

**Marcin Rzepka\*, Stanisław Stryczek\*\***

**LABORATORYJNE METODY  
OKREŚLANIA PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH  
ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH  
PRZED ZABIEGIEM ZWIĄZANYM  
Z PROCESEM USZCZELNIANIA KOLUMN RUR OKŁADZINOWYCH  
W OTWORACH WIERTNICZYCH\*\*\***

**1. WPROWADZENIE**

Zabieg uszczelniania kolumn rur okładzinowych jest jednym z najważniejszych etapów w procesie wiercenia otworów wiertniczych. Niezależnie od głębokości, uwarunkowań geologiczno-hydrogeologicznych oraz warunków techniczno-technologicznych panujących w otworze wiertniczym, zaczyn uszczelniający musi przede wszystkim skutecznie wypełnić przestrzeń pierścieniową między kolumną rur okładzinowych a ścianą otworu wiertniczego.

Szczególne znaczenie przywiązuje się do uszczelniania technicznych oraz eksploatacyjnych kolumn rur. Jest to podyktowane koniecznością wiarygodnego opróbowania poziomów perspektywicznych, uzyskaniem optymalnego wydobycia węglowodorów oraz zapewnieniem bezpieczeństwa pracy w okresie eksploatacji odwiertu przez szereg lat.

Wysokie wymagania co do skuteczności uszczelniania przestrzeni pierścieniowej stawiane są zwłaszcza w przypadku wykonywania zabiegów cementowania w otworach, w który przewiduje się występowanie horyzontów gazowych, oraz w otworach wierconych na potrzeby podziemnego magazynowania gazu. Jest to spowodowane bardzo dużymi trudnościami w likwidowaniu migracji i wpływów gazu z przestrzeni międzyrurowych i pozarurowych [5, 6].

---

\* Instytut Nafty i Gazu O/Krosno

\*\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych w INiG O/Krosno oraz w WWNiG AGH

Zasadniczą rolę w procesie prawidłowego uszczelniania otworu wiertniczego odgrywa jakość użytego zaczynu uszczelniającego. Skład i parametry zaczynu uzależnione są przede wszystkim od warunków geologicznych oraz hydrogeologicznych otworu, w którym następuje proces wiązania i tworzenia się kamienia cementowego, rodzaju przewiercanych skał, głębokości, temperatury i ciśnienia na dnie otworu wiertniczego. Dlatego też każdy zaczyn uszczelniający przed zastosowaniem go do uszczelniania rur okładzinowych w otworze wiertniczym powinien być szczegółowo zbadany w laboratorium w warunkach otworopodobnych. Badania te muszą obejmować wszystkie te parametry technologiczne, które mogą bezpośrednio wpływać na przebieg i skuteczność wykonania zabiegu cementowania rur [1, 2, 3, 4].

## **2. METODY BADAŃ PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH ŚWIEŻYCH ZACZYNÓW CEMENTOWYCH PRZED ZABIEGIEM USZCZELNIANIA RUR**

Norma PN-EN 10426-2: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych* oraz amerykańska norma API SPEC 10: *Specification for Materials and Testing for Well Cements* określają sposób sporządzania zaczynu oraz precyzują wszystkie procedury badawcze, jakim poddawane są zaczyny cementowe przeznaczone na potrzeby wiertnictwa naftowego.

Według autorów artykułu do niezbędnych pomiarów, jakie powinno się wykonać przed każdym uszczelnianiem kolumn rur okładzinowych, należy zaliczyć oznaczanie gęstości, parametrów reologicznych, czasu gęstnienia, odstoju wody oraz filtracji zaczynu cementowego [11, 12].

### **2.1. Badanie gęstości zaczynu cementowego**

Oznaczanie gęstości zaczynu cementowego odbywa się, podobnie jak ma to miejsce w przypadku płuczki wiertniczej, za pomocą wagi typu Baroid. Częstym problemem spotykanym podczas pomiarów gęstości zaczynu cementowego jest duża zawartość powietrza w zaczynie, wprowadzonego podczas mieszania. Zaleca się zatem wykonywanie pomiaru gęstości zaczynu cementowego za pomocą ciśnieniowej wagi gęstościowej. Poprzez wywarcie ciśnienia na próbkę następuje zmniejszenie objętości powietrza do pomijalnie małej wartości, co sprawia, że wyniki pomiarów gęstości zaczynu zbliżone są do wartości rzeczywistych gęstości zaczynu w warunkach otworowych.

### **2.2. Badanie parametrów reologicznych zaczynu cementowego**

W technologiach wiertniczych do najczęściej stosowanych w praktyce modeli reologicznych należy zaliczyć [7, 8, 9, 10]:

– Model Newtona: 
$$\tau = \eta \left( -\frac{dv}{dr} \right) \quad (1)$$

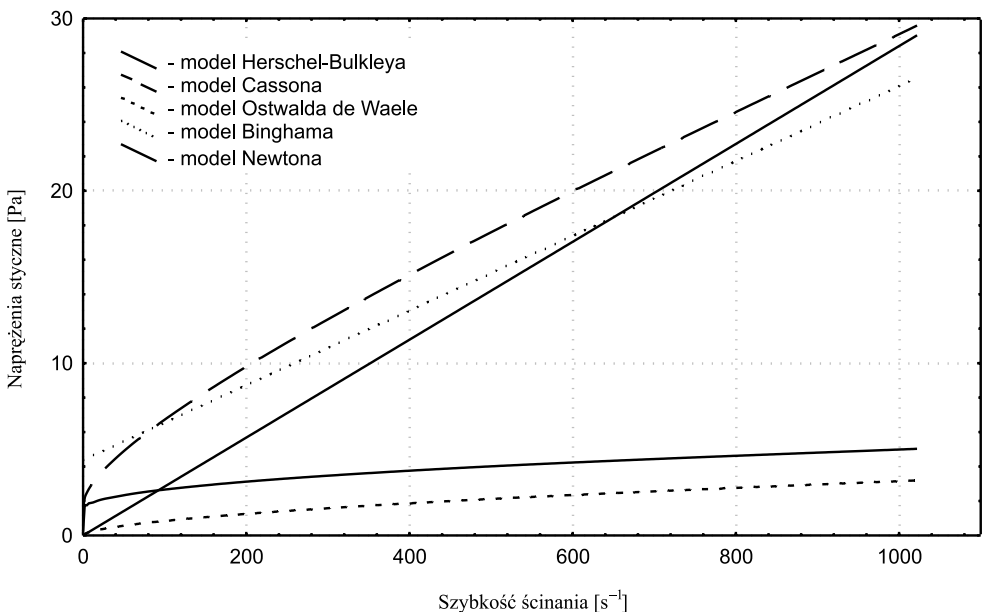
– Model Binghama:  $\tau = \tau_y + \eta_{pl} \left( -\frac{dv}{dr} \right)$  (2)

– Model Ostwalda–de Waele:  $\tau = k \left( -\frac{dv}{dr} \right)^n$  (3)

– Model Cassona:  $\tau^2 = \tau_y^2 + \eta_{cas}^2 \left( -\frac{dv}{dr} \right)^2$  (4)

– Model Herschela–Bulkleya:  $\tau = \tau_y + k \left( -\frac{dv}{dr} \right)^n$  (5)

Porównanie krzywych reologicznych cieczy wiertniczych zestawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Krzywe reologiczne modeli cieczy wiertniczych [7, 10]

W celu określania parametrów reologicznych cieczy wiertniczych stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne reometrów. Począwszy od prostych konstrukcji wypływowych (lejek Marscha), poprzez rotacyjne o współosiowych cylindrach (Fann, Chan) do układów stożek-płytki (np. Brookfield DV II Pro) czy płytki-płytki (np. RheoStress 600 firmy Haake).

Zasady wyznaczania parametrów reologicznych dla podstawowych dwóch modeli płynów wiertniczych, tj: uogólnionych cieczy newtonowskich (cieczy Newtona, Ostwalda–de Waele) oraz nienewtonowskich liniowych plastycznolepkich (cieczy binghamowskich)

określa norma [1]. W normie tej przewiduje się pomiar parametrów reologicznych dla ściśle określonych szybkości ścinania z wykorzystaniem lepkościomierzy obrotowych typu Fann lub Chan. W przypadku stosowania innych modeli reologicznych np., nieliniowych cieczy plastycznolepkich (cieczy Herschela–Bulkleya, Cassona), aplikacja zależności zawartych w normie [1] jest bezzasadna. W Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano zasady wyznaczania parametrów reologicznych modeli Cassona oraz Herschela–Bulkleya oraz metodykę doboru optymalnego modelu reologicznego cieczy wiertniczej. Został również opracowany program numeryczny RheoSolution, wspomagający proces doboru modelu reologicznego dla rzeczywistej cieczy wiertniczej, w tym również różnego typu zaczynów uszczelniających [7, 8, 9, 10].

W celu wyznaczenia optymalnego modelu reologicznego płynu wiertniczego oraz jego parametrów reologicznych dokonuje się pomiaru zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi ( $\tau_i$ ) a szybkościami ścinania ( $\dot{\gamma}_i$ ) badanej cieczy. Badanie wykonuje się przy pomocy 6 lub 12 zakresowego lepkościomierza obrotowego typu Fann, mierząc kąt skręcenia przy odpowiednich prędkościach obrotowych wirnika. Uwzględniając układ cylindrów rotora i statora oraz stosowaną sprężynę, dokonuje się odpowiednich przeliczeń [3, 7].

### 2.3. Badanie czasu gęstnienia zaczynu cementowego

Czas gęstnienia zaczynu cementowego (tj. czas od momentu zarobienia zaczynu do momentu, w którym zaczyn cementowy jest jeszcze przetłaczalny) określa się za pomocą konsystometru ciśnieniowego [11, 12].

Najczęściej używane konsystometry składają się z cylindrycznego pojemnika na zaczyn cementowy, wyposażonego w nieruchomy zestaw mieszadła, przy czym całość obudowana jest w pojemniku ciśnieniowym przystosowanym do temperatur i ciśnień, jakie występują w otworze. Pojemnik z zaczynem wprawiany jest w ruch obrotowy z prędkością 150 obr./min  $\pm$ 15 obr./min. Przestrzeń między pojemnikiem na zaczyn cementowy oraz ścianami naczynia ciśnieniowego powinna być całkowicie wypełniona olejem na bazie węglowodorów.

Konsystencję zaczynu cementowego określa się w jednostkach Beardena ( $B_C$ ). Jest to wielkość bezwymiarowa, która nie ma bezpośredniego przełożenia lub zamiany na jednostki lepkości, takie jak np.  $cP$ . Wielkość  $B_C$  mierzy się za pomocą urządzenia, na które składa się potencjometr oraz układ pomiaru napięcia. Urządzenie to należy kalibrować raz w miesiącu oraz po każdej wymianie lub regulacji sprężyny kalibracyjnej, opornika lub styku. Po przeprowadzeniu kalibracji wielkości konsystencji oraz momenty skręcające powiązane są zależnością

$$T = 78,2 + 20,02 \cdot B_C \quad (6)$$

gdzie:

- $T$  – moment skręcający [gram · centymetr];
- $B_C$  – konsystencja [jednostki Beardena].

Podczas kalibracji potencjometru w celu wywarcia momentu obrotowego na sprężynie potencjometru należy się posłużyć ciężarkami (odważnikami), przy czym promień ramy potencjometru przyjmowany jest jako długość ramienia dźwigni. Wskutek dodawania cięż-

żarków następuje odkształcenie ramienia i rejestrowane jest napięcie prądu stałego, na podstawie wielkości którego określana jest wartość  $B_C$ . W tabeli 1 podano przykład obliczeń. Niektóre urządzenia umożliwiają bezpośredni odczyt  $B_C$ .

**Tabela 1**

Zależność konsystencji zaczynu od momentu obrotowego  
(dla potencjometru z mechanizmem pomiarowym o promieniu 52 mm  $\pm$  1 mm)

Obliczony ekwiwalentny moment obrotowy [g·cm]	Masa dodanego ciężarka (odważnika) [g $\pm$ 0,1]	Obliczona konsystencja zaczynu [ $B_C$ ]
260	50	9
520	100	22
780	150	35
1 040	200	48
1 300	250	61
1 560	300	74
1 820	350	87
2 080	400	100

Przygotowanie oraz napełnienie pojemnika konsystometru zaczynem cementowym wykonuje się w następujący sposób:

1. wyczyszczenie i nasmarowanie połączeń gwintowych pojemnika;
2. zamontowanie zestaw wału łopatki (mieszadła) i zabezpieczenie jej w tulei za pomocą pierścienia na kołnierzu;
3. sprawdzenie, czy łopatka obraca się bez przeszkód;
4. odwrócenie zestawu pojemnika i napełnienie go zaczynem do poziomu ok. 6 mm poniżej wierzchu;
5. wkręcenie metalowej płyty podstawy i sprawdzenie, czy zaczyn cementowy wypłynął przez otwór w środku pokrywy;
6. wytarcie rozlanego zaczynu cementowego z zewnętrznych powierzchni pojemnika;
7. wkręcenie korka do pojemnika;
8. ponowne sprawdzenie łopatki (czy obraca się bez przeszkód);
9. włożenie zestawu pojemnika z zaczynem cementowym do konsystometru.

#### **Prowadzenie badania czasu gęstnienia na konsystometrze ciśnieniowym**

Pojemnik wypełniony zaczynem cementowym należy umieścić na płycie napędowej w naczyniu ciśnieniowym i rozpocząć obracanie pojemnika, przy czym mechanizm potencjometru powinien być zasprzęglony do wału napędowego łopatki. Następnie należy rozpocząć napełnianie naczynia olejem (wówczas wał łopatki nie powinien się obracać).

Po wykonaniu tych czynności należy zamknąć zestaw głowicy naczynia ciśnieniowego, włożyć czujnik temperatury przez otwór w zestawie głowicy i częściowo przykręcić go

na gwincie. Po całkowitym napełnieniu naczynia ciśnieniowego olejem dokręcić gwint czujnika temperatury.

W trakcie przeprowadzania badań należy podnosić temperaturę i ciśnienie zaczynu cementowego w pojemniku zgodnie z programem zmian temperatury i ciśnienia w symulowanych warunkach otworowych (większość urządzeń posiada automatyczne sterowanie, dzięki któremu temperatura i ciśnienie narasta w sposób zadany przez operatora na początku testu).

Jako początek gęstnienia ustala się wartość  $30 B_c$ . Koniec gęstnienia zaczynu określa się po czasie, kiedy osiągnie on wartość  $100 B_c$  (choć wielkość  $70 B_c$  uważana jest często w literaturze za wartość krytyczną, przy której zaczyn nie może być już pompowany). Czas gęstnienia zaczynu określany w warunkach laboratoryjnych może nieznacznie różnić się od czasu, jaki będzie występował w warunkach otworowych, z uwagi na to, że konsystometr nie uwzględnia w swojej konstrukcji problemu filtracji zaczynu cementowego.

Przed wykonaniem badania czasu gęstnienia zaczynu w symulowanych warunkach otworowych należy wziąć pod uwagę:

- czas mieszania zaczynu w zbiorniku na powierzchni;
- czas, po którym czołowa partia zaczynu cementowego przemieści się na dno otworu;
- wielkość ciśnienia panującego na dnie otworu;
- wielkość ciśnienia początkowego;
- prędkość narastania ciśnienia aż do ciśnienia panującego na dnie otworu;
- wartość temperatury dynamicznej  $T_D$  panującej na dnie otworu wiertniczego (dla danego gradientu geotermicznego);
- prędkość wzrostu temperatury w symulowanych warunkach złożowych.

Końcową temperaturę i ciśnienie utrzymuje się aż do zakończenia badań czasu gęstnienia.

Czas przetłoczenia czołowej partii zaczynu do spodu otworu

$$t_C = \frac{V_r}{q} \quad [\text{min}] \quad (7)$$

gdzie:

- $t_C$  – czas wytłoczenia czołowej partii zaczynu cementowego do spodu otworu [min];
- $V_r$  – pojemność rur [ $\text{m}^3$ ];
- $q$  – wydatek pompy [ $\text{m}^3/\text{min}$ ].

#### **Wartość temperatury dynamicznej panującej na dnie otworu wiertniczego (dla danego gradientu geotermicznego)**

Ustalone warunki temperaturowe w otworze występują wtedy, gdy ciecz wiertnicza wypełniająca otwór ma temperaturę równą pierwotnej temperaturze otaczającej skały. W celu uzyskania warunków zbliżonych do ustalenia się równowagi cieplnej między płuczką a otaczającymi skałami wymagany jest co najmniej kilkudniowy przestój (co w praktyce jest trudne do zrealizowania). Na podstawie wartości gradientu geotermicznego określa się

temperaturę statyczną otworu. Można przyjąć, z dostateczną dla prac wiertniczych dokładnością, że zmiana temperatury z głębokością zachodzi z następującą prawidłowością

$$T_s = T_o + G \times h \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

gdzie:

- $T_s$  – temperatura statyczna na dowolnej głębokości [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $T_o$  – temperatura warstwy neutralnej (w Polsce przyjęto  $8^{\circ}\text{C}$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $G$  – gradient geotermiczny danego regionu [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ];
- $h$  – głębokość zalegania ustalonej warstwy [m].

Temperatura dynamiczna jest wynikiem aktywnego przenoszenia ciepła przez ciecze krążące w otworze wiertniczym, które zakłócają statyczne warunki temperaturowe. Przepływ płuczki, buforu i zaczynu cementowego obniża temperaturę na dnie otworu i zmienia rozkład temperatur na całej jego długości. W związku z tym gradienty temperatur statycznej i dynamicznej na ogół znacznie się od siebie różnią. Dlatego też analityczne wyznaczanie temperatury dynamicznej, szczególnie w otworach o dużych głębokościach, jest mało dokładne. Najbardziej wiarygodne wyniki w tym zakresie uzyskuje się poprzez bezpośredni pomiar temperatury na spodzie otworu (np. poprzez zastosowanie termometrów wrzutowych, zwanych również sondami termoczułymi).

### **Prędkość przyrostu temperatury do poziomu przewidywanego w czasie cyrkulacji**

Wartość temperatury zaczynu cementowego w trakcie badania czasu gęstnienia powinna wzrastać płynnie od temperatury, jaka panuje na powierzchni ( $T_P$ ), do temperatury przewidywanej na dnie otworu podczas cyrkulacji (dynamicznej:  $T_D$ ) w czasie ( $t_C$ ) wymaganym do wtłoczenia pierwszej partii zaczynu do spodu otworu. Prędkość przyrostu temperatury  $v_{\Delta T}$  można obliczyć, posługując się wzorem

$$v_{\Delta T} = \frac{T_D - T_P}{t_C} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{min}] \quad (9)$$

### **Ciśnienie denne**

Ciśnienie panujące na dnie otworu  $p_D$  można obliczyć za pomocą następującego wzoru

$$p_D = g \times \rho_p \times h_r \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

gdzie:

- $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],
- $\rho_p$  – gęstość płuczki [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],
- $h_r$  – głębokość zapuszczenia kolumny rur okładzinowych [m].

Ciśnienie na dnie otworu można obliczyć, uwzględniając obecność innych płynów niż płuczka (np. ciecze wyprzedzające, przemywające, neutralizujące, przybitki) w przestrzeni pierścieniowej otworu.

### Ciśnienie początkowe

Ciśnienie początkowe ( $p_p$ ) to przewidywane ciśnienie pierwszej partii zaczynu cementowego w momencie jej wypływu przez głowicę cementacyjną.

### Prędkość wzrostu ciśnienia do poziomu ciśnienia dennego

Ciśnienie wywierane na zaczyn cementowy podczas badań powinno rosnać do poziomu ciśnienia dennego, a prędkość przyrostu ciśnienia można określić wzorem

$$V_{\Delta p} = \frac{p_D - p_p}{t_C} \quad [\text{Pa}/\text{min}] \quad (11)$$

gdzie:

- $V_{\Delta p}$  – prędkość przyrostu ciśnienia [Pa/min];
- $p_D$  – ciśnienie panujące na dnie otworu [Pa];
- $p_p$  – ciśnienie początkowe [Pa];
- $t_C$  – czas wytlóczenia czołowej partii zaczynu cementowego do spodu otworu [min].

### Czas potrzebny na wytlóczenie zaczynu o objętości równej objętości przestrzeni pierścieniowej

Czas wymagany do wytlóczenia zaczynu cementowego o objętości równej objętości przestrzeni pierścieniowej, między butem kolumny rur okładzinowych a wierzchem kolumny cementu poza rurami, można obliczyć, posługując się następującym wzorem

$$t_{pp} = \frac{V_{pp}}{q} \quad [\text{min}] \quad (12)$$

gdzie:

- $t_{pp}$  – czas potrzebny do przemieszczenia czoła zaczynu cementowego na odcinku od buta rur okładzinowych do wierzchu kolumny cementu za rurami [min];
- $V_{pp}$  – objętość przestrzeni pierścieniowej [ $\text{m}^3$ ];
- $q$  – wydatek pompy [ $\text{m}^3/\text{min}$ ].

## 2.4. Badanie odstoju wody z zaczynu cementowego

W celu wykonania badania odstoju wody należy wlać 250 ml zaczynu do menzurki z podziałką. Długość odcinka menzurki o pojemności 250 ml nie powinna być mniejsza niż 232 mm i nie większa od 250 mm. Podczas wlewania zaczynu należy mieszać łopatką w celu jego homogenizacji. Za początek 2-godzinnego okresu badania uważa się moment wiania zaczynu do menzurki. W celu zapobieżenia parowaniu wody menzurkę należy uszczelnić poprzez owinięcie np. taśmą plastikową. Dla symulacji otworu kierunkowego menzurkę można pochylić pod odpowiednim kątem. Sezonowanie zaczynu ma się odbywać w warunkach statycznych [11, 12].

Po 2 godzinach należy zmierzyć objętość wody niezwiązanej (bezbarwna lub zabarwiona ciecz nagromadzona w menzurce na wierzchu zaczynu cementowego) z niepewnością  $\pm 0,2$  ml.



Do obliczeń zawartości objętościowej  $\phi$  wody niezwiązanej (odstoju wody) wyrażonej w procentach należy użyć wzoru

$$\phi = \frac{V_w * 100}{V_{zc}} \quad [\%] \quad (13)$$

gdzie:

- $V_w$  – objętość wody niezwiązanej [ml];
- $V_{zc}$  – objętość zączynu [ml].

## 2.5. Badanie filtracji zączynu cementowego

Testy określające wielkość filtracji służą do pomiaru dehydratacji zączynu cementowego po wtłoczeniu go poza rury okładzinowe. Pomiarów dokonuje się przy użyciu prasy filtracyjnej. Prasa filtracyjna składa się z komory, w której umieszcza się cylinder ze stali nierdzewnej z badanym zączynem cementowym. W obudowie komory znajduje się układ grzewczy i chłodzący oraz mechanizm mieszania. Na panelu prasy zamontowane są: manometry do regulacji ciśnienia w cylindrze i regulacji ciśnienia filtratu, rejestratory czasu i temperatury, doprowadzenie i odprowadzenie wody chłodzącej i doprowadzenie powietrza (lub azotu).

Prasa filtracyjna z mieszaniem umożliwia wykonanie pomiaru filtracji bez przenoszenia zączynu cementowego z nagrzanego konsystometru do komory filtracyjnej. Zapewnia to zachowanie jednorodności zączynu bez stwarzania warunków do sedymentacji. Typowe urządzenia stosowane obecnie umożliwiają wykonanie badania filtracji w warunkach otworopodobnych, w podwyższonej temperaturze i ciśnieniu (max, 400°C i 2000 psi).

Filtrat z zączynu otrzymuje się przy ciśnieniu różnicowym 1000 psi. Elementem filtracyjnym jest siatka o oczkach wielkości 45  $\mu\text{m}$  (325 mesh), o powierzchni filtracyjnej 22,6  $\text{cm}^2$ , oraz siatka podścielająca o wymiarach oczek 250  $\mu\text{m}$  (60 mesh).

Podczas badania należy zbierać filtrat i zanotować jego objętość z niepewnością  $\pm 1$  ml w czasie: 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 7,5 min, 10 min, 15 min, 25 min i 30 min [11].

Jeśli przebicie się azotu przez badaną próbkę zączynu nastąpi w czasie krótszym od 30 min, to należy zanotować objętość zebranego filtratu oraz czas, po którym wystąpi moment „przebicia”.

Wielkość filtracji wyraża się w mililitrach na 30 minut. Dla badań o czasie trwania 30 minut (w których nie stwierdzono przebicia się azotu) zebraną i zmierzoną objętość filtratu mnoży się przez dwa i podaje jako wielkość filtracji zączynu. W przypadku badań, w czasie których doszło do przebicia się azotu przed upływem 30 minut, wielkość filtracji zączynu należy pomnożyć przez dwa i obliczyć posługując się wzorem

$$F_{OBL30} = F_t \frac{5,477}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

gdzie:

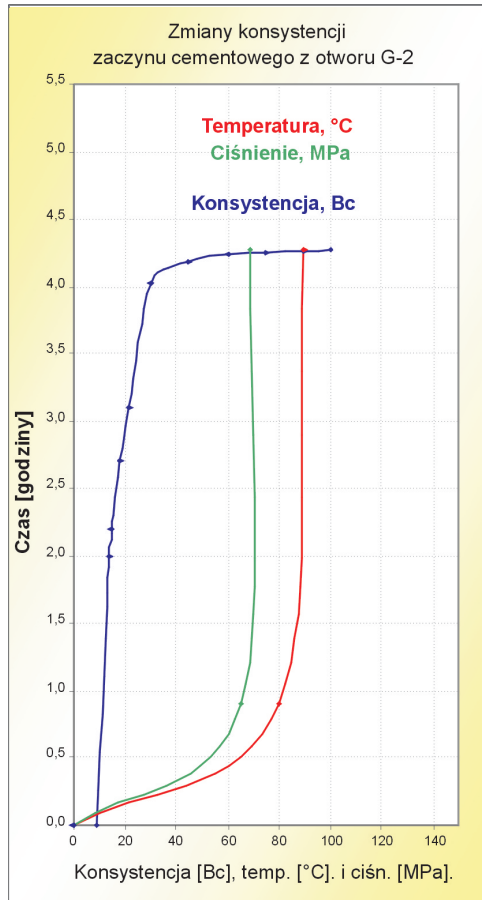
- $F_t$  – objętość filtratu zebranego do momentu przebicia się azotu (pomnożona przez dwa) [ml];
- $t$  – czas do momentu przebicia się azotu [min].

### 3. PRZYKŁAD BADANIA ZACZYNU CEMENTOWEGO PRZED CEMENTOWANIEM

Poniżej przedstawiono przykładowe badanie zaczynu cementowego przed zastosowaniem go do cementowania rur eksploatacyjnych 7" zapuszczonych do głębokości 3222 metrów w otworze G-2 (rys. 2). Temperatura na dnie otworu wynosiła 90°C. Do badań użyto obciążonego zaczynu centowego z dodatkiem lateksu (jako blokatora migracji gazu). Jako wodę zarobową użyto 10-procentową solankę NaCl. W celu poprawy odporności termicznej stwardniałego zaczynu dodano ok. 30% mączki krzemionkowej (bwoc). Użyto cementu wiertniczego klasy G.

Parametry zaczynu cementowego:

- gęstość: 2100 [kg/m<sup>3</sup>],
- reologia zaczynu cementowego (tab. 2).



Rys. 2. Zmiany konsystencji zaczynu cementowego (30 Bc: 4 h-01 min, 100 Bc: 4 h-17 min): 90°C, 69 MPa

**Tabela 2**  
Odczyty z aparatu Fann

Temp.	600 obr./min	300 obr./min	200 obr./min	100 obr./min	60 obr./min	30 obr./min	6 obr./min	3 obr./min	
18°C	230	149	115	75	55	41	24	19	
90°C	207	115	84	53	40	28	17	16	
18°C	Lepkość plastyczna: 0,1054 [Pa·s]		Granica płynięcia: 15,95 [Pa]		$k$ : współczynnik konsystencji 4,27 [Pa·s <sup>n</sup> ]		$n$ : wykładnik modelu potęgowego 0,4590 [-]		
90°C	Lepkość plastyczna: 0,0957 [Pa·s]		Granica płynięcia: 9,05 [Pa]		$k$ : współczynnik konsystencji 3,19 [Pa·s <sup>n</sup> ]		$n$ : wykładnik modelu potęgowego 0,4665 [-]		
Czas gęstnienia [godz. – min]			Temperatura badania: 90°C Ciśnienie 10 000 psi (69 MPa) Czas podgrzewania do temperatury: 90 minut				30 B <sub>c</sub> : 4 – 01		
							100 B <sub>c</sub> : 4 – 17		
Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]			Temperatura badania: 90°C				52		
Odstój wody [%]			Temperatura badania: 90°C				0,0		

Uzyskane wyniki badań potwierdzają możliwość użycia ww. zaczynu do cementowania rur okładzinowych w otworze G-2, w którym temperatura dynamiczna na dnie wynosiła 90°C, a ciśnienie sięgało 69 MPa.

#### 4. PODSUMOWANIE

- 1) Wykonywanie badań laboratoryjnych parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających przed przystąpieniem do zabiegu cementowania jest niezbędne do sprawnego i bezpiecznego przeprowadzenia zabiegu cementowania rur.
- 2) Czas mieszania podczas sporządzania zaczynu powinien odpowiadać warunkom panującym na wiertni. Parametry zaczynu cementowego powinny być określane w warunkach otworopodobnych (tj. w temperaturze i ciśnieniu panującym na dnie otworu wiertniczego).
- 3) Najważniejszymi parametrami technologicznymi, które powinny być każdorazowo określane dla zaczynu uszczelniającego używanego w danym otworze wiertniczym, są:
  - gęstość,
  - reologia,
  - odstój wody (wolna woda),
  - filtracja,
  - czas gęstnienia.

Wskazane jest również – w miarę możliwości – oznaczanie innych parametrów technologicznych zaczynów, które zamieszczone są w normach *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych* oraz API.

- 4) Wyniki pomiarów powinny być przeanalizowane przez specjalistów do spraw cementowań przed przystąpieniem do wykonywania zabiegu uszczelniania rur.

## LITERATURA

- [1] Herman Z., Migdał M.: *Problemy cementowania rur okładzinowych na Niżu Polskim*. Nafta – Gaz, 12, 1998
- [2] Nalepa J.: *Problemy związane z cementowaniem głębokich otworów wiertniczych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła–Płotki, 2001
- [3] Nelson E.B.: *Well Cementing*. Schlumberger Educational Service, Houston, Teksas, USA, 1990
- [4] Półchłópek T., Rzepka M. i in.: *Analiza stanu technologii cementowania rur okładzinowych i wykonywania korków cementowych w górnictwie naftowym oraz określenie kierunków jej usprawnienia*. Praca INiG, Kraków, 1997
- [5] Rzepka M.: *Receptury zaczynów cementowych z dodatkiem mikrocementu do warunków wysokich temperatur i ciśnień złożowych*. Praca INiG, Kraków, 2005
- [6] 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
- [7] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), 2001 R. 18/1
- [8] Wiśniowski R.: *Zastosowanie modelu Herschel-Bulkleya w hydraulice płuczek wiertniczych*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, z. 2, 2000
- [9] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef.* Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, nr 2–3, 2001
- [10] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Wyznaczanie oporów laminarnego przepływu zaczynów cementowych, opisywanych modelem Herschela-Bulkleya*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), nr 23/1, 2006
- [11] PN-EN 10426-2: *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych*. 2003
- [12] Norma API SPEC 10: *Specification for Materials and Testing for Well Cements*