnej i czasu przejścia (ang. *transition time*) zaczynów cementowych

tylko nieznacznym skróceniem czasu gęstnienia, jednak uzyskano znacznie krótszy odstęp czasowy od wartości 30 Bc do wartości 100 Bc (rysunek 3). Takie działanie badanych dodatków jest pożądane podczas uszczelniania złóż o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu. Zastosowanie dodatków antymigracyjnych spowodowało również obniżenie

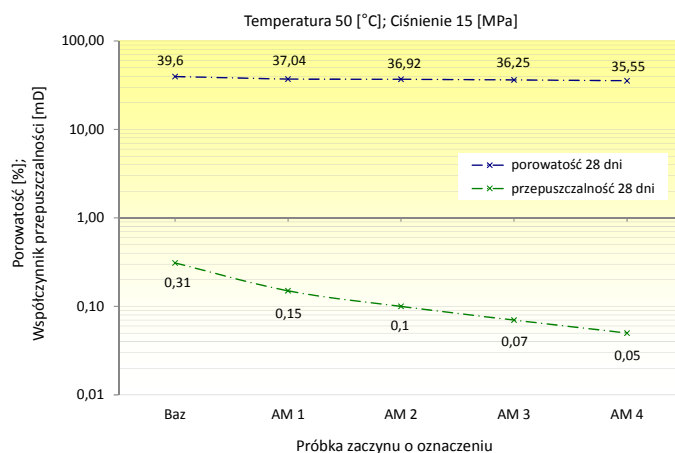
parametrów reologicznych (rysunek 5), przy czym najmocniejsze upłynnienie zaczynu spowodowały dodatki AM 1 i AM 2. Na rysunku 6, który przedstawia wartości wytrzymałości strukturalnej zaczynów, widoczne jest skrócenie czasu przejścia (ang. *transition time*) od wartości 50 Pa do wartości 250 Pa wskutek zastosowanych dodatków. Przy czym dodatki antymigracyjne AM 3 oraz AM 4 spowodowały znacznie mocniejsze skrócenie czasu przejścia niż AM 1 oraz AM 2. Analizowane zaczyny z dodatkami przeciwdziałającymi migracji gazu wykazywały znacznie krótsze czasy przejścia w temperaturze 25°C, niż w temperaturze 50°C (rysunek 6). Jest to bardzo korzystne ze względu na krótszy czas zabiegu cementowania otworów o mniejszej głębokości.

Ze względu na to, że prowadzone modyfikacje zaczynów analizowane były w aspekcie zwiększenia szczelności płaszcza cementowego, wykonane zostały dodatkowe badania struktury stwardniałych zaczynów. Wykonano badania porowatości za pomocą porozymetru rtęciowego oraz przepuszczalności dla gazu przy użyciu przepuszczalnościomierza gazowego. Próbkę stwardniałych zaczynów cementowych poddano badaniom po 28 dniach hydratacji w warunkach otworopodobnych (temperatura i ciśnienie). Uzyskane wyniki badań porowatości oraz przepuszczalności stwardniałych zaczynów cementowych pozwoliły stwierdzić, że modyfikacje poprzez zastosowanie dodatków antymigracyjnych skutkują obniżeniem zarówno wartości porowatości, jak i przepuszczalności (rysunki 7 i 8). Obniżenie wartości porowatości w temperaturze 25°C wynosi 2,03% (w stosunku do wartości początkowej) natomiast w temperaturze 50°C wynosi 4,05% (od wartości bazowej). Przepuszczalność w temperaturze 25°C została obniżona z wartości 0,34 mD do wartości 0,07 mD, natomiast w temperaturze 50°C z wartości 0,31 mD do wartości 0,05 mD.

Konkluzje, jakie wyciągnięto na podstawie zrealizowanych prac badawczych pozwalają stwierdzić, że modyfikacje za pomocą innowacyjnych dodatków antymigracyjnych powodują zwiększenie szczelności płaszcza cementowego. Polimerowe dodatki, stosowane w celu przeciwdziałania migracji



Rys. 7. Zestawienie wyników badań porowatości i przepuszczalności stwardniałych zacinów cementowych (próbki dla: temperatury 25°C, ciśnienia 3 MPa)



Rys. 8. Zestawienie wyników badań porowatości i przepuszczalności stwardniałych zacinów cementowych (próbki dla: temperatury 50°C, ciśnienia 15 MPa)

gazu przez świeży zacin cementowy, powodują wyeliminowanie powstawiania odstoju wody, skrócenie czasu gęstnienia (głównie przejścia od wartości 30 Bc do wartości 100 Bc) oraz obniżenie parametrów reologicznych (lepkości plastycznej, współczynnika konsystencji i granicy płynięcia). Filtracja zacinów może niekiedy ulec wzrostowi, jednak takie działanie nie deklasuje danego dodatku, ale należy wówczas zastosować odpowiedni rodzaj dodatku antyfiltracyjnego. Stosowanie dodatków przeciwdziałających migracji gazu skutkuje głównie skróceniem czasu budowania statycznej wytrzymałości strukturalnej (przejście od wartości 50 Pa do wartości 250 Pa).

Rozpatrując obecność dodatków przeciwdziałających migracji gazu w aspekcie zwiększenia szczelności płaszczu cementowego, należy wspomnieć o obniżeniu porowatości i przepuszczalności zacinów wskutek zastosowanych dodatków antimigracyjnych. Taki wpływ na strukturę stwardniałego zacinu cementowego skutkuje zwiększeniem szczelności w długoletnim czasie eksploatacji odwiertu. Bardziej skompaktowana i nieprzepuszczalna mikrostruktura stwardniałego zacinu wykazuje większą odporność korozyjną oraz trwałość, co jest warunkiem niezbędnym przy projektowaniu receptur zacinów uszczelniających.

## Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Stosowane dodatki przeciwdziałające migracji gazu nie powodują zmiany gęstości zacinu cementowego, a ich użycie skutkuje wyeliminowaniem odstoju wody.
2. Działanie dodatków antimigracyjnych wpływa na zwiększenie szczelności płaszczu cementowego, poprzez dokładniejsze wypełnienie cementowanej przestrzeni pierścieniowej i lepsze usunięcie pozostałości niewyflukanego osadu filtracyjnego oraz uzyskanie turbulentnego przepływu cieczy wskutek niższych wartości parametrów reologicznych.
3. Uzyskanie krótkiego czasu budowania statycznej wytrzymałości strukturalnej oraz krótkiego odstępu czasowego od wartości 30Bc do wartości 100 Bc podczas badania czasu gęstnienia pozwala stwierdzić, że dodatki antimigracyjne wpływają na zwiększenie szczelności płaszczu cementowego. Jest to związane z pewnego rodzaju „zaciskaniem” ewentualnych dróg migracji gazu, mogących tworzyć się po wtłoczeniu zacinu w cementowaną przestrzeń pierścieniową.
4. Stosowanie dodatków antimigracyjnych, pomimo korzystnego wpływu na parametry technologiczne zacinu, może powodować wzrost wartości jego filtracji zacinu. Takie zachowanie wymaga zastosowania dodatków antyfiltracyjnych.
5. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, że otrzymane w efekcie prowadzonych modyfikacji receptury i powstałe według nich stwardniałe zaciny cementowe powodują wzrost szczelności płaszczu cementowego wskutek uzyskania nieprzepuszczalnej mikrostruktury, charakteryzującej się obniżoną wartością porowatości.
6. Należy mieć na uwadze, że na zwiększenie szczelności płaszczu cementowego wpływa wiele czynników. Powyższe wręcz wymusza prowadzenie analiz wyników badań receptur w odniesieniu do konkretnych warunków geologiczno-technicznych. Pomocą podczas rozwiązywania tego rodzaju problemów jest ciągle prowadzenie badań zacinów typowanych do zabiegu cementowania oraz ich modyfikacja. Oczywiście jest to, że tego rodzaju badania należy wykonywać w laboratorium, na specjalistycznej, przeznaczony do tego celu aparaturze.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2018, nr 6, s. 457–464, DOI: 10.18668/NG.2018.06.06

Artykuł nadesłano do Redakcji 16.03.2018 r. Zatwierdzono do druku 23.04.2018 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt.: *Analiza możliwości poprawy efektywności uszczelniania rur okładzinowych poprzez zastosowanie nowych dodatków do zaczynów cementowych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW, nr zlecenia: 35/KW/15, nr archiwalny: DK-4100/35/15 oraz na podstawie badań własnych.

## Literatura

- [1] Barron A.R.: *Hydratation of Portland Cement*. <http://cnx.org/content/m16447/latest/> (dostęp: 26.01.2014).
- [2] Bonett A., Pafitis D.: *Getting to the Root of Gas Migration*. *Oilfield Review*, Spring 1996, vol. 8, nr 1, s. 36–49.
- [3] Dębińska E.: *Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki*. *Nafta-Gaz* 2015, nr 5, s. 290–300.
- [4] Dębińska E.: *Wyznaczanie statycznej wytrzymałości strukturalnej i wczesnej wytrzymałości mechanicznej zaczynów cementowych*. *Nafta-Gaz* 2013, nr 2, s. 134–142.
- [5] Gawlik P., Szymczak M.: *Migracje gazowe w przestrzeniach międzyrurowych otworów realizowanych na przedgórzu Karpat*. *Nafta-Gaz* 2006, nr 7–8, s. 349–358.
- [6] Habrat S., Raczkowski J., Zawada S.: *Technika i technologia cementowań w wiertnictwie*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1980, 498 s.
- [7] Kremieniewski M.: *Ocena przepuszczalności kamieni cementowych pod kątem ograniczenia migracji gazu*. *Prace Naukowe INiG – PIB* 2014, nr 196, 155 s.
- [8] Kremieniewski M.: *Ograniczenie ekshalacji gazu w otworach wiertniczych poprzez modyfikację receptur oraz kształtowanie się struktury stwardniałych zaczynów cementowych*. *Prace Naukowe INiG – PIB* 2016, nr 199, 390 s.
- [9] Kremieniewski M.: *Poprawa stabilności sedymentacyjnej zaczynów cementowych*. *Prace Naukowe INiG – PIB* 2017, nr 216, 145 s.
- [10] Kremieniewski M., Rzepka M., Dębińska E.: *Statyczna wytrzymałość strukturalna zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 9, s. 608–616.
- [11] Kremieniewski M., Rzepka M., Stryczek S., Wiśniowski M.: *Comparison of gas migration test and building structural strength of slurry in the aspect of limiting gas invasion*. *AGH Drilling, Oil, Gas Quarterly* 2016, vol. 33, s. 595–608.
- [12] Kremieniewski M., Rzepka M.: *Celowość prowadzenia prac badawczych nad nowymi środkami obniżającymi filtrację zaczynów cementowych*. *Nafta-Gaz* 2017, nr 8, s. 583–590, DOI: 10.18668/NG.2017.08.05.
- [13] Kremieniewski M., Rzepka M.: *Przyczyny i skutki przepływu gazu w zacementowanej przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego oraz metody zapobiegania temu zjawisku*. *Nafta-Gaz* 2016, nr 9, s. 722–728, DOI: 10.18668/NG.2016.09.06.
- [14] Kremieniewski M., Rzepka M.: *Zaczyny typu Gas-Stop przeznaczone do uszczelniania otworów kierunkowych i horyzontalnych*. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze* 2013, nr 9, s. 4–9.
- [15] Kremieniewski M., Rzepka M.: *Zapobieganie niekontrolowanemu wypływowi gazu z otworów wiertniczych na etapie projektowania zaczynów cementowych*. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze* 2015, nr 11, s. 4–8.
- [16] Kremieniewski M., Stryczek S., Wiśniowski R.: *Correlation of parameters describing microstructure of hardened cement slurry for the purpose of increasing tightness of cement mantle*. *AGH Drilling, Oil, Gas Quarterly* 2014, vol. 31, nr 3, s. 413–420.
- [17] Mammadbayli R., Greener J.: *Foamed cement successfully applied in shallow water environment in Caspian Sea*. *Drilling Contractor* 2006, nr 9/10, s. 64–69.
- [18] Nelson E.B. et al.: *Well Cementing*. Schlumberger Educational Service, Houston, Texas 1990, 773 s.
- [19] Rogers M.J., Dillenbeck R.L., Eid R.N.: *Transition time of cement slurries, definitions and misconceptions, related to annular fluid migration*. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas 26–29.09.2004.
- [20] *Rzeczpospolita łupkowa. Studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych*. Praca zbiorowa. *Prace Naukowe INiG* 2012, nr 183, 310 s.
- [21] Stryczek S., Gonet A.: *Kierunki ograniczania migracji gazu z przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego*. WUG: Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 2005, nr 3, s. 10–13.
- [22] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła–Płotki 2001.
- [23] Stryczek S., Wiśniowski R., Uliasz-Misiak B., Złotkowski A., Kotwica Ł., Rzepka M., Kremieniewski M.: *Studia nad dobozem zaczynów uszczelniających w warunkach wierceń w basenie pomorskim*. Wydawnictwo AGH 2016, 222 s.
- [24] Uliasz M., Kremieniewski M.: *Minimalizacja możliwości wystąpienia migracji gazu w rejonie przedgórza Karpat*. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze* 2015, nr 8, s. 18–22.



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



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