

Marcin Kremieniewski, Marcin Rzepka, Edyta Dębińska

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Statyczna wytrzymałość strukturalna zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu

Problematyka ograniczenia migracji gazu ziemnego przez zaczyn uszczelniający w trakcie jego wiązania jest zagadnieniem, z którym zmagają się wiele placówek badawczych w kraju i na świecie. Bardzo często podejmowane są prace mające na celu określenie przyczyn powstawania migracji gazu oraz prognozowanie możliwości tworzenia się łączności międzyporowej w strukturze kamienia cementowego. Zaczyn uszczelniający ulega transformacji wraz z upływającym czasem, przechodząc ze stanu płynnego poprzez narastający stan żelowy aż do osiągnięcia struktury stanu stałego (po całkowitym związaniu). Takie zachowania zaczynu cementowego sprawia, że rozpatrywanie zjawiska migracji gazu powinno być uwzględniane w trakcie powstawania poszczególnych faz. W związku z powyższym do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu należy stosować zaczyny typu GASBLOCK<sup>1</sup>, w których narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej będzie zaprojektowane w taki sposób, aby uniemożliwić wtargnięcie gazu w strukturę wiążącego płaszcz cementowego. W artykule przedstawiono zaczyny typu GASBLOCK, o parametrach, które znacznie ograniczają lub zapobiegają przechodzeniu gazu, umożliwiając tym samym stosowanie ich w otworach o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu.

Słowa kluczowe: cementowanie otworów gazowych, migracja gazu, zaczyny cementowe.

### Static gel strength of GASBLOCK slurries for sealing boreholes with an increased risk of gas migration

Migration reduction of natural gas by sealing slurry during its binding is an issue which faces many research institutions at home and around the world. Very often work is undertaken to determine the causes of gas migration and forecasting the possibility of the formation of gas communication in the cement stone structure. Sealing slurry is transformed with the passage of time going from a liquid through an increasing gel state to an impermeable structure after hardening. Such behavior of cement slurry demands that the examination of the phenomenon of gas migration be taken into account at the different phases of formation. Therefore, for the sealing of wellbores with a higher risk of gas migration GASBLOCK type slurries in which the static gel strength build-up will be designed in such a way as to prevent the ingress of gas into the structure of the binding cement sheath should be used. The paper presents the GASBLOCK type slurries which parameters significantly reduce or prevent the passage of gas, thus allowing its use in holes with an increased risk of gas migration.

Key words: cement slurries gas, migration gas, wells cementation.

<sup>1</sup> GASBLOCK – jest to grupa zaczynów mających na celu zapobieganie migracji gazu.

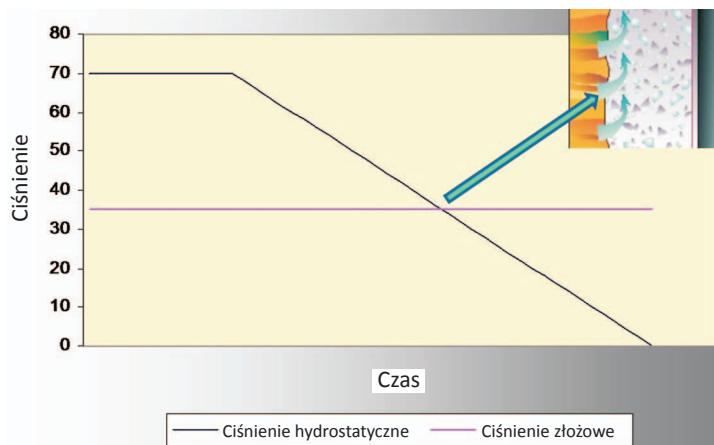
## Wprowadzenie

Problem przepływu gazu w przestrzeni pierścieniowej w trakcie cementowania i po zacementowaniu rozpatrywany jest od ponad pięćdziesięciu lat. Projektowane zaczyny są modyfikowane za pomocą różnego rodzaju dodatków i domieszek, mających na celu poprawę parametrów płaszcza cementowego. Jednak migrujący gaz ciągle się pojawia, w szczególności, gdy mamy do czynienia z przewiercanymi płytkimi utworami geologicznymi o niezakończonych kompaktacji i diagenzie – ze względu na obniżone ciśnienie nadkładu [8]. Na Przedgórzu Karpackim obniżone ciśnienie spowodowane jest niewielką głębokością zalegania warstw gazonośnych. Zrozumienie zjawiska migracji gazu przez przestrzeń międzyrurową i pozarurową wymaga znajomości procesów zachodzących podczas wiązania zaczynu oraz obniżania się ciśnienia hydrostatycznego w obrębie cementowanej kolumny rur.

Zaczyn uszczelniający po zatłoczeniu do przestrzeni pierścieniowej wiąże w czasie dopasowanym do warunków otworowych. Płynny płaszcz cementowy przeciwdziała ciśnieniu złożowemu, transmitując ciśnienie hydrostatyczne. Następnie, w początkowym etapie wiązania, zaczyn żeluje i rozpoczyna się budowanie statycznej wytrzymałości strukturalnej. Na tym etapie następuje redukcja ciśnienia hydrostatycznego słupa zaczynu uszczelniającego. Spadek ciśnienia hydrostatycznego jest większy w przypadku warstw przepuszczalnych, kiedy to mamy do czynienia z dużą filtracją zaczynu w strefę chłonną. Gdy ciśnienie hydrostatyczne osiągnie wartość niższą od ciśnienia złożowego poziomu gazonośnego (rysunek 1), gaz zaczyna migrować do strefy o niższym ciśnieniu (w strukturę zaczynu uszczelniającego). Przestaje on migrować wówczas, gdy uzyska wartość statycznej wytrzymałości strukturalnej na poziomie uniemożliwiającym dalszy przepływ gazu przez zaczyn uszczelniający. Wartość ta została wyznaczona doświadczalnie i wynosi 240 Pa [5, 15, 18].

Problemy wynikające z ryzyka występowania migracji gazu wymuszają stosowanie specjalnych zaczynów GASBLOCK – poprawiających skuteczność uszczelniania przestrzeni pozarurowej, dzięki odpowiednio dopracowanej statycznej wytrzymałości strukturalnej.

W związku z powyższym jednym z ważniejszych parametrów wpływających na zapobieganie migracji gazu w trakcie wiązania zaczynu uszczelniającego jest badanie statycznej wytrzymałości strukturalnej (ang. *SGS – static gel strength*) zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów wierconych w złożach gazowych. Aby zapobiec możliwości wtargnięcia gazu w strukturę wiążącego zaczynu uszczelniającego, należy tak modyfikować recepturę zaczynu, by uzyskać możliwie krótki czas przejścia TT (ang. *Transition Time*). Prawdopodobieństwo powstawania kanalików gazowych w strukturze żelującego zaczynu uszczelniającego jest tym mniejsze, im krótszy jest czas TT. Badania wykazują, że dla typowych zaczynów cementowych bez dodatków opóźniających czas TT wynosi do 3 godzin, natomiast zaczyny przeznaczone do uszczelniania złóż o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu charakteryzują się czasami znacznie krótszymi, często nieprzekraczającymi 1 godziny.



Rys. 1. Obniżenie ciśnienia hydrostatycznego wiążącego zaczynu uszczelniającego

## Statyczna wytrzymałość strukturalna zaczynów GASBLOCK

Jedną z podstawowych przyczyn migracji gazu na etapie cementowania jest wywieranie zbyt niskiego ciśnienia hydrostatycznego kolumny zaczynu w stosunku do ciśnienia złożowego. Jak już wspomniano, zaczyn cementowy po wtłoczeniu do przestrzeni pierścieniowej zachowuje się w początkowym etapie jak ciecz, a później – podczas transformacji żeluje, czyli następuje budowanie statycznej wytrzymałości strukturalnej. Staranny dobór parametrów procesu żelowania zaczynu umożliwia utrzymywanie założonego ciśnienia

hydrostatycznego, co wiąże się z zapobieganiem migracji gazu w strukturę cementu. Umożliwia to także zachowanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej kamienia cementowego powstałego po związaniu zaczynu uszczelniającego, gdyż zminimalizowany zostaje udział makroporów wytworzonych przy penetracji gazu przez niezwiązany zaczyn (fotografia 1).

Prawdopodobieństwo wystąpienia migracji gazu jest często możliwe do przewidzenia. Prognozowanie potencjalnych problemów, które mogą powstać w wyniku przepływu gazu



Fot. 1. Makropory powstałe przez inwazję gazu w strukturę wiążącego zaczynu cementowego

przez zaczyn uszczelniający, w pewnym stopniu pozwala na uniknięcie kosztów związanych z zabiegiem docementowania.

Statyczna wytrzymałość strukturalna powinna być dobrą na takim poziomie, aby od samego początku zapobiegać wtargnięciu gazu w strukturę żelową. Utrata przez kolumnę cementową zdolności do przekazywania ciśnienia hydrostatycznego, czyli zapobiegania inwazji gazu, jest proporcjonalna do poziomu budowy SWS, co można określić poniższym równaniem:

$$P_{\max} = \left[ \frac{SWS}{300} \cdot \frac{L}{D} \right] \cdot 0,07 \quad (1)$$

gdzie:

$P_{\max}$  – maksymalne spodziewane ciśnienie oporu przepływu,

$SWS$  – statyczna wytrzymałość strukturalna [lb/100 ft<sup>2</sup>],

300 – współczynnik przeliczeniowy dla  $P_{\max}$  [psi],

0,07 – współczynnik przeliczeniowy dla  $P_{\max}$  [ata],

$L$  – długość kolumny zaczynu cementowego [ft],

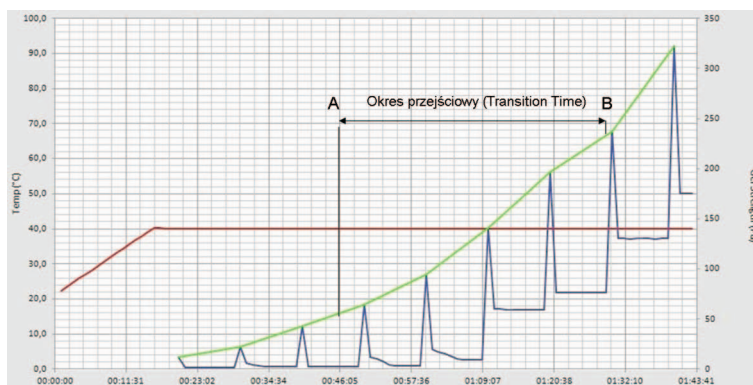
$D$  – efektywna średnica kolumny zaczynu cementowego (różnica średnicy otworu i średnicy rur okładzinowych) [in].

Na podstawie powyższego wzoru, znając maksymalne spodziewane ciśnienie przepływu  $P_{\max}$ , można określić wartość statycznej wytrzymałości strukturalnej, która zablokuje inwazję gazu w strukturę żelującego zaczynu.

Dotychczas nie ustalono uniwersalnego poziomu statycznej wytrzymałości strukturalnej, która jednoznacznie określałaby granicę możliwości wystąpienia migracji gazu. Jednak badania potwierdzają, że wspomniana we wcześniejszej części artykułu wartość wynosząca 500 lb/100 ft<sup>2</sup>, czyli 240 Pa, może być uznawana za wartość graniczna, która zablokuje przepływ gazu przez jeszcze niezwiązany zaczyn cementowy i uniemożliwi powstawaniu

kanałów gazowych w strukturze żelowej [5, 15]. Stwierdzenie to jest słuszne tylko w przypadku, gdy ciśnienie hydrostatyczne nie spadnie poniżej ciśnienia złożowego zanim nastąpi budowa SWS. W przeciwnym wypadku gaz rozpocznie migrację przez wiążący zaczyn cementowy, tworząc stałe kanały przepływu gazu.

Okresem przejściowym, lub inaczej czasem przejścia (*Transition Time*), nazywa się odstęp czasowy od pierwszego wykonanego pomiaru SWS do czasu, w którym zaczyn cementowy uzyskał konsystencję uniemożliwiającą powstawanie nowych kanałów gazowych (rysunek 2). Zaczyn cementowy przechodzi ze stanu ciekłego poprzez stan żelowy, kończąc na stanie stałym. Transformacja ta zachodzi po wytłoczeniu zaczynu poza rury okładzinowe. W tym czasie zaczyn nie zachowuje się ani jak ciecz, ani jak faza stała, posiadając jednak cechy możliwe do przypisania obu tym stanom jednocześnie. Podczas transformacji SWS zaczynu ciągle wzrasta, co jest wynikiem hydratacji cementu. Odczyt pierwszej wartości SWS następuje w punkcie, gdy zaczyn rozpoczyna przechodzenie z płynu, który jest jeszcze w stanie w pełni przekazywać ciśnienie hydrostatyczne, do stanu, w którym następuje początek spadku ciśnienia hydrostatycznego (punkt A, rysunek 2). Wartość dla tego punktu wyznaczona została doświadczalnie i wynosi 48 Pa (100 funtów/100 stóp<sup>2</sup>). Następnie punkty pomiarowe wyznaczane są w dalszym ciągu w ściśle określonych odstępach czasowych, aż do kolejnego punktu charakterystycznego, w którym zaczyn cementowy traci sposobność przekazywania ciśnienia hydrostatycznego. Punkt ten jest niekiedy określany jako początek okresu przejściowego wiązania [6] (punkt B, rysunek 2), a jego wartość ustalona doświadczalnie wynosi 240 Pa (500 funtów/100 stóp<sup>2</sup>).



Rys. 2. Okres przejściowy zaczynu uszczelniającego

Podczas sporządzania i modyfikacji zaczynów uszczelniających typu GASBLOCK, mających na celu przeciwdziałanie migracji gazu, brane jest pod uwagę opóźnienie czasu budowania początkowej statycznej wytrzymałości strukturalnej. Działanie takie ma na celu wydłużenie czasu równoważenia

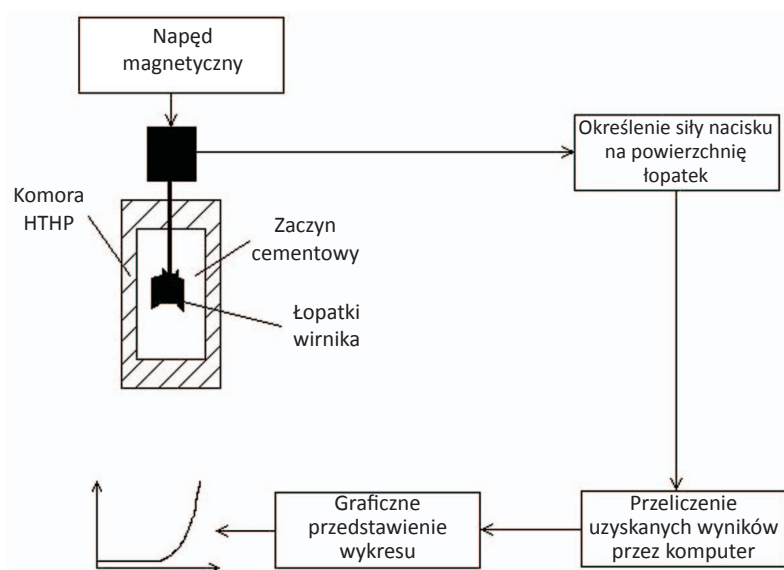


ciśnienia złożowego przez ciśnienie hydrostatyczne zaczynu uszczelniającego. Zaczyny są również modyfikowane w taki sposób, aby czasy przejścia (okresy przejściowe TT) były jak najkrótsze (często poniżej 60 min), co pozwala wyeliminować możliwość wtargnięcia gazu w strukturę wiążącego płaszcza cementowego.

Badania statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu prowadzone są za pomocą ultradźwiękowego analizatora cementu z modulem SGSM (ang. *static gel strength measurement*). Urządzenie (fotografia 2) umożliwia odwzorowanie warunków otworowych (ciśnienie, temperatura) oraz czasu zatłaczania zaczynu w przestrzeń pierścieniową. Po zaprogramowanym czasie symulowanego zatłaczania zaczynu następuje pomiar SWS. Badanie polega na określeniu siły nacisku gęstniejącego podczas transformacji zaczynu uszczelniającego na cyklicznie rotujące (0,5 stopnia na minutę) łopatki o znanej geometrii (rysunek 3).



Fot. 2. Ultradźwiękowy analizator cementu z modulem SGSM



Rys. 3. Schemat pomiaru SWS za pomocą SGSM Analyser

Podczas opracowywania zaczynu typu GASBLOCK, przeznaczonego do uszczelniania otworów gazowych o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu, należy zwrócić szczególną uwagę na takie parametry jak:

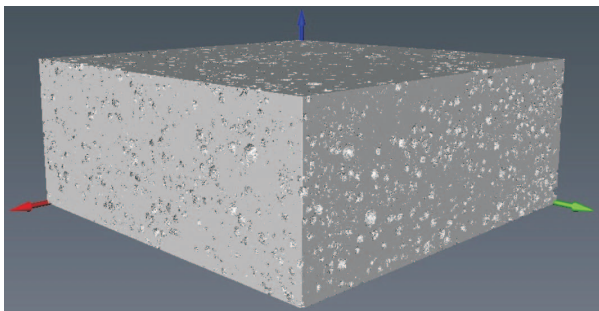
- odpowiedni, dobrany dla danych warunków, czas gęstnienia zaczynu uszczelniającego,
- odpowiednią dla danych warunków otworowych lepkość plastyczną, granicę płynięcia, wytrzymałość strukturalną,
- niską wartość filtracji zaczynu (do 25 cm<sup>3</sup>/30 min),
- zerowy odstój wody,
- osiągnięcie czasu końca wiązania przed spadkiem ciśnienia hydrostatycznego poniżej wartości ciśnienia złożowego,
- krótki czas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej SWS od 48 Pa do 240 Pa (*static gel strength*).

Powstałe z zaczynów GASBLOCK kamienie cementowe powinny charakteryzować się następującymi parametrami:

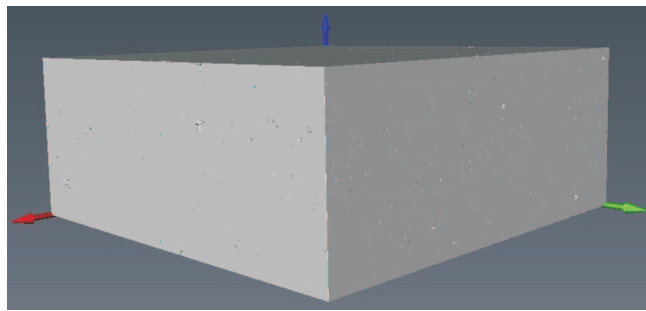
- przepuszczalnością dla gazu  $k$  poniżej 0,1 [ $\mu$ D],
- możliwie niską porowatością kamienia cementowego (nie większą niż 35%),
- odpowiednią geometrią porów (stosunek długości porów do ich średniej średnicy dla ilości 90% nie powinien przekraczać wartości 6:1),
- całkowita powierzchnia porowa nie może przekraczać 50 m<sup>2</sup>/g,
- udział makroporów (do 100 nm) nie powinien przekroczyć 7,5%,
- struktura porowa kamienia cementowego powinna być jednolita i maksymalnie skompaktowana.

Aby uzyskać powyższe parametry, stosowane są różnego rodzaju dodatki oraz domieszki do zaczynów uszczelniających, mające za zadanie poprawę parametrów zaczynu: począwszy od fazy ciekłej, a skończywszy na fazie stałej.

Dodatki zmniejszają, a niekiedy uniemożliwiają przepływ gazu przez mikrostrukturę wiążącego zaczynu cementowego. Dzieje się tak dzięki wypełnieniu struktury hydratyzujących ziaren klinkieru cementowego przez drobne cząstki mikrododatków lub dzięki wytworzeniu się błony rozciągniętej pomiędzy ziarnami fazy stałej i wzrostowi lepkości fazy ciekłej w miarę powstawania hydratów. Dodatkami takimi mogą być mikro lub nanododatki, jak również wielkocząsteczkowe kopolimery. Stwierdzono, że nagle zmiana ciśnienia hydrostatycznego podczas zmiany stanu skupienia zaczynu powoduje powstawanie wczesnych mikrospełkań i mikrokanalików umożliwiających przepływ gazu przez kamień cementowy. Sposobem na ograniczenie względnie wyeliminowanie migracji gazu przez wiążący zaczyn cementowy



Fot. 3. Struktura szkieletu próbki kamienia cementowego powstałego z zaczynu bez dodatków. Widoczne „pustki i nieciągłości” w przestrzeni pomiędzy ziarnami



Fot. 4. Struktura szkieletu próbki kamienia cementowego powstałego z zaczynu z dodatkami zagęszczającymi strukturę. Szkielet jest jednolity i skompaktowany

jest „doszczelnienie” masy zaczynu poprzez wypełnienie makroporów substancją stałą o granulacji drobniejszej od granulacji samego cementu (fotografie 3 i 4).

Stosowanie dodatków zagęszczających matrycę kamienia cementowego w zaczynach typu GASBLOCK skraca również czas przejścia zaczynu z fazy ciekłej w fazę stałą (wspomniana wcześniej – statyczna wytrzymałość strukturalna). W efekcie tego zmniejsza się ryzyko wystąpienia migracji gazu i poprawie ulega związanie kamienia cementowego z rurami i formacją skalną.

Kolejnym rodzajem dodatków są wielkocząsteczkowe polimery kationowe rozpuszczalne w wodzie, które również zapobiegają powstawaniu kanałów gazowych podczas wiązania zaczynu oraz skracają czas przejścia (TT) od 48 do 240 Pa do bardzo niskich wartości. Ponadto dodatki

tego rodzaju nie wymagają używania koagulantów, mogą być stosowane z przyspieszaczami oraz zapobiegają sedymentacji fazy stałej.

Innowacją podczas sporządzania zaczynów uszczelniających zapobiegających migracji gazu jest stosowanie nanododatków, czyli środków o jednostkach strukturalnych wielkości rzędu nanometrów ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), tzn. zbliżonej do rozmiarów atomów bądź cząsteczek chemicznych. Nazwę *nanomaterial* wprowadza się przy określaniu materiału, którego przynajmniej jeden z wymiarów wynosi  $< 100 \text{ nm}$ . Przy obecnym stanie wiedzy stwierdza się, że nanododatki powodują maksymalne zagęszczenie struktury kamienia cementowego oraz wyraźne zwiększenie jego wytrzymałości mechanicznej, jednak prace nad kompozycjami zaczynów z obecnością nanododatków trwają w dalszym ciągu.

### Receptury i wyniki badań zaczynów GASBLOCK

W Laboratorium Zaczynów Uszczelniających Zakładu Technologii Wiercenia przeprowadzone zostały badania laboratoryjne dla zaczynów GASBLOCK. Badania wykonane zostały zgodnie z obowiązującymi normami (PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 2: Badania cementów wiertniczych*, PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*, API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*).

Przeprowadzone zostały badania dla zaczynu bez dodatków antymigracyjnych, a następnie – dla składów typu GASBLOCK modyfikowanych za pomocą różnego rodzaju dodatków. Tego rodzaju schemat badań umożliwił porównanie ilościowe i jakościowe wpływu poszczególnych dodatków na zachowanie się danej receptury zaczynu. Zaczyny sporządzane zostały na wodzie wodociągowej, spoiwem we wszystkich recepturach był cement portlandzki CEM I 32,5R.

Receptury zaczynów przedstawiono w tablicy 1. Zaczyn pierwszy (1/ZW) nie posiadał dodatków wpływających na ograniczenie migracji gazu, sporządzony został jako punkt

odniesienia w celu porównania. W następnym składzie (2/LA) zastosowano dodatek lateksu w standardowej dla zaczynów lateksowych ilości 10% oraz 2,0-procentową ilość stabilizatora lateksu. Trzeci skład (3/GS) zawierał ponadto dodatek 7% polimeru wielkocząsteczkowego. Kolejny czwarty skład (4/DEX) posiadał dodatek ekspansywny, natomiast ostatnia receptura w tablicy 1 (5/NKR) charakteryzowała się dodatkiem wodnego roztworu nanokrzemionki.

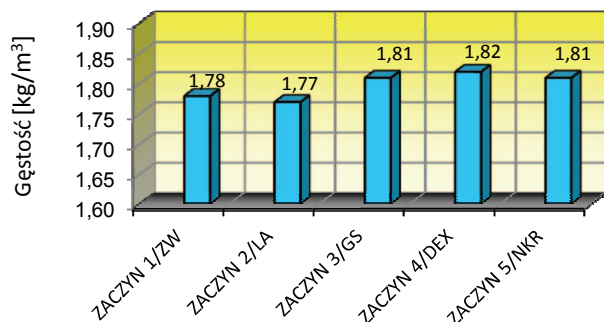
Na podstawie prowadzonych badań stwierdzono, że w celu zachowania wymaganych parametrów zastosowanie kolejnych dodatków pozwala zmniejszyć stosunek wodno-cementowy z ilości 0,54 – w przypadku zaczynu pierwszego (1/ZW), do ilości 0,45 – dla zaczynu zmodyfikowanego przy użyciu wyżej wymienionych dodatków ograniczających migrację gazu.

Badane receptury zaczynów posiadały gęstość na poziomie około  $1,8 \text{ g/cm}^3$  (rysunek 4). Filtracja zaczynu „bazowego” (bez prowadzonych modyfikacji) wynosiła  $150 \text{ cm}^3/30 \text{ min}$ , co jest wartością nie do przyjęcia. Natomiast po przeprowadzeniu już wstępnej modyfikacji przy użyciu lateksu wartość ta

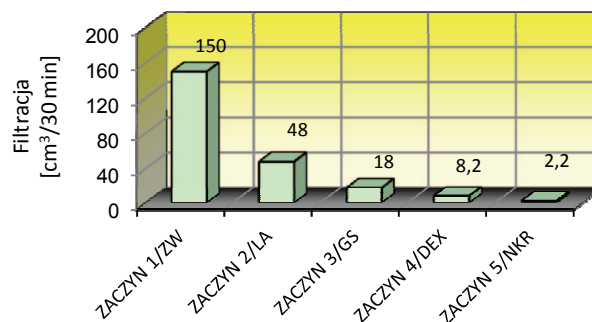
Tablica 1. Składy wytypowanych do porównania zaczynów

| SKŁAD   | ZACZYN 1/<br>ZW | ZACZYN 2/<br>LA | ZACZYN 3/<br>GS | ZACZYN 4/<br>DEX | ZACZYN 5/<br>NKR |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Woda wodociągowa                                | w/c = 0,54      | w/c = 0,50      | w/c = 0,48      | w/c = 0,48       | w/c = 0,45       |
| Dodatek odpiniający                             | 0,3%            | 0,3%            | 0,3%            | 0,3%             | 0,5%             |
| Dodatek upłynniający                            | 0,2%            | 0,2%            | 0,2%            | 0,2%             | 0,2%             |
| Dodatek antyfiltracyjny                         | 0,2%            | 0,2%            | 0,2%            | 0,2%             | 0,2%             |
| Polimer kationowy wielkocząsteczkowy            | -               | -               | 7,0%            | 5,0%             | 4,0%             |
| Dodatek ekspansywny                             | -               | -               | -               | 2,0%             | 2,0%             |
| Kopolimer BSA*                                  | -               | 10,0%           | 10,0%           | 8,0%             | 6,0%             |
| Stabilizator lateksu                            | -               | 2,0%            | 2,0%            | 2,0%             | 2,0%             |
| Wodny roztwór nanokrzemionki n-SiO <sub>2</sub> | -               | -               | -               | -                | 6,0%             |
| Mikrocement                                     | -               | -               | -               | 10,0%            | 10,0%            |
| Cement portlandzki                              | 100,0%          | 100,0%          | 100,0%          | 100,0%           | 100,0%           |
| Dodatek spęczniający                            | 0,3%            | 0,3%            | 0,3%            | 0,3%             | 0,3%             |

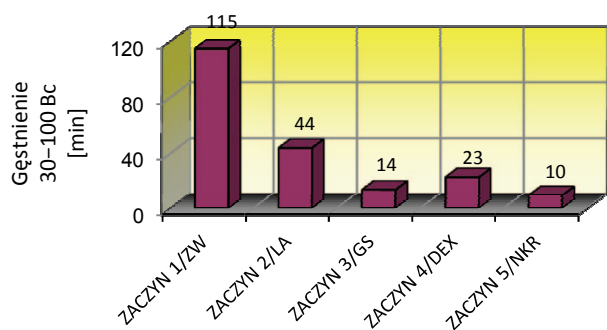
\* Kopolimer BSA – Butadienowo-styrenowo-amidowy



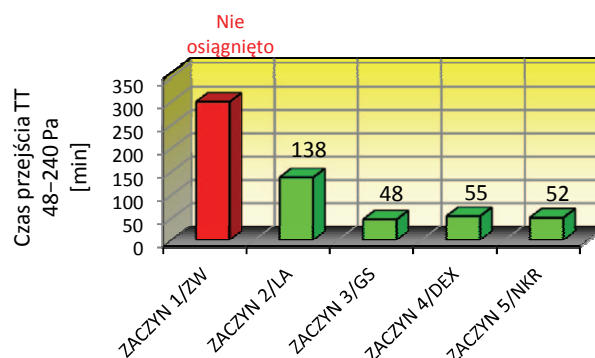
Rys. 4. Porównanie gęstości grupy zaczynów GASBLOCK



Rys. 5. Zestawienie filtracji badanej grupy zaczynów GASBLOCK



Rys. 6. Zestawienie gęstnienia (od 30 Bc do 100 Bc) dla grupy zaczynów GASBLOCK



Rys. 7. Zestawienie czasu przejścia (TT) podczas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej (SWS) zaczynów GASBLOCK

spadła poniżej 50 cm<sup>3</sup>/30 min. Kolejne modyfikacje pozwoliły na uzyskanie wartości 2,2 cm<sup>3</sup>/30 min – w przypadku zaczynu (5/NKR) z dodatkiem wodnego roztworu nanokrzemionki. Spadek filtracji przedstawiono na rysunku 5 oraz w tablicy 2. Odstoje wody dla zaczynów typu GASBLOCK były zerowe, natomiast zaczyn bazowy bez dodatków antymigracyjnych posiadał odstój na poziomie 3,0%.

Szczególnie istotnymi parametrami, branyymi pod uwagę podczas sporządzania receptury zaczynu, były: czas gęst-

nienia (zwłaszcza gęstnienie od wartości 30 Bc do 100 Bc) oraz narastanie wytrzymałości strukturalnej i czas przejścia (TT) od wartości 48 Pa do 240 Pa. Na rysunkach 6 i 7 zestawiono powyższe parametry dla badanej grupy zaczynów. Czasy gęstnienia dla zaczynów GASBLOCK (od 2 do 5) zawierały się w przedziale do 3 godzin, natomiast zaczyn 1/ZW (bez dodatków) zgęstniał po czasie 4 godz. 43 min.

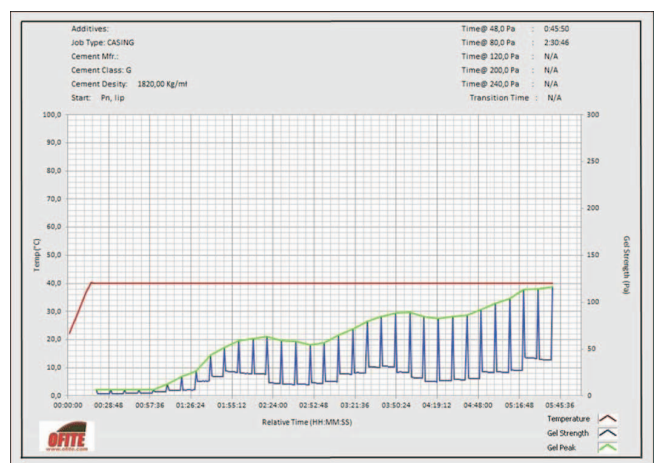


Tablica 2. Parametry wytypowanych zaczynów

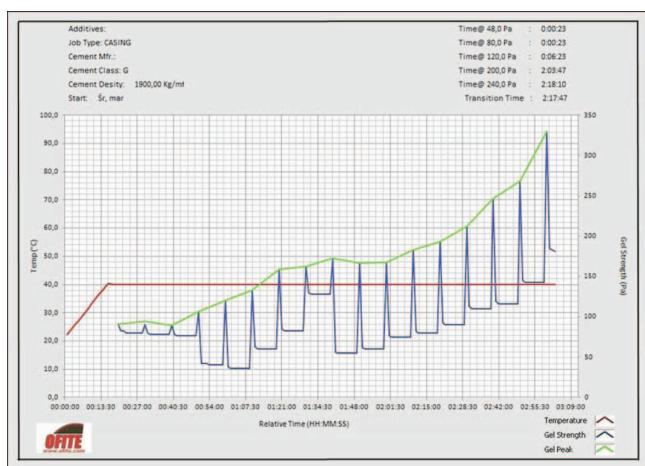
| Parametr  |                               | ZACZYN 1/<br>ZW | ZACZYN 2/<br>LA | ZACZYN 3/<br>GS | ZACZYN 4/<br>DEX | ZACZYN 5/<br>NKR |
|---|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]  |                               | 1,78            | 1,77            | 1,81            | 1,82             | 1,81             |
| Rozlewność [mm]   |                               | 250             | 285             | 300             | 295              | 300              |
| Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]                                 |                               | 150             | 48,0            | 18,0            | 8,2              | 2,2              |
| Lepkość plastyczna [mPa·s]  |                               | 220             | 70,0            | 72,5            | 71,0             | 61,5             |
| Granica płynięcia [Pa]  |                               | 23,5            | 3,6             | 1,9             | 2,4              | 2,1              |
| Wytrzymałość strukturalna [Pa]                                      |                               | 5,8             | 5,3             | 3,8             | 4,1              | 3,6              |
| Odstój wody [%]   |                               | 3,0             | 0,1             | 0,0             | 0,0              | 0,0              |
| Czas gęstnienia<br>( $t = 40^{\circ}\text{C}, p = 15 \text{ MPa}$ ) | 30 Bc                         | 2-48            | 2-14            | 2-30            | 2-25             | 2-19             |
|   | 100 Bc                        | 4-43            | 2-58            | 2-44            | 2-48             | 2-29             |
|   | Gęstnienie<br>30÷100 Bc [min] | 115             | 44              | 14              | 23               | 10               |
| Czas narastania<br>wytrzymałości<br>strukturalnej (SWS)             | 48 Pa                         | 00-45           | 00-00           | 00-22           | 00-36            | 01-08            |
|   | 240 Pa                        | -               | 02-18           | 01-10           | 01-31            | 02-01            |
|   | TT 48÷240 Pa [min]            | brak            | 138             | 48              | 55               | 52               |

Gęstnienie (od wartości 30 Bc do 100 Bc) dla receptury zaczynu 1/ZW wynosiło prawie 2 godziny (115 minut), natomiast modyfikowane zaczyny GASBLOCK charakteryzowały się gęstnieniem w czasie od 44 minut (zaczyn 2/LA) do nawet 10 minut (zaczyn 5/NKR). Porównanie gęstnienia poszczególnych zaczynów przedstawiono na rysunku 6.

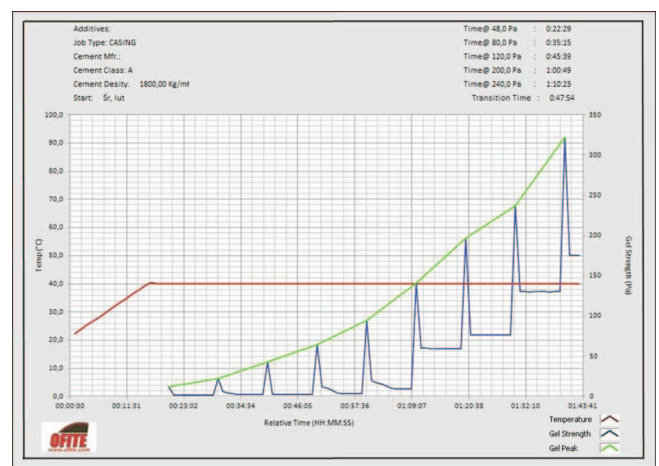
Rozpatrując czasy przejścia (TT) w trakcie narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej, zauważono, że zaczyn 1/ZW nie osiągnął wartości 240 Pa (rysunek 8). Zaczyn z dodatkiem lateksu (2/LA) charakteryzował się osiągnięciem wartości *Transition Time* w czasie 138 minut, co jednak jest wartością zbyt dużą w przypadku uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku wystąpienia migracji gazu. Dodatek kopolimeru wielkocząsteczkowego w przypadku trzeciego



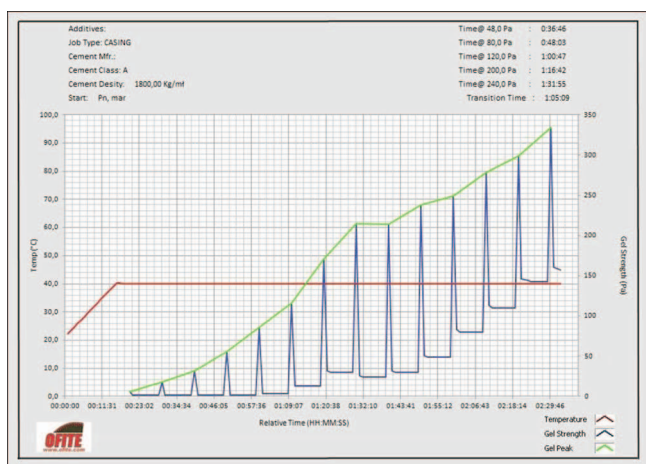
Rys. 8. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu 1/ZW



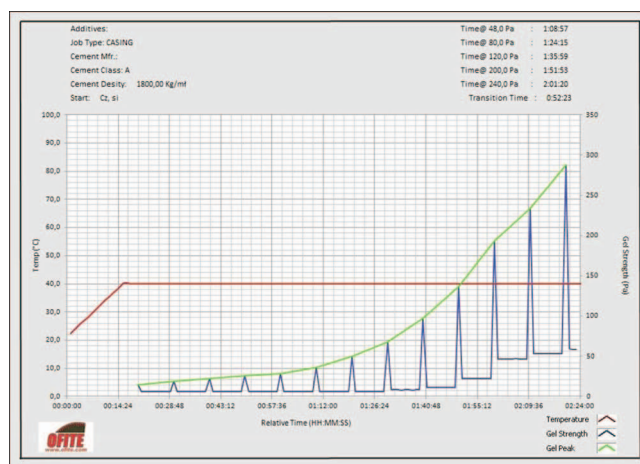
Rys. 9. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu 2/LA



Rys. 10. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu 3/GS



Rys. 11. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu 4/DEX



Rys. 12. Narastanie statycznej wytrzymałości strukturalnej zaczynu 5/NKR

zaczynu (3/GS) skrócił czas do 48 minut, co jest wartością wymaganą dla zaczynów typu GASBLOCK. Dla tej receptury narastanie wytrzymałości strukturalnej przebiegało w prawidłowy, jednostajny sposób (rysunek 10). Kolejne dwa zaczyny typu GASBLOCK (4/DEX oraz 5/NKR) posiadały 10-procentowy dodatek mikrocementu, charakteryzowały

się one również krótkimi czasami przejścia, które wynosiły odpowiednio 55 oraz 52 minuty (rysunki 11 i 12). Krótkie czasy przejścia (*Transition Time*) świadczą o zdolności zapobiegania migracji gazu przez wiążący zaczyn uszczelniający. Zestawienie graficzne okresów przejściowych (48÷240 Pa) przedstawiono na rysunku 7.

## Podsumowanie

Wtargnięcie gazu w strukturę wiążącego zaczynu uszczelniającego jest ściśle powiązane z jego parametrami statycznej wytrzymałości strukturalnej. Zbyt długi czas transformacji zaczynu (okres przejściowy TT od 48 do 240 Pa) umożliwia powstawanie w strukturze wiążącego zaczynu wolnych przestrzeni, w których gromadzi się gaz oraz woda, a następnie wytwarzają się drogi przepływu gazu (kanałki gazowe). Powstałe w płaszczu cementacyjnym kanały gazowe nie zaciskają się w naturalny sposób, a jedynie mogą być zlikwidowane poprzez zabieg docementowywania pod ciśnieniem przez nieszczelności w obrębie buta rur lub przez wcześniej wykonaną perforację. W celu wyeliminowania inwazji gazu w strukturę matrycy cementowej stosowane są specjalnego rodzaju zaczyny typu GASBLOCK, pozwalające na unieruchomienie cieczy w przestrzeniach porowych poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych materiałów polimerowych i środków mostkujących.

Badania prowadzone w celu opracowania bądź modyfikacji zaczynów typu GASBLOCK potwierdziły, że odpowiednio dobrane dodatki i domieszki, a także modyfikacje ilościowe receptur znacząco wpływają na czas i jakość transformacji zaczynu uszczelniającego. Działania takie pozwalają na uzyskanie ściśle określonych parametrów dla zaczynu typu GASBLOCK, dzięki czemu możliwe jest zastosowanie go do uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu.

Przeprowadzone modyfikacje w grupie zaprezentowanych zaczynów GASBLOCK pozwoliły na:

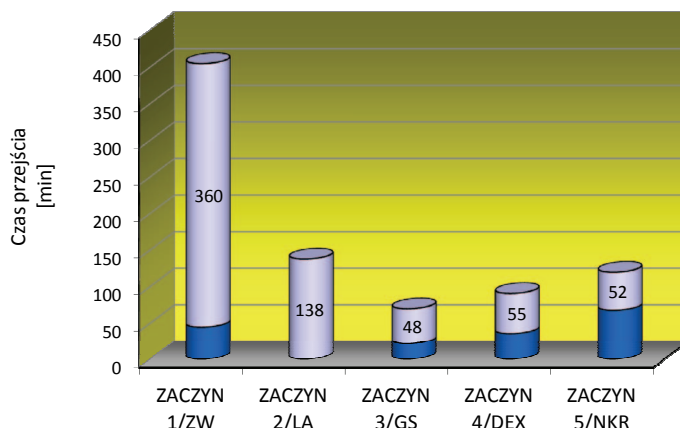
- obniżenie stosunku wodno-cementowego przy utrzymaniu odpowiednich parametrów reologicznych,
- zastąpienie użycia lateksu za pomocą polimeru kationowego i dodatku ekspansyjnego,
- wyeliminowanie odstojów wody,
- zredukowanie ilości filtratu z 150 cm<sup>3</sup>/30 min (zaczyn bazowy 1/ZW) do wartości 2,2 cm<sup>3</sup>/30 min (zaczyn 5/NKR),
- skrócenie gęstnienia zaczynu (30÷100 Bc) z wartości 115 minut – w przypadku zaczynu bazowego, do 10 minut – dla zaczynu z dodatkiem wodnego roztworu nanokrzemionki,
- uzyskanie krótkich okresów przejściowych (*Transition Time*) od 48 do 240 Pa, nieprzekraczających 60 minut (rysunek 13).

Uzyskane wyniki badań pozwalają na stosowanie powyższych zaczynów w warunkach przemysłowych podczas uszczelniania otworów o podwyższonym ryzyku występowania migracji gazu.

Badania statycznej wytrzymałości strukturalnej, określenie czasu przejścia (*Transition Time*) zaczynu uszczelniającego oraz kompleksowe prowadzenie szczegółowych badań i przestrzeganie reżimów stawianych zaczynom umożliwiają częściowe wyeliminowanie zjawisk migracji gazu. Jednakże należy pamiętać, że zaczyn cementowy sporządzony



w warunkach laboratoryjnych po przetłoczeniu go przez rury okładzinowe i przestrzeń pozarurową zmienia swoje właściwości. Ponadto istnieje szereg dodatkowych czynników wpływających na skuteczność uszczelnienia kolumn rur okładzinowych nawet w odwiertach sąsiadujących. W związku z powyższym nie można uogólniać zjawiska migracji gazu, a każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie w odniesieniu do konkretnych warunków otworowych.



Rys. 13. Czasy przejścia (TT) podczas narastania statycznej wytrzymałości strukturalnej (SWS) zaczynów GASBLOCK

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 9, s. 608–616

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania przestrzeni porowej stwardniałych zaczynów cementowych przeciwdziałających migracji gazu za pomocą mikrotomografii rentgenowskiej* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0071/KW/12, nr archiwalny: DK-4100-71/12.

**Literatura**

[1] Baret J. F.: *Why are Cement Fluid-Loss Additives Necessary?* Paper SPE 17630, 1988.

[2] Bol G. et al.: *Putting a stop to gas channeling*. Oilfield Review, April 1991.

[3] Bonett A., Pafitis D.: *Getting to the Root of Gas Migration*. Oilfield Review, Spring 1996.

[4] Carter L. G., Slagle K. A.: *Study of Completion Practices to Minimize Gas Communication*. Paper SPE 3164, 1970.

[5] Crook R., Heathman J.: *Predicting potential gas-flow rates to help determine the best cementing practices*. Drilling Contractor 1998.

[6] Debinska E.: *Wyznaczenie statycznej wytrzymałości strukturalnej i wczesnej wytrzymałości mechanicznej zaczynów cementowych*. Nafta-Gaz 2013, nr 2, s. 134–142.

[7] Herman Z. i in.: *Poprawa skuteczności cementowania kolumn rur okładzinowych w wybranych rejonach przedgorza Karpat*. Dokumentacja wewnętrzna INiG, Kraków 2004.

[8] Herman Z.: *Problemy migracji i ekshalacji gazu w odwiertach*. Techniczne uniweryzity Ostrava, rada hornicko-geologiczna, 2005.

[9] Herman Z.: *Zapobieganie i likwidacja ekshalacji gazu ziemnego wokół otworów wiertniczych*. Dokumentacja wewnętrzna IGNiG, Kraków 1996.

[10] Katna Z. i in.: *Opracowanie zaczynów cementowych nieulegających sedymentacji*. Dokumentacja wewnętrzna INiG, Kraków 1998.

[11] Katna Z.: *Metodyka badania migracji gazu przez zaczyn cementowy w czasie wiązania*. Dokumentacja wewnętrzna INiG, Kraków 2005.

[12] Kremieniewski M.: *Proces migracji gazu w trakcie wiązania zaczynu cementowego*. Nafta-Gaz 2011, nr 3, s. 175–181.

[13] Kremieniewski M.: *Zaczyn cementowy o obniżonej gestosci do uszczelniania technicznych kolumn rur okładzinowych*. Dokumentacja wewnętrzna INiG, Krakow 2009.

[14] Nelson E. B.: *Cementowanie otworów wiertniczych*. Schlumberger Educational Service, Houston, Texas USA 1990.

[15] Oskarsen R. T., Wright J. W., Walzel D.: *Analysis of gas flow yields recommendations for best cementing practices*. World Oil 2010, vol. 231, no. 1 pp 33–39.

[16] Prohaska M., Thonhauser G.: *The importance of wellbore integrity for groundwater protection in shale gas well construction*, www.shale-gas-information-platform.org/categories/water-protection/knowledge-base/prohaska.html (dostęp: lipiec 2012).

[17] Raczkowski J. i in.: *Ekspertyza dotyczaca stanu technicznego odwiertow na PMG Husow-105K, Husow-132K i Wierzchowice WM-A*. Dokumentacja IGNiG, Kraków 1997.

[18] Radecki S., Witek W.: *Dobór technik i technologii cementowania w aspekcie występowania migracji gazu*. Nafta-Gaz 2000, nr 9, s. 487–497.

[19] Rzepka M.: *Receptury zaczynów cementowych z dodatkiem mikrocementu do warunków wysokich temperatur i cisnien zlozowych*. Dokumentacja wewnętrzna, Kraków 2005.



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



Mgr inż. Marcin KREMIEŃEWSKI  
Asystent w Zakładzie Technologii Wiercenia.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [kremieniewski@inig.pl](mailto:kremieniewski@inig.pl)



Mgr Edyta DĘBIŃSKA  
Asystent w Zakładzie Technologii Wiercenia.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A  
31-503 Kraków  
E-mail: [debinska@inig.pl](mailto:debinska@inig.pl)