

Marcin Kremieniewski

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Modyfikacje receptur zaczynów uszczelniających w celu zminimalizowania przepuszczalności powstałych kamieni cementowych

W artykule zaprezentowano modyfikacje receptur zaczynów uszczelniających, które miały na celu zminimalizowanie przepuszczalności powstałego kamienia cementowego. Badane próbki kamieni cementowych sporządzone zostały z zaczynów uszczelniających stosowanych dotychczas w warunkach otworowych, a następnie – poddane modyfikacjom prowadzącym do doszczelnienia ich struktury. W celu obniżenia przepuszczalności i doszczelnienia matrycy cementowej, a tym samym przeciwdziałania migracji gazu zastosowano wypełniające dodatki drobnocząsteczkowe oraz polimerowe.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, migracja gazu, cementowanie otworów wiertniczych, przepuszczalność gazu, modyfikacje zaczynów cementowych.

### The modification of cement slurries recipes to minimize the permeability of cement stone

The paper presents a modification of cement slurries recipes, which were designed to minimize the permeability of the cement stone. Cement stone test samples were prepared from cement slurries used to date in borehole conditions and then modified for the purpose of sealing of the structure in order to reduce the permeability. For reducing the permeability and sealing the cement matrix and thus preventing gas migration small molecules and polymeric additives were used.

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

### Wprowadzenie

Podczas zabiegu cementowania kolumn rur okładzinowych najistotniejsze jest uszczelnienie przestrzeni pierścieniowej pomiędzy zapuszczanymi rurami a ścianą otworu wiertniczego oraz poprzednio zacementowaną kolumną rur. Zaczyn uszczelniający w trakcie przechodzenia ze stanu ciekłego w stan stały hydratyzując tworzy strukturę żelową. Dochodzi wówczas do obniżenia ciśnienia hydrostatycznego, trwającego aż do momentu całkowitego związania zaczynu cementowego. Podczas tych procesów tworzy się porowa struktura płaszczka cementowego. Warunki takie sprzyjają mikroprzepływom gazu przez twardniejący zaczyn cementowy. Jednym z najważniejszych zadań stawianych przed zaczynem cementowym jest wyeliminowanie ewentualnej przepuszczalności

płaszczka cementowego, która niejednokrotnie pojawia się po zacementowaniu otworu, czego dowodem są wypływy gazu ( $0,1\div 3\text{ m}^3/\text{h}$ ) z przestrzeni pierścieniowej w otworach zrealizowanych na Przedgórzu Karpackim w latach 2008–2011.

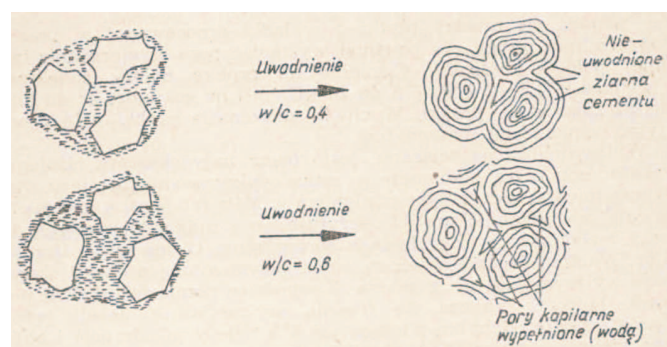
Przy doborze składu zaczynu cementowego prowadzone są jego modyfikacje w celu umożliwienia zastosowania opracowanej receptury podczas uszczelniania otworów gazowych. Działanie takie zmierza do wyeliminowania możliwości powstawania mikronieszczelności kamienia cementowego. W związku z powyższym stosuje się różnego rodzaju dodatki i domieszki wypełniające, których działanie wpływa na kształtowanie się struktury przestrzennej powstałego kamienia cementowego.

Badania przepuszczalności stwardniałych zaczynów cementowych prowadzi się przy użyciu przepuszczalnościomierza gazowego, pozwalającego na określenie łączności kanalików w strukturze kamienia cementowego. Dzięki temu istnieje możliwość określenia wpływu zastosowanych dodatków na redukcję przepuszczalności kamienia cementowego.

### Przepuszczalność kamieni cementowych

Jednym z najbardziej niekorzystnych czynników mogących wystąpić po związaniu zaczynu cementowego jest przepływ płynu złożowego w przestrzeni pierścieniowej. Płynem tym może być zarówno faza ciekła, jak i gazowa. W procesie hydratacji, podczas tworzenia się kamienia cementowego z zaczynu uszczelniającego, przepuszczalność kamienia jest bardzo niska, na poziomie setnych części mD. Wewnętrzna struktura siatki cementu jest nasycona wodą i siły wiązania kapilarnego uniemożliwiają przepływ gazu. Jednak wraz ze wzrostem czasu hydratacji kamienie cementowe powstałe z zaczynów niezmodyfikowanych oraz zaczynów o małej gęstości i dużym współczynniku w/c mają względnie dużą przepuszczalność (0,5÷5,0 mD) [13]. W związku z tym istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia migracji gazu wewnątrz siatki kamienia cementowego, co może spowodować ekshalacje. Tego rodzaju wypływy gazu mogą trwać przez wiele tygodni, a nawet miesięcy. Najczęściej są obserwowane jako wolne odbudowanie ciśnienia po zamknięciu zasowy na przestrzeni pierścieniowej.

Wiążący zaczyn jest ciałem porowatym. Wynika to z faktu, że zarówno jeszcze nieuwodnione, jak i już uwodnione cząstki cementu zajmują tylko część objętości matrycy cementowej, natomiast resztę stanowi woda zarobowa (rysunek 1).



Rys. 1. Uwodnienie cementu przy określonych wartościach współczynnika wodno-cementowego [6]

Pierwotnie produkty hydratacji cementu charakteryzują się większą objętością właściwą niż cementu nieuwodnionego i w związku z tym porowatość zaczynu cementowego ulega redukcji wraz z rozwojem procesu hydratacji. W hydratyzującym zaczynie można wyróżnić pory: żelowe, kapilarne,

kontrakcji oraz powietrzne, przy czym pory żelowe i kapilarne znacznie różnią się między sobą wielkością średnic. Pory żelowe mają średnice 0,001÷0,008  $\mu\text{m}$ , natomiast średnica porów kapilarnych dochodzi do kilku, a czasem nawet kilkunastu mikrometrów. Analizując strukturę porową w wiążącym zaczynie cementowym pod kątem możliwości intensywnego przenikania gazu przez zaczyn, można rozróżnić w systemie porów dwa rodzaje układów: mikroporowy i porów kapilarnych.

Migracja gazu przez przestrzeń pierścieniową otworu wiertniczego spowodowała podjęcie badań, które miały na celu wykrycie i rozpoznanie przyczyn zachodzenia tego typu zjawiska. Stwierdzono, że płaszcz cementowy jest ciałem porowatym oraz przepuszczalnym, a jego własności uzależnione są przede wszystkim od:

- rodzaju cementu (głównie składu mineralogicznego),
- rozdrobnienia cementu (powierzchnia właściwa),
- współczynnika wodno-cementowego,
- kontrakcji zaczynu w trakcie jego wiązania i twardnienia,
- temperatury oraz ciśnienia hydratacji kamienia cementowego,
- czasu hydratacji,
- rodzaju płynu filtrującego przez strukturę kamienia cementowego,
- różnicy ciśnień, pod wpływem której następuje migracja płynu [6].

Przepuszczalność kamienia cementowego określa się w badaniach laboratoryjnych migracji gazu przez materiał kapilarno-porowy. Badania przepuszczalności kamieni cementowych przy użyciu przepuszczalnościomierza gazowego, a także śledzenie zmian przepuszczalności w trakcie hydratacji kamienia cementowego pozwalają na dobór optymalnych parametrów zaczynu. Kamień cementowy powstały z tak zmodyfikowanego zaczynu odznacza się brakiem bądź bardzo niską wartością przepuszczalności dla gazu oraz niską porowatością, co wpływa na powstanie szczelnej matrycy cementowej i przyczynia się do ograniczenia bądź wyeliminowania niepożądanego zjawiska migracji. W ostatnim czasie w celu zminimalizowania przepuszczalności dla gazu często stosowane są mikrocząsteczkowe materiały wypełniające oraz wielkocząsteczkowe dodatki polimerowe,

co umożliwia doszczelnienie cementowej przestrzeni międzyziarnowej przy jednoczesnym zachowaniu wymaganej gęstości. Dzieje się tak wskutek rozlokowania mikroziaren materiału drobnosiarnistego bądź kopolimeru pomiędzy

hydratyzującymi ziarnami klinkieru cementowego poprzez wytworzenie rozciągniętej błony między ziarnami fazy stałej lub na skutek wzrostu lepkości fazy ciekłej – w miarę powstawania hydratów [14].

### Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne zaczynów cementowych przeprowadzone zostały w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających Zakładu Technologii Wiercenia INiG – PIB Oddział Krosno zgodnie z normami: 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*. Natomiast badania przepuszczalności wykonano przy użyciu przepuszczalnościomierza gazowego (fotografia 1), zgodnie z normą PN-EN 10426-2.



Fot. 1. Przepuszczalnościomierz gazowy OFITE

Przepuszczalność badana za pomocą przepuszczalnościomierza gazowego stanowi podstawową miarę zdolności ośrodka porowatego do transportu zawartych w nim mediów ciekłych i gazowych. Przepuszczalność próbki można obliczyć na podstawie prawa Darcy'ego (1):

$$K = \frac{2000 \cdot P_o \cdot Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot (P_1^2 - P_o^2)} \quad (1)$$

gdzie:

$K$  – przepuszczalność [mD],

$P_o$  – ciśnienie wyjściowe [atm] (ciśnienie atmosferyczne),

$P_1$  – ciśnienie wejściowe [atm],

$Q$  – prędkość przepływu czynnika (pływu) [cm<sup>3</sup>/sec],

$\mu$  – lepkość [cP] (lepkość azotu = 0,1756 cP w warunkach otaczających),

$L$  – długość próbki [cm],

$A$  – pole przekroju poprzecznego próbki [cm<sup>2</sup>].

Badania przepuszczalności kamienia cementowego prowadzone były zgodnie z procedurą, dzięki której możliwe jest określenie przepuszczalności względnej próbek kamienia cementowego dla cieczy i gazów.

Celem prowadzonych badań było określenie przepuszczalności kamieni cementowych, analiza otrzymanych wyników badań, a następnie – modyfikacja receptur zaczynów uszczelniających w celu zminimalizowania przepuszczalności otrzymanych kamieni cementowych, przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów zaczynu uszczelniającego. W celu uzyskania maksymalnego doszczelnienia matrycy kamienia cementowego zastosowano wypełniające dodatki drobnocząsteczkowe. Receptury sporządzone były na wodzie wodociągowej. Składy zaczynów dobierano w taki sposób, aby można je było zastosować w warunkach otworowych.

Z wytypowanych składów zaczynów sporządzone zostały próbki kamieni cementowych, które poddano procesowi hydratacji przez okres 28 dni w temperaturze 25, 40, 60 i 80°C przy ciśnieniu odpowiednio: 3, 15, 35 i 42 MPa. Po upływie ustalonego czasu, tj.: 2, 7, 14 i 28 dni przeprowadzono badania przepuszczalności powstałych kamieni cementowych. Następnie zrealizowano modyfikację receptury i wykonano ponownie próbki do badań przepuszczalności kamieni cementowych.

W tablicy 1 zestawiono receptury zaczynów przed oraz po modyfikacji dla zakresu temperatur od 25 do 80°C, natomiast tablica 2 przedstawia parametry powyższych zaczynów cementowych i wyniki przepuszczalności kamienia cementowego po czasie hydratacji dwóch oraz 28 dni. Dodatkowo, w celu zobrazowania tempa zmian przepuszczalności po przeprowadzeniu danej modyfikacji, wyniki przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 2–5. Niepewność uzyskanych wyników oszacowano na podstawie odchylenia standardowego średniej.

Podczas badań kamieni cementowych uzyskanych z zaczynów bazowych (przed przeprowadzeniem modyfikacji) uzyskano względnie duże wartości przepuszczalności kamieni, zawierające się w zakresie od 2,73 do 0,82 mD po

dwóch dniach hydratacji kamienia cementowego oraz od 0,29 do 0,17 mD po 28 dniach hydratacji. Przeprowadzone modyfikacje składów zaczynów pozwoliły na obniżenie przepuszczalności do wartości zawierających się w zakresie od 0,43 do 0,10 mD po dwóch dniach hydratacji oraz od 0,10 do 0,03 mD po czasie 28 dni. Na podstawie uzyskanych wyników w trakcie badań można zaobserwować również spadek współczynnika przepuszczalności wraz z czasem hydratacji. Takie zachowanie próbek spowodowane jest wzrostem szczelności matrycy wskutek koncentracji hydratyzujących cząstek cementu oraz wiązania dodatków wypełniająco-wiążących, co z kolei powoduje narastanie oporów przepływu w sieciach kapilarnych. Dodatkowo dla wybranych próbek kamieni cementowych wykonane zostały badania porowatości oraz analiza porównawcza, na podstawie której widoczna jest redukcja przepuszczalności kamienia cementowego wraz ze zmniejszaniem się jego porowatości pod wpływem prowadzonych modyfikacji. Zaważalny spadkowy trend, zarówno przepuszczalności, jak i porowatości kamieni cementowych, po przeprowadzonych modyfikacjach receptury zaczynu potwierdza zagęszczanie się struktury kamienia cementowego. Zjawisko coraz moc-

niejszego skompaktowania mikrostruktury próbki kamienia cementowego przy jednoczesnym zachowaniu stałej gęstości zaczynu uszczelniającego w fazie ciekłej jest bardzo ważne przy projektowaniu zaczynu odpornego na warunki panujące w otworach gazowych.

W celu doszczelnienia struktury płaszcza cementowego stosuje się różnego rodzaju dodatki wypełniające, jednak często powodują one zwiększenie ciężaru zaczynu oraz zmianę jego parametrów reologicznych. Taki wpływ dodatków musi być uwzględniany podczas badań wstępnych. Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono również, że zagęszczenie matrycy kamienia cementowego poprzez zastosowanie dodatku mikrocementu bądź/i wielkocząsteczkowego polimeru zapobiegającego migracji gazu przyczynia się do obniżenia przepuszczalności powstałego kamienia cementowego. Jednak dokładne ilości dodatków uzależnione są od warunków otworowych i narzuconych przez nie wymagań geologiczno-technicznych, tj. gradientu ciśnienia szczelinowania, gradientu ciśnienia złożowego, gęstości płuczki, gęstości cieczy wyprzedzających, temperatury dynamicznej, ciśnienia na dnie otworu, czasu trwania prac cementacyjnych itp.

Tablica 1. Składy receptur zaczynów przed i po modyfikacji dla temperatur od 25 do 80°C

Dla warunków temp./ciśn.	25°C/3 MPa		40°C/15 MPa		60°C/35 MPa		80°C/42 MPa	
	Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.
SKŁAD								
Woda wodociągowa	w/c = 0,48	w/c = 0,50	w/c = 0,50	w/c = 0,50	w/c = 0,50	w/c = 0,50	w/c = 0,52	w/c = 0,52
Dodatek odpieniający	1,0%	0,20%	0,50%	0,20%	0,50%	0,20%	0,50%	0,30%
Dodatek upłynniający	0,2%	0,40%	0,20%	0,40%	0,20%	0,30%	0,20%**	0,25%**
Dodatek antyfiltracyjny	0,2%	-	0,20%	-	0,30%	0,30%	0,15%**	0,15%**
Polimer wielkocząsteczkowy	-	6,0%	-	5,00%	-	6,5%	-	7,0%
Lateks	-	-	-	-	10,0%	-	10,0%**	-
Stabilizator lateksu	-	-	-	-	2,0%	-	2,0%	-
Dodatek opóźniający czas gęstnienia	-	-	-	-	0,10%	-	-	-
Dodatek przyspieszający czas gęstnienia	3,5%	1,0%	-	-	-	-	-	-
Drobnocząsteczkowy dodatek wypełniający	-	-	-	-	-	-	-	15,0%
Mikro cement	-	-	-	10,0%	-	5,0%	-	-
Cement CEM I 32,5R *CEM G HSR	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%*	100,0%*	100,0%*	100,0%*
Dodatek spęczniający	0,3%	0,1%	0,30%	0,10%	0,30%	0,10%	0,30%	0,10%

Oznaczenia:

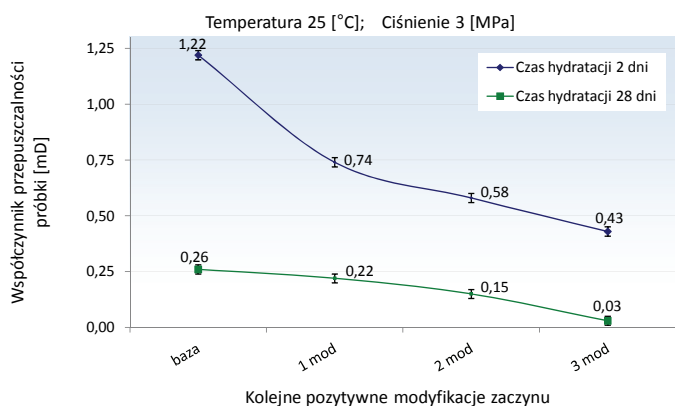
w/c – współczynnik wodno-cementowy,

\*\* inny rodzaj dodatku (dla wyższej temperatury).

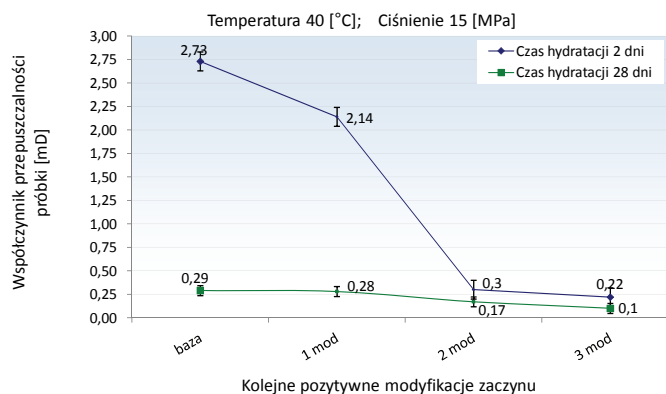


Tablica 2. Parametry zaczynów przed i po modyfikacji dla temperatur od 25 do 80°C

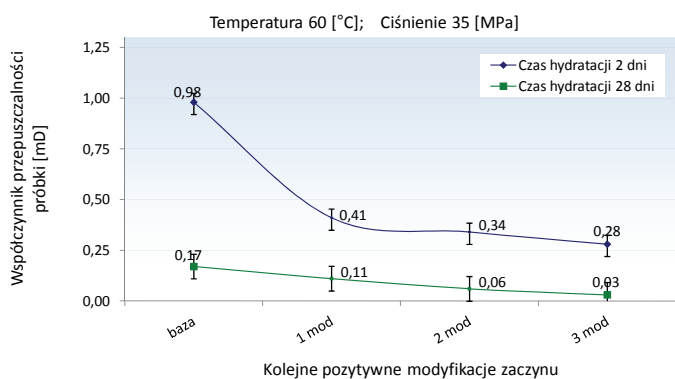
Dla warunków temp./ciśn.		25°C/3 MPa		40°C/15 MPa		60°C/35 MPa		80°C/42 MPa	
Skład		Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.	Bazowy	Zmodyf.
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]		1,78	1,80	1,80	1,80	1,78	1,79	1,78	1,84
Rozlewność [mm]		275	240	280	260	295	200	230	275
Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]		124,0	30,0	118,0	11,0	45,0	14,0	69,0	24,0
Lepkość plastyczna [mPa·s]		91,5	93,0	78,0	112,0	120,0	99,0	66,0	120,0
Granica płynięcia [Pa]		9,4	9,6	1,9	8,4	3,8	5,3	5,3	5,3
Wytrzymałość strukturalna [Pa]		8,2	7,7	3,8	5,8	6,7	4,8	12,0	4,8
Odstój wody [%]		0,4	0,0	2,8	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0
Czas gęstnienia [h:min]		30 Bc	2:40	2:08	2:25	2:45	3:48	3:49	5:20
		100 Bc	3:20	3:30	3:15	5:11	4:30	5:41	5:41
Przepuszczalność [mD]	po czasie 2 dni	1,22	<b>0,43</b>	2,73	<b>0,22</b>	0,98	<b>0,28</b>	0,82	<b>0,10</b>
	po czasie 28 dni	0,26	<b>0,03</b>	0,29	<b>0,10</b>	0,17	<b>0,03</b>	0,17	<b>0,03</b>



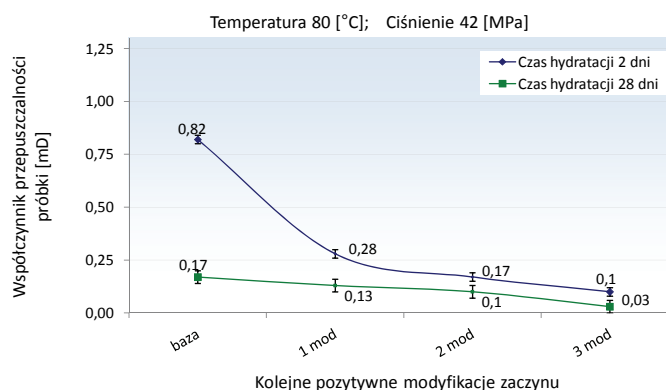
Rys. 2. Obniżanie się przepuszczalności kamienia cementowego na skutek wprowadzonych modyfikacji (dla czasu hydratacji kamienia cementowego 2 dni oraz 28 dni)



Rys. 3. Obniżanie się przepuszczalności kamienia cementowego na skutek wprowadzonych modyfikacji (dla czasu hydratacji kamienia cementowego 2 dni oraz 28 dni)



Rys. 4. Obniżanie się przepuszczalności kamienia cementowego na skutek wprowadzonych modyfikacji (dla czasu hydratacji kamienia cementowego 2 dni oraz 28 dni)



Rys. 5. Obniżanie się przepuszczalności kamienia cementowego na skutek wprowadzonych modyfikacji (dla czasu hydratacji kamienia cementowego 2 dni oraz 28 dni)

**Podsumowanie**

- Podczas opracowywania zaczynów przeznaczonych do uszczelniania otworów gazowych należy zwrócić szczególną uwagę na następujące parametry:
  - odpowiedni dla danych warunków czas gęstnienia,
  - właściwą lepkość plastyczną, granicę płynięcia oraz wytrzymałość strukturalną,

- niską filtrację zaczynu,
  - zerowy odstęp wody.
2. Na podstawie analizy parametrów zaczynu i powstałego kamienia cementowego należy przeprowadzać modyfikacje składu w celu osiągnięcia jak najlepszej efektywności uszczelnienia przestrzeni pierścieniowej.
  3. Wprowadzanie modyfikacji receptur zaczynów uszczelniających ma na celu zagęszczenie struktury, dzięki czemu uzyskany kamień cementowy jest nieprzepuszczalny dla gazu i jednocześnie zachowuje bardzo dobre parametry technologiczne.
  4. Kamień cementowy powstały z zaczynu po przeprowadzeniu modyfikacji powinien charakteryzować się jak najmniejszymi wartościami przepuszczalności dla gazu oraz możliwie niską porowatością.
  5. Wzrost temperatury i ciśnienia powoduje obniżenie przepuszczalności i porowatości stwardniałego zaczynu uszczelniającego.
  6. Z uwagi na występowanie w matrycy cementowej porów zamkniętych, które nie biorą udziału w przepływie płynu, wpływ takiego parametru jak całkowita powierzchnia porowa jest mało znaczący, jeśli bierze się pod uwagę interpretację struktury kamienia cementowego pod kątem przepuszczalności dla płynów.
  7. Otrzymane w efekcie prowadzonych modyfikacji receptury zaczynów i powstałe z nich kamienie cementowe mogą być zastosowane podczas uszczelniania otworów gazowych.

Wspomnieć należy również, że na skuteczność uszczelniania kolumn rur okładzinowych wpływa wiele czynników, np. występowanie nieprzewidywalnych procesów fizyczno-chemicznych w układzie: zaczyn uszczelniający–skała–płyny złożowe oraz mechanicznych w układzie: kamień cementowy–skała. Czynniki te w sposób znaczący mogą przyczyniać się do powstawania dróg migracji gazu.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 3, s. 170–175

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Ocena przepuszczalności kamieni cementowych pod kątem ograniczenia migracji gazu z wykorzystaniem przepuszczalnościomierza cementowego* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-68/13, nr zlecenia 0068/KW/13/01.

## Literatura

- [1] Aksielrud G. A., Altszuler M. A.: *Ruch masy w ciałach porowatych*. WNT. Warszawa 1987.
- [2] Bonett A., Pafitis D.: *Getting to the Root of Gas Migration*. Oilfield Review. Spring 1996.
- [3] Carman P. C.: *Flow of Gases through Porous Media*. Butterworth. London 1956.
- [4] Carman P. C.: *Fluid Flow through a Granular Bed*. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, London 1937, vol. 15, pp. 150–156.
- [5] Colins R. E.: *The flow of fluids through porous materials*. Van Nostrand. New York 1961.
- [6] Habrat S., Raczkowski J., Zawada S.: *Technika i technologia cementowan w wiertnictwie*. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa 1980.
- [7] *Przepuszczalnościomierz cementu*. Instrukcja. OFI Testing Equipment, Inc. Autoryzowany przedstawiciel: EUROTECH INT Sp. z o.o.
- [8] Klonecki W.: *Statystyka dla inżynierów*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1999.
- [9] Kozeny J.: *Hydraulik*. Springer. Wien 1953.
- [10] Kozeny J.: *Über kapillare Leitung der Wassers im Boden*. Sitzungsber. Akademie der Wissenschaften, Wien 1927, vol. 136, pp. 271–306.
- [11] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1991.
- [12] Liszka K.: *Podstawy eksploatacji złoz ropy*. Skrypt uczelniany nr 869. AGH. Krakow 1982.
- [13] Nelson B.: *Cementowanie otworow wiertniczych*. Schlumberger Educational Service. Houston, Texas 1990.
- [14] Rzepka M.: *Receptury zaczynow cementowych z dodatkiem mikrocementu do warunkow wysokich temperatur i cisnien zlozowych*. Dokumentacja wewnętrzna INiG. Krakow 2005.
- [15] Rzepka M.: *Zaczyny cementowe do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych, w temperaturze dynamicznej do ok. 120°C*. Nafta-Gaz 2010, nr 4, s. 274–279.
- [16] Rzepka M.: *Zaczyny cementowe o wysokiej elastyczności kamienia cementowego*. Nafta-Gaz 2011, nr 2, s. 113–119.
- [17] SPE ATW: *Cementing the interface – best practices and techniques*. Moscow, November 15–17.2004.
- [18] Szostak L.: *Dowiercanie i udostępnianie złoz ropy i gazu*. Wydawnictwo Geologiczne. Warszawa 1971.
- [19] Walker Jr. P. J., Verma S. K., Rivera-Utrilla J., Davis A.: *Densities, porosities and surface areas of coal macerals as measured by their interaction with gases, vapours and liquids*. Fuel 1988, vol. 67, pp. 1615–1623.



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