

Jacek Hendel*, Albert Złotkowski*, Stanisław Stryczek*

**MODEL STANOWISKA LABORATORYJNEGO
PRZEZNACZONEGO DO POMIARÓW PRZEPUSZCZALNOŚCI
STWARDNIAŁEGO ZACZYNU USZCZELNIAJĄCEGO,
ZBUDOWANY
W OPARCIU O DYNAMICZNĄ PRASĘ FILTRACYJNĄ HTHP****

1. WSTĘP

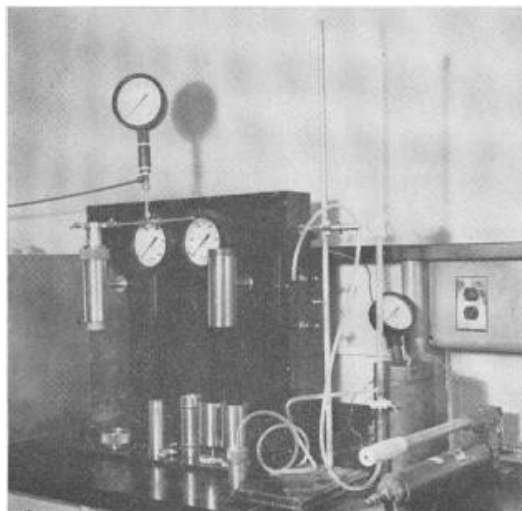
Zbyt duża przepuszczalność stwardniałego zaczynu cementowego wpływa bezpośrednio na korozję kamienia cementowego i jego wytrzymałość mechaniczną oraz stwarza możliwość migracji płynów złożowych, w szczególności gazu, wzdłuż profilu odwiertu. Maksymalna wartość przepuszczalności kamienia cementowego, mierzona powietrzem zgodnie z normą [3] po dwóch dniach utwardzenia, dopuszczająca cement wiertniczy do użytku, wynosiła 10^{-9} m². Ponadto norma nie wymagała spełnienia powyższego warunku, jeżeli badania geologiczne stwarzały uzasadnione przesłanki, że cement nie zetknie się z płynem złożowym w stanie gazowym. Obecnie obowiązujące normy [4–8] nie definiują granicznej wartości przepuszczalności kamienia cementowego.

**2. METODYKA BADANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI
STWARDNIAŁEGO ZACZYNU CEMENTOWEGO**

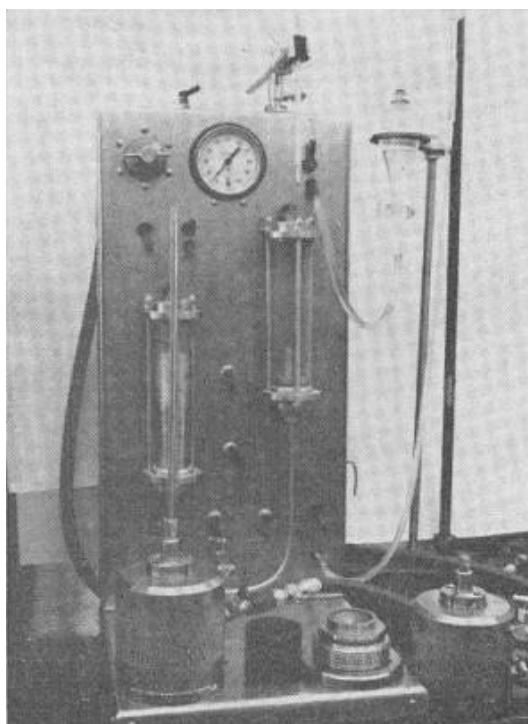
Problem przepuszczalności kamienia cementowego jest przedmiotem badań ośrodków akademickich i instytutów technicznych od wielu lat [1, 2, 9]. Na uwagę zasługują szczególnie publikacje J.M. Goode'a z firmy Halliburton. Na rysunkach 1 i 2 oraz w tabeli 1 przedstawiono wykorzystywany przez niego sprzęt, jak również wartości parametrów warunków pomiarów, w których przeprowadzał badania.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach badań statutowych nr 11.11.190.555



Rys. 1. Stanowisko przeznaczone do badania przepuszczalności kamienia cementowego przy użyciu gazu [1]



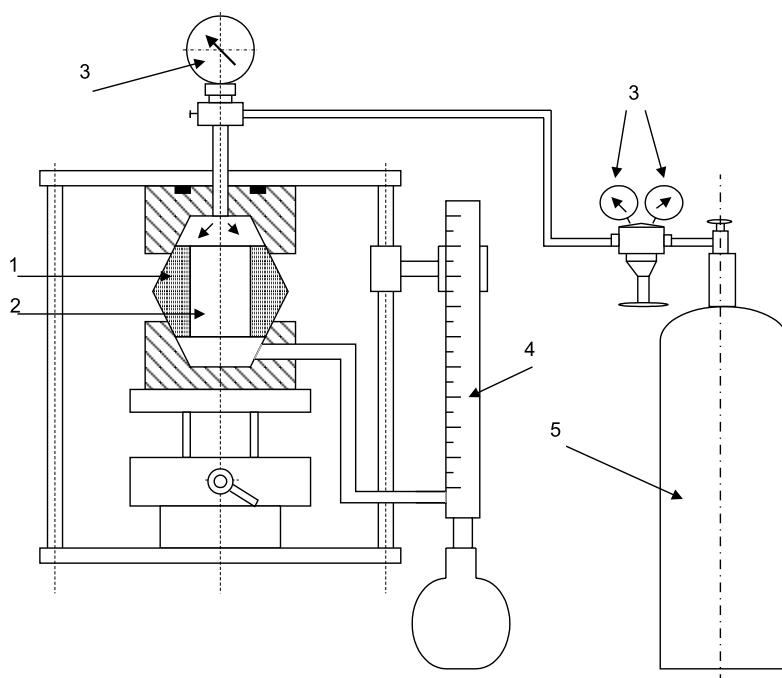
Rys. 2. Stanowisko przeznaczone do badania przepuszczalności kamienia cementowego za pomocą wody [1]

Tabela 1

Wartości parametrów warunków pomiarów przepuszczalności wykonanych przez Goode'a [1]

Płyn filtrujący	azot	woda
Czas od zalania próbki do badania, dni	7, 28	1, 7, 28
Różnica ciśnień, psi	340, 500, 700	60
Różnica ciśnień, MPa	2,34, 3,45, 4,83	0,41
Temperatura płynu filtrującego, °F	80, 100, 120, 140	80, 100, 120, 140
Temperatura płynu filtrującego, °C	27, 38, 49, 60	27, 38, 49, 60

Badanie przepuszczalności stwardniałego zaczynu cementowego zgodnie z PN-85 G-02320 [3] polegało na pomiarze czasu przepływu powietrza określonej objętości przez próbkę kamienia cementowego pod stałą różnicą ciśnień. Badanie wykonywano w temperaturze otoczenia, a ciśnienie różnicowe nie powinno było przekroczyć wartości 1,5 MPa. Schemat aparatu do wykonywania badania przepuszczalności przy użyciu gazu obrazuje rysunek 3.

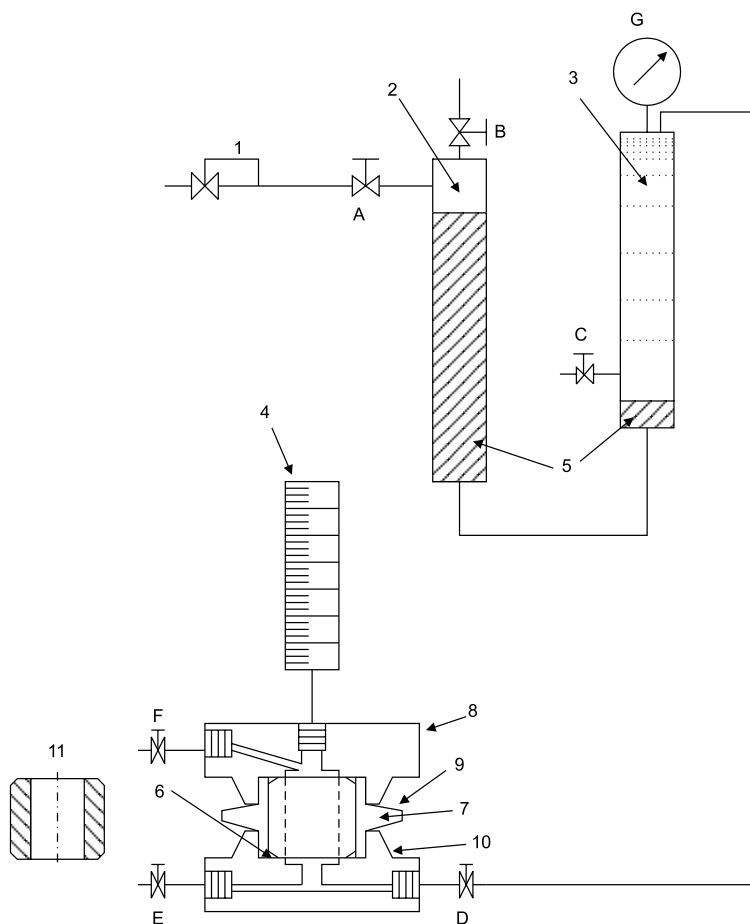


Rys. 3. Aparat do oznaczenia przepuszczalności kamienia cementowego powietrzem:
1 – pierścień gumowy, 2 – kamień cementowy, 3 – manometr, 4 – biureta pomiarowa,
5 – butla ze sprężonym powietrzem i reduktorem

Opracowanie własne na podstawie normy [3]

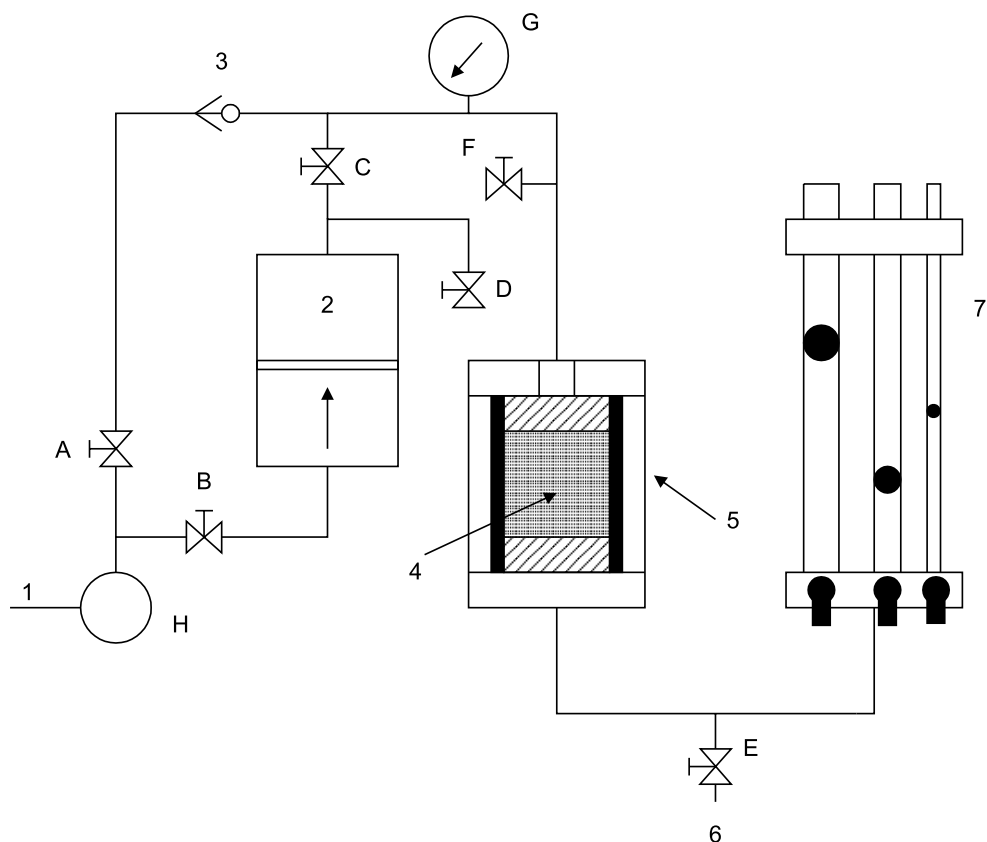
Obecnie obowiązująca norma PN-EN ISO 10426-2 [6] opisuje proces pomiaru przepuszczalności cieczą za pomocą przepuszczalnościomierza dla kamienia cementowego (rys. 4) lub alternatywnie przepuszczalnościomierza rdzeniowego (rys. 5). Badanie polega na pomiarze natężenia przepływu cieczy oraz ciśnienia, pod którym doprowadzona jest ona do próbki. Norma zaleca, by filtrująca ciecz była przetłaczana pod ciśnieniem w granicach $100\div 1400$ kPa.

Zarówno obecnie obowiązująca norma, jak i przytoczony powyżej artykuł [1] zalecają prowadzenie badania przepuszczalności kamienia cementowego cieczą przy niskim ciśnieniu różnicowym, nieprzekraczającym 1400 kPa, aby nie doprowadzić do turbulentnego przepływu cieczy przez próbkę.



Rys. 4. Przepuszczalnościomierz do cementu: 1 – reduktor ciśnienia, 2 – powietrze, 3 – woda, 4 – rurka pipety pomiarowej, 5 – rtęć, 6 – o-ring, 7 – forma, 8 – pokrywa uchwyty, 9 – cylinder uchwyty, 10 – podstawa uchwyty, 11 – detale formy, A, B, C, D, E, F – zawory, G – miernik ciśnienia

Opracowanie własne na podstawie [6]



Rys. 5. Przepuszczalnościomierz rdzeniowy ciekowy/gazowy: 1 – wlot gazu, 2 – akumulator cieczy, 3 – zawór zwrotny, 4 – próbka kamienia cementowego, 5 – zestaw uchwytu rdzenia, 6 – rura drenażowa, 7 – przepływomierz, A – zawór gazowy, B – zawór cieczy, C – zawór, D – zawór układu napełniania, E – zawór odcinający, F – zawór upustowy, G – ciśnienie na wlocie, H – reduktor
Opracowanie własne na podstawie [6]

3. KONSTRUKCJA PRZEPUSZCZALNOŚCIOMIERZA CIECZOWEGO Z WYKORZYSTANIEM PRASY HTHP

W celu przeprowadzenia badań przepuszczalności kamienia cementowego cieczą, w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury, na WWiNiG AGH wykonano stanowisko laboratoryjne, adaptując dynamiczną prasę filtracyjną HTHP (*High Temperature High Pressure*). Stanowisko pozwala badać przepuszczalność dowolną cieczą w zakresie temperatur od 20 °C do temperatury wrzenia cieczy oraz przy ciśnieniu różnicowym do 8 MPa.

Pomiar polega na zmierzeniu ilości przefiltrowanej cieczy w określonym czasie pod stałą temperaturą i przy stałej różnicy ciśnień zgodnie z prawem Darcy'ego:

$$Q = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot F \quad (1)$$

które po przekształceniu można zapisać w formie:

$$k = \frac{Q \cdot L \cdot \mu}{F \cdot \Delta p} \quad (2)$$

gdzie:

- k – współczynnik przepuszczalności badanego kamienia cementowego, m^2 ,
- Q – natężenie przepływu cieczy, m^3/s ,
- L – długość próbki, m ,
- F – pole powierzchni próbki, m^2 ,
- μ – współczynnik lepkości dynamicznej filtrującej cieczy w temperaturze pomiaru, $Pa \cdot s$,
- Δp – różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem wejściowym, przed próbką, a atmosferycznym, Pa .

W celu przeprowadzenia pomiaru należy przygotować odpowiednie próbki. Badanie przepuszczalności odbywa się z wykorzystaniem cylindrycznych próbek o wysokości 2 cali i średnicy 1 cala (rys. 6). Aby wyniki doświadczenia były miarodajne, każde badanie należy wykonać na kilku próbkach zaczynu uszczelniającego o tej samej recepturze.

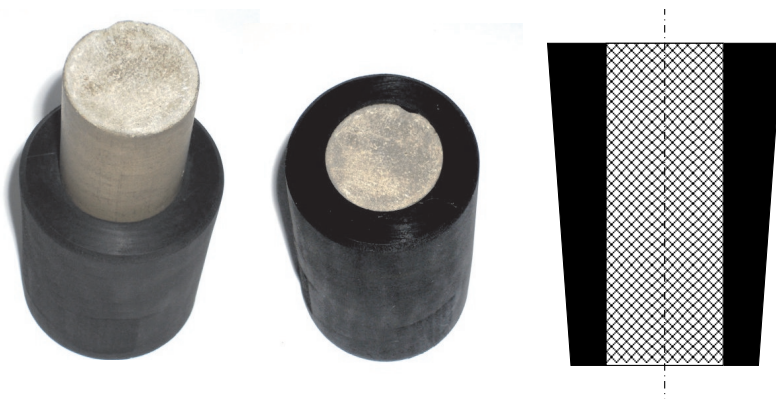


Rys. 6. Próbkę w kształcie walca o wysokości 2" i średnicy 1"

Próbki zaczynów uszczelniających używane do badania przepuszczalności można przechowywać w warunkach powietrzno-suchych bez dostępu wody, lecz w takim przypadku należy poprzedzić właściwy pomiar nasyceniem próbki cieczą. Probki przechowywane w auto-

klawie, w wodzie wodociągowej lub złożowej, pod ciśnieniem i o temperaturze, w jakiej będzie przeprowadzany pomiar, uważa się za całkowicie nasycone płynem. W tym wypadku początek pomiaru czasu filtracji następuje w momencie rozpoczęcia procedury pomiaru.

Aby przeprowadzić pomiar, uprzednio przygotowaną próbkę należy włożyć do tulei gumowej (rys. 7) o niskiej twardości (40° ShA), uniemożliwiającej przepływ płynu poza próbką.



Rys. 7. Umieszczenie próbki w tulei gumowej

Następnie próbkę w tulei gumowej należy wcisnąć w zbieżny cylinder. Umieszczenie tulei gumowej z próbką w cylindrze następuje przy użyciu znacznej siły. Ścisłe przyleganie cylindra i tulei gumowej jest zagwarantowane dzięki właściwemu uszczelnieniu. Cylinder na obwodzie denka jest zaopatrzony w uszczelkę typu ring współpracującą z całą wysokociśnieniową prasą HPHT (rys. 8).

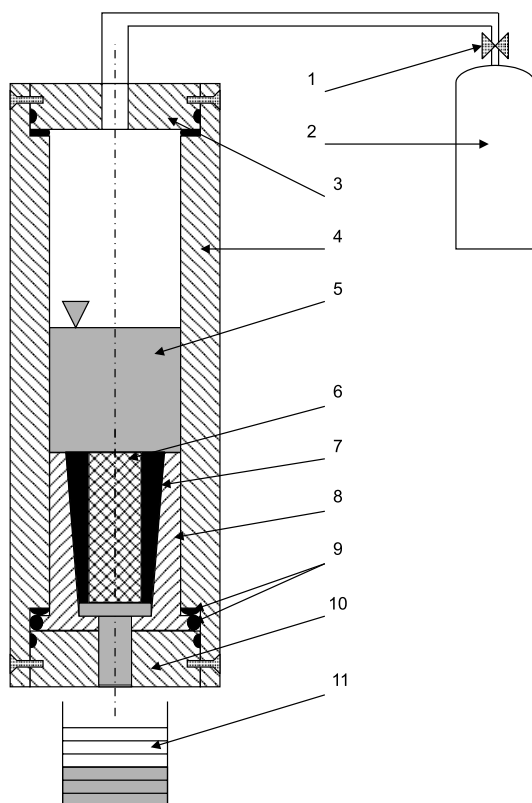


Rys. 8. Umieszczanie tulei z próbką w specjalnym zbieżnym cylindrze

Tak przygotowany zestaw należy umieścić w celi wysokociśnieniowej prasy HTHP (rys. 9). Następnie dokręcić wieczka. Górne, umożliwiające tłoczenie gazu z butli, wywierającego ciśnienie na filtrującą ciecz oraz dolne zaopatrzone w ujście cieczy. Przed dokręceniem górnego wieczka do cylindra należy nalać ciecz, która ma filtrować przez próbkę stwardniałego zaczynu uszczelniającego (rys. 10).



Rys. 9. Cella wysokociśnieniowa oraz dekle prasy HPHT



Rys. 10. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – reduktor ciśnienia, 2 – butla z azotem, 3 – dekiel górny, 4 – cela prasy HTHP, 5 – filtrująca ciecz, 6 – badana próbka stwardniałego zaczynu uszczelniającego, 7 – tuleja gumowa, 8 – zbieżny cylinder, 9 – system podwójnego uszczelnienia, 10 – dekiel dolny, 11 – menzurka pomiarowa

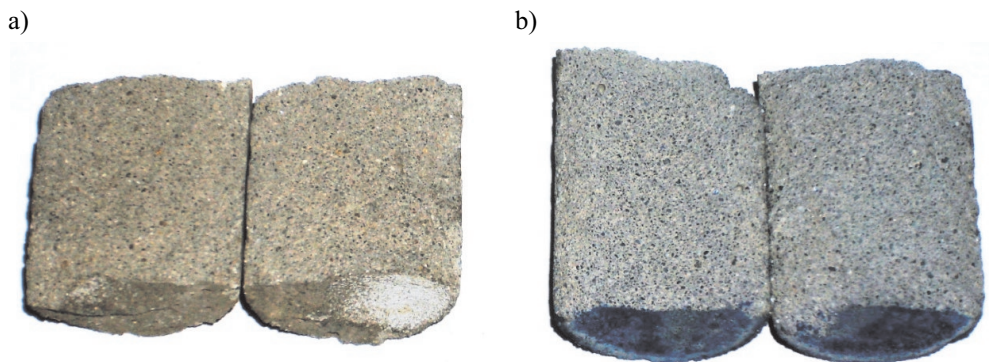
4. WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA

W celu sprawdzenia szczelności układu i poprawności przebiegu procesu pomiarowego wykonano dwa kontrolne badania. W pierwszym zamiast cementowej próbki zastosowano stalowy walec o takich samych wymiarach jak próbki. Podczas kilkugodzinnego pomiaru przez układ nie przesączyła się ciecz, jak również nie stwierdzono żadnych śladów wilgoci w rejonie dolnego denka po rozebraniu celi wysokociśnieniowej.

Następnie wykonano próbkę z cementu wiertniczego HSR (cementownia Rejowiec), o współczynniku wodno-cementowym w/c równym 0,5. W celu zwiększenia przepuszczalności dodano do zaczynu kwarcowego kruszywa mineralnego w stosunku masowym do cementu 1:1. Badanie prowadzono w temperaturze 20 °C, pod ciśnieniem 2,75 MPa, natomiast filtrującą wodę zabarwiono błękitem metylowym.

Po zakończeniu doświadczenia i przełamaniu wzdłużnym próbki stwierdzono filtrację zachodzącą równomiernie w całym przekroju podłużnym badanej próbki stwardniałego zaczynu uszczelniającego, co jednoznacznie potwierdziło prawidłową konstrukcję i działanie stanowiska badawczego.

Wyniki badania kontrolnego przedstawiono na rysunku 11. Dla porównania przedstawiono również próbkę o tej samej recepturze, której przepuszczalność badano przy użyciu wody wodociągowej.



Rys. 11. Wynik pomiaru kontrolnego: a) próbka badana wodą wodociągową;
b) próbka badana wodą wodociągową zabarwioną błękitem metylowym

5. WNIOSKI

- 1) Skonstruowanie w Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii WWiNiG stanowisko laboratoryjne pozwala mierzyć cieczą przepuszczalność stwardniałych zaczynów uszczelniających przy podwyższonej temperaturze i znacznym ciśnieniu różnicowym.
- 2) Aparatura spełnia zalecania obecnie obowiązującej normy [6] dotyczące przepuszczalnościomierzy cieczowych.

- 3) Zmieniając rodzaj cieczy filtrującej, różnicę ciśnień, temperaturę pomiaru, skład cementu i współczynnik wodno-cementowy, uzyskuje się szeroki zakres możliwości przyszłych badań.
- 4) Stanowisko może służyć do kontroli działania substancji poprawiających szczelność zaczynów uszczelniających i innych dodatków zmniejszających przepuszczalność.
- 5) Przeprowadzone badanie kontrolne potwierdziło prawidłowe działanie stanowiska laboratoryjnego.

LITERATURA

- [1] Goode J.M.: *Gas and water permeability data for some common oilwell cements*. Journal of Petroleum Technology, vol. 14, no. 8, August 1962, s. 851–854.
- [2] Morgan B.E., Dumbauld G.K.: *Measurement of the Permeability of Set Cement*. Journal of Petroleum Technology, vol. 4, no. 6, June 1952, s. 10, 16.
- [3] PN-85 G-02320: *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych*.
- [4] PN-EN ISO 10426-1: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 1: Specyfikacja*.
- [5] PN-EN ISO 10426-1:2010/AC: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 1: Specyfikacja*.
- [6] PN-EN ISO 10426-2: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 2: Badania cementów wiertniczych*.
- [7] PN-EN ISO 10426-2:2006/A1: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 2: Badania cementów wiertniczych*.
- [8] PN-EN ISO 10426-2:2006/AC: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – Część 2: Badania cementów wiertniczych*.
- [9] Winn R.H., Anderson T.O., Carter L.G.: *A Preliminary Study of Factors Influencing Cement Bond Logs*. Journal of Petroleum Technology, vol. 14, no. 4, April 1962, s. 369–372.