Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 451–460, DOI: 10.18668/NG.2026.05.02

Badania parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych przed procesem uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych

Investigation of the technological parameters of fresh cement slurries prior to sealing casing strings in wellbores

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Sposób, w jaki przeprowadza się cementowanie, ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia odpowiedniego stanu technicznego w odwiercie. Bez względu na głębokość otworu, warunki geologiczne i hydrogeologiczne oraz aspekty techniczne i technologiczne należy jak najdokładniej wypełnić zaczynem cementowym przestrzeń pierścieniową znajdującą się pomiędzy rurą okładzinową a ścianą otworu wiertniczego. Szczególne znaczenie ma zwłaszcza uszczelnianie kolumn technicznych i eksploatacyjnych z uwagi na konieczność zapewnienia optymalnej produkcji węglowodorów oraz zagwarantowanie długotrwałej i bezpiecznej eksploatacji odwiertu. W części teoretycznej artykułu omówiony został proces cementowania rur okładzinowych za pomocą głowicy cementacyjnej dwuklockowej. Przedstawiono ponadto sposoby wyznaczania podstawowych parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych przed zabiegiem uszczelniania rur oraz omówiono zagadnienia związane z badaniami konsystencji zaczynu cementowego w warunkach HPHT. W części doświadczalnej zaprezentowano przykładowe receptury zaczynów cementowych opracowanych w INiG – PIB w ostatnich latach. Były to zaczyny przeznaczone do różnorakich warunków otworowych. Zaczyn o symbolu A nie zawierał specjalnych dodatków modyfikujących. Receptura zaczynu o symbolu B sporządzona była na bazie lateksu wiertniczego. Kolejne receptury, o symbolach C oraz D, zawierały nanokomponenty w postaci nano-Al_2O_3 oraz nano-SiO_2. Na podstawie uzyskanych badań można stwierdzić, że testowane w INiG – PIB zaczyny cementowe charakteryzowały się gęstością około 1850–1910 kg/m^3. Optymalny współczynnik wodno-cementowy dla badanych zaczynów kształtował się na poziomie około 0,44–0,49. Czasy gęstnienia zaczynów można było regulować powszechnie dostępnymi środkami opóźniającymi. Na szczególną uwagę zasługują zaczyny lateksowe, przy opracowywaniu których brał udział INiG – PIB. Zaczyny te cechują się wyjątkowo korzystnymi parametrami technologicznymi i są powszechnie używane w pracach cementacyjnych, zwłaszcza w rejonie południowo-wschodniej Polski, gdzie często dochodzić może do zagrożeń związanych z ekshalacjami gazowymi. Interesującą alternatywą dla zaczynów lateksowych mogą być receptury zawierające nanokomponenty (opracowane w ostatnich latach w INiG – PIB). Zastosowanie nanoglinu czy też nanokrzemionki w zaczynach pozwala na uzyskanie wyjątkowo trwałej mikrostruktury zaczynu i znacząco podnosi wytrzymałość mechaniczną kamienia cementowego.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, badania cementów wiertniczych, cementowanie otworów wiertniczych.

ABSTRACT: The manner in which cementing operations are conducted is fundamental to ensuring the proper technical condition of a wellbore. Regardless of well depth, geological and hydrogeological conditions, or technical and technological considerations, the annular space between the casing string and the borehole wall must be filled as completely as possible with cement slurry. The sealing of intermediate and production casing strings is of particular importance due to the need to ensure optimal hydrocarbon production and safe, long-term operation of the well. The theoretical part of the article discusses the process of casing cementing using a double-plug cementing head. The article also presents methods for determining the basic technological parameters of fresh cement slurries prior to the sealing procedure and discusses issues related to testing cement slurry consistency under high-pressure, high-temperature (HPHT) conditions. The experimental part presents examples of cement slurry formulations developed at the Oil and Gas Institute – National Research Institute (INiG – PIB) in recent years. These slurries were designed for various downhole conditions. Slurry A contained no special modifying additives. The formulation for slurry B was based on drilling latex. Subsequent formulations, labeled C and D, contained nanocomponents in the form of nano-Al_2O_3 and nano-SiO_2. Tests conducted at INiG – PIB showed that the cement slurries had densities ranging from approximately 1850 to 1910 kg/m^3. The optimal water-to-cement ratio for the tested slurries ranged from approximately 0.44 to 0.49. The thickening times of the slurries could be adjusted using commonly available retarders. Particularly

Autor do korespondencji: M. Rzepka, e-mail: *marcin.rzepka@inig.pl*

Artykuł nadesłano do Redakcji: 29.04.2026 r. Zatwierdzono do druku: 08.10.2026 r.

noteworthy are the latex slurries developed with the involvement of INiG – PIB. These slurries are characterized by exceptionally favorable technological parameters and are widely used in cementing operations, particularly in southeastern Poland, where gas migration (exhalation) poses a frequent risk. Formulations containing nanocomponents, developed in recent years at INiG – PIB, may serve as an interesting alternative to latex slurries. The incorporation of nano-alumina or nano-silica into cement slurries makes it possible to achieve an exceptionally durable microstructure and significantly increases the mechanical strength of the set cement.

Keywords: slurry, testing of well cements, well cementing.

Wprowadzenie

Proces uszczelniania kolumn rur okładzinowych stanowi jeden z głównych etapów w procesie wiercenia otworów wiertniczych. Niezależnie od głębokości odwiertu, warunków geologiczno-hydrogeologicznych oraz uwarunkowań technicznych i technologicznych podstawowym zadaniem zaczynu uszczelniającego jest skuteczne wypełnienie przestrzeni pierścieniowej pomiędzy kolumną rur a ścianą otworu. Szczególnie istotne jest uszczelnianie kolumn technicznych i eksploatacyjnych, co wynika z potrzeby wykonania testów poziomów perspektywicznych, osiągnięcia optymalnego wydobycia węglowodorów oraz zapewnienia bezpiecznej eksploatacji odwiertu przez długi czas (Ciechanowska i in., 1998; Stryczek i Gonet, 2001).

Wysokie wymagania odnośnie do jakości uszczelnienia przestrzeni pierścieniowej są szczególnie ważne w przypadku otworów, w których przewiduje się obecność horyzontów gazowych, a także w odwiertach przeznaczonych do podziemnego magazynowania gazu (Rzepka i Kędzierski, 2019, 2020, 2023). Wynika to z faktu, że eliminacja migracji i niekontrolowanych wypływów gazu z przestrzeni międzyrurowych i pozarurowych jest wysoce kosztowna oraz niezwykle trudna pod względem technicznym (Rocha i in., 2013; Velayati i in., 2015).

Największe znaczenie dla prawidłowego przebiegu procesu uszczelniania rur okładzinowych ma zarówno technologia wykonania zabiegu, jak i jakość zastosowanego zaczynu cementowego. Sposób i metody wytłaczania płynnego zaczynu do otworu oraz skład chemiczny cieczy użytych do zabiegu zależą od wielu czynników (m.in. warunków geologicznych i hydrogeologicznych, rodzaju przewiercanych skał, a także od głębokości, temperatury i ciśnienia panujących na dnie otworu). Z tego względu należy pamiętać, aby każdy zabieg cementowania był traktowany indywidualnie, miał zatwierdzony odpowiedni projekt, a zaczyn cementowy przed użyciem go na wiertni powinien zostać dokładnie przebadany laboratoryjnie w warunkach odzwierciedlających warunki otworowe (Baret i in., 2002; Salam i in., 2013).

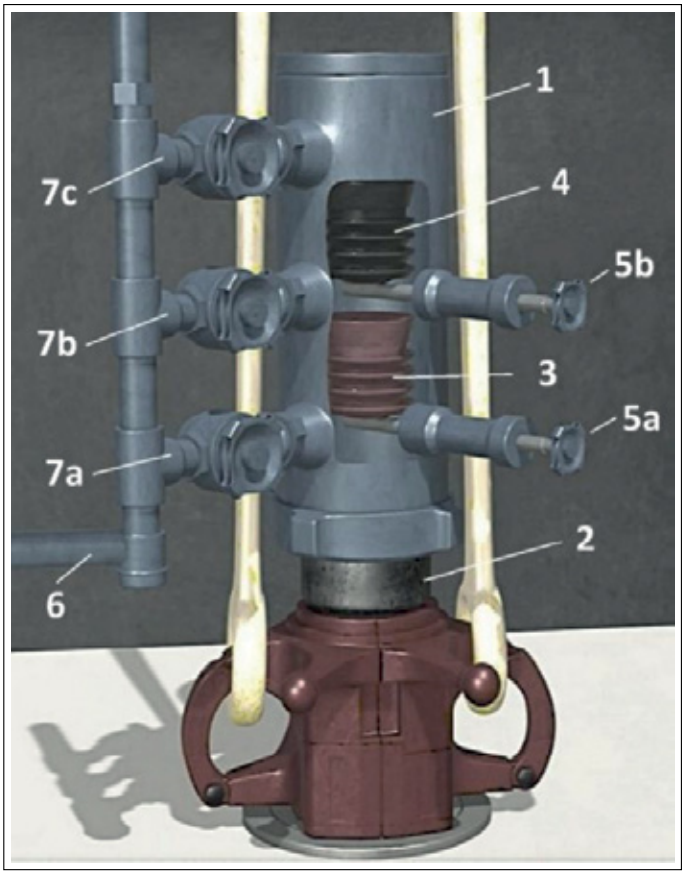
Cementowanie kolumn rur okładzinowych

Zakład Technologii Wiercenia INiG – PIB w Krakowie Oddział w Krośnie od szeregu lat zajmuje się opracowywaniem i badaniami różnych wariantów receptur zaczynów cementowych przeznaczonych do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych. Pracownicy Zakładu często uczestniczą w pracach terenowych związanych z cementowaniem rur, testując stosowane na wiertni zaczyny cementowe i ciecze buforowe. Badania te odbywają się w trakcie tłoczenia zaczynu do otworu wiertniczego. Warto w tym miejscu omówić w sposób skrótowy sam przebieg zabiegu cementowania rur. W celu zacementowani rur okładzinowych wykorzystuje się zaczyny cementowe, które wypełniają przestrzeń pierścieniową pomiędzy ścianą otworu a kolumną rur. Standardowo operacja polega na wtłoczeniu odpowiedniej ilości zaczynu cementowego do otworu, a następnie wypompowaniu go do przestrzeni pierścieniowej aż do osiągnięcia zaplanowanego interwału, który ma być uszczelniony (Nelson i Guillot, 2006; Suleimanov i in., 2023). W przypadku cementowania rur okładzinowych cementowych do wierzchu należy zastosować głowicę cementacyjną (rysunek 1).

Głowicę cementacyjną (rysunek 1, poz. 1) montuje się na ostatnim połączeniu gwintowym znajdującym się nad stołem wiertniczym, czyli na końcu wprowadzonej do otworu kolumny rur okładzinowych (rysunek 1, poz. 2). Jej budowa pozwala na umieszczenie wewnątrz korków cementacyjnych, które służą do oddzielania poszczególnych cieczy tłoczonych do otworu. Jeśli chodzi o klocki cementacyjne, wyróżnia się klocek dolny (rysunek 1, poz. 3), wyposażony w pękającą przeponę, oraz klocek górny (rysunek 1, poz. 4), który nie ulega pęknięciu. Przed rozpoczęciem procesu cementowania obydwa klocki są unieruchamiane za pomocą sworzni (rysunek 1, poz. 5a i poz. 5b). Gdy kolumna rur okładzinowych zostanie już zapuszczona do otworu, przed rozpoczęciem cementowania należy przeprowadzić obróbkę płuczki wiertniczej znajdującej się w otworze. Polega ona na upłynnieniu płuczki, co skutkuje obniżeniem lepkości plastycznej oraz granicy płynięcia. Poprawa właściwości reologicznych płuczki sprzyja skuteczniejszemu usuwaniu osadu znajdującego się na rurach, a także ułatwia wyparcie płuczki podczas procesu uszczelniania. Biorąc pod uwagę znaczne opory przepływu płynów w otworze podczas cementowania, do uzyskania odpowiednio wysokiego ciśnienia wykorzystuje się agregaty cementacyjne, które mają na wyposażeniu pompy wysokociśnieniowe. Agregat taki łączy się z głowicą cementacyjną za pomocą przewodów wysokociśnieniowych (rysunek 1, poz. 6). Dwuklockowa głowica cementacyjna

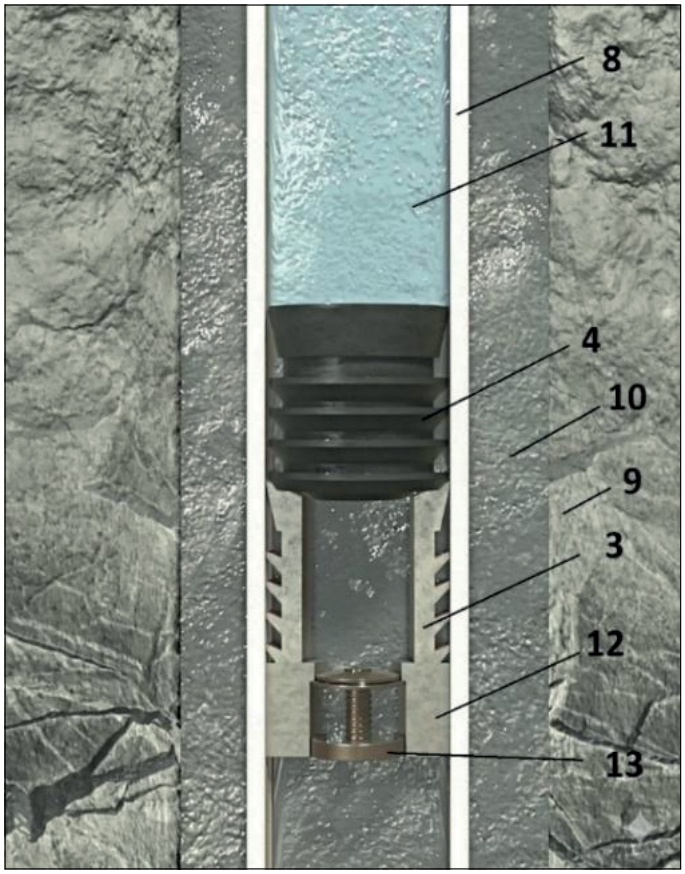
umożliwia tłoczenie płynów z agregatu do rur okładzinowych przez trzy króćce, które kierują ciecze do odpowiednich części głowicy. Króćce te są zlokalizowane poniżej klocka dolnego (rysunek 1, poz. 7a), pomiędzy klockiem dolnym a górnym (rysunek 1, poz. 7b) oraz powyżej klocka górnego (rysunek 1, poz. 7c). Aby uzyskać jak najlepsze uszczelnienie kolumny rur okładzinowych, w procesie cementowania stosuje się kilka rodzajów cieczy. Pierwszą z nich stanowi ciecz przemywająca, której zadaniem jest oczyszczenie ścian otworu oraz powierzchni rur z osadów nagromadzonych wskutek cyrkulacji płuczki wiertniczej. Objętość cieczy przemywającej ustala się na podstawie danych zawartych w projekcie cementowania otworu wiertniczego. Płyn ten jest tłoczony z agregatu cementacyjnego przez dolny króciec (rysunek 1, poz. 7a) pod dolnym klockiem (rysunek 1, poz. 3) do wnętrza rur okładzinowych (rysunek 1, poz. 2). W tym samym czasie płuczka wiertnicza wypływająca z przestrzeni pierścieniowej przekierowywana jest do zbiorników płuczkowych. Kolejną cieczą wtłaczaną do otworu jest ciecz buforowa, mająca za zadanie oddzielić płuczkę od zaczynu cementowego. Po zatłoczeniu przewidzianej objętości buforu (zwykle kilku m3) agregat cementacyjny zostaje chwilowo zatrzymany. Następnie odblokowuje się klocek dolny (rysunek 1, poz. 3) poprzez odkręcenie sworznia blokującego (rysunek 1, poz. 5a). Proces ten trwa zazwyczaj około kilku minut. W dalszej kolejności do otworu wtłacza się całą przygotowaną porcję zaczynu cementowego (poprzez króciec środkowy) (rysunek 1, poz. 7b). W miarę upływu czasu dolny klocek cementacyjny przemieszcza się w dół kolumny rur okładzinowych. Po zatłoczeniu całej objętości zaczynu uszczelniającego ponownie zatrzymuje się na chwilę agregat cementacyjny i odblokowuje klocek górny (rysunek 1, poz. 4) poprzez odkręcenie górnego sworznia (rysunek 1, poz. 5b). Wówczas rozpoczyna się wtłaczanie cieczy (płuczki przybitki) przez górny króciec głowicy cementacyjnej (rysunek 1, poz. 7c). Gdy klocek górny znajdzie się we wnętrzu rur okładzinowych, ciecz przybitka może być tłoczona wszystkimi trzema króćcami (rysunek 1, poz. 7a, 7b, 7c).

Na rysunku 2 przedstawiono schemat cementowania rur okładzinowych metodą dwuklockową, z uwzględnieniem sytuacji panującej na spodzie otworu. Chwila, w której klocek dolny (rysunek 2, poz. 3) osiąga poziom pierścienia oporowego zaworu zwrotnego (rysunek 2, poz. 12), jest sygnalizowana obsłudze agregatu cementacyjnego krótkotrwałym wzrostem ciśnienia tłoczonych płynów. Aby możliwy był dalszy przepływ, musi dojść do rozerwania przepony klocka dolnego (rysunek 2, poz. 3). Zarejestrowany skok ciśnienia stanowi potwierdzenie, że ciecz buforowa dotarła do dna otworu wiertniczego. Pompy agregatu cementacyjnego tłoczą przemieszczające się w rurach ciecz buforową oraz zaczyn cementowy do przestrzeni pierścieniowej otworu. Na podstawie obserwacji koloru, konsystencji i gęstości płynów wypływających z otworu w chwili pojawienia się cieczy buforowej zmienia się kierunek przepływu cieczy ze zbiornika płuczkowego na zbiornik urobkowy. W rezultacie ciecz buforowa oraz ewentualny nadmiar zaczynu cementowego trafiają do zbiornika urobkowego. W momencie tzw. dobicia klocka górnego (rysunek 2, poz. 4), czyli zetknięcia się klocka górnego z dolnym klockiem (rysunek 2, poz. 3) na spodzie cementowanej kolumny, następuje zatrzymanie przepływu. Równocześnie po zakończeniu tłoczenia płynów zawór zwrotny (rysunek 2, poz. 13) znajdujący się na dnie kolumny rur okładzinowych automatycznie się zamyka. Zapobiega to cofnięciu się zaczynu cementowego z przestrzeni pierścieniowej do wnętrza rur. Chwila dobicia klocka górnego stanowi także odpowiedni moment do przeprowadzenia próby szczelności kolumny rur okładzinowych. Próbę tę uznaje się za udaną, jeśli ciśnienie na poziomie 3 MPa utrzymuje się przez 15 minut od zakończenia tłoczenia. Od tego momentu wprowadza się przerwę technologiczną, potrzebną na związanie zaczynu cementowego i wytworzenie się płaszcza cementowego.



Rysunek 1. Głowica cementacyjna dwuklockowa wraz z wyposażeniem (1 – głowica cementacyjna, 2 – rura okładzinowa, 3 – klocek dolny, 4 – klocek górny, 5a–5b – sworznie, 6 – rurki ciśnieniowe (przewody wysokociśnieniowe), 7a,7b,7c – króćce)

Figure 1. Double-plug cementing head with associated equipment (1 – cementing head, 2 – casing pipe, 3 – bottom plug, 4 – top plug, 5a–5b – pins, 6 – pressure tubes (high-pressure lines), 7a, 7b, 7c – stubs/connectors)



Rysunek 2. Cementowanie rur okładzinowych metodą dwuklockową (3 – klocek dolny – pękający, 4 – klocek górny, 8 – rura okładzinowa, 9 – skała, 10 – zaczyn cementowy, 11 – przybitka, 12 – pierścień oporowy, 13 – zawór zwrotny)

Figure 2. Double-plug casing cementing method (3 – rupturable bottom plug, 4 – top plug, 8 – casing pipe/string, 9 – rock/formation, 10 – cement slurry, 11 – displacement fluid, 12 – landing collar/float collar, 13 – check valve/float valve)

Podstawowe oznaczenia parametrów technologicznych świeżych zaczynów cementowych przed zabiegiem uszczelniania rur okładzinowych

Aby zapewnić bezpieczne wykonanie zabiegu cementowania rur, należy w sposób rzetelny wyznaczyć podstawowe parametry technologiczne cieczy buforowej, a zwłaszcza zaczynu cementowego. INiG – PIB dysponuje odpowiednim oprzyrządowaniem pomiarowym służącym do oznaczania własności cieczy tłoczonych podczas zabiegu uszczelniania rur. W skład zaczynu cementowego stosowanego do uszczelniania otworów wiertniczych wchodzi szereg środków modyfikujących (Calvert i Smith, 1990; Al-Yami i in., 2017). Przed zabiegiem cementowania rur okładzinowych należy wykonać szereg oznaczeń parametrów płynnego zaczynu cementowego. Przetestowanie receptury cementowej, przy użyciu wody i materiałów użytych na wiertni, pozwala na określenie własności technologicznych tłoczonego zaczynu, a tym samym przyczynia się do bezpiecznego wykonania całego zabiegu. Mamy wówczas gwarancję, że zaczyn cementowy będzie miał odpowiedni – ciężar, będzie dobrze przetłaczalny i np. nie zgęstnieje zbyt szybko podczas pompowania go do przestrzeni pierścieniowej. Niezwykle ważne są zatem pomiary laboratoryjne dokonywane w Zakładzie Technologii Wiercenia INiG – PIB, które dotyczą takich parametrów jak:

a) gęstość zaczynu cementowego (jest ona dobierana w zależności od gradientów ciśnień panujących w otworze wiertniczym). Zaczyny „lekkie" mogą charakteryzować się gęstością około 1500–1600 kg/m^3, natomiast zaczyny „ciężkie" gęstością około 2000–2200 kg/m^3. Pomiar gęstości należy wykonać przy użyciu ciśnieniowej wagi Baroid. 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;
b) parametry reologiczne (oznaczane przy użyciu wiskozymetru obrotowego). W celu wyznaczenia optymalnego modelu reologicznego płynu wiertniczego oraz jego parametrów reologicznych (np. lepkości plastycznej i granicy płynięcia) dokonuje się pomiaru zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi a szybkościami ścinania badanej cieczy. Lepkości typowych zaczynów cementowych sięgają od kilkudziesięciu do około stu kilkudziesięciu mPa·s , natomiast granice płynięcia wynoszą od kilku do kilkunastu Pa;
c) odstój wody (inna nazwa: wolna woda). Badanie tego parametru polega na pomiarze objętości roztworu wodnego gromadzącego się w naczyniu o pojemności 500 ml nad powierzchnią zaczynu w warunkach statycznych po czasie 2 godzin. Zaleca się, aby odstój wody wynosił zero procent (w szczególnych przypadkach dopuszczalny jest objętościowy odstój niewiększy niż 0,4%);
d) filtracja zaczynu w warunkach HPHT. Pomiaru tego parametru dokonuje się przy użyciu prasy filtracyjnej. W czasie badania zaczyn poddawany jest działaniu różnicy ciśnień wielkości 7 MPa. Filtrat gromadzi się w cylindrze pomiarowym przez 30 minut, a na podstawie jego ilości oblicza się filtrację zaczynu (w ml/30 minut). Zalecana filtracja w przypadku otworów, gdzie mamy do czynienia z możliwością ekshalacji gazowych, powinna być niższa niż 50 ml/30 min. W niektórych przypadkach dopuszcza się filtrację nieprzekraczającą 200 ml/30 min;
e) czas gęstnienia zaczynu (przebieg krzywej konsystencji zaczynu). Oznaczenie tego parametru wykonuje się za pomocą konsystometru ciśnieniowego HPHT. Czas początku gęstnienia określa się w momencie osiągnięcia przez zaczyn konsystencji 30 Bc (jednostek Beardena). Czas końca gęstnienia (czas gęstnienia) określa się w momencie osiągnięcia przez zaczyn konsystencji 100 Bc. Należy tak

dobrać czas osiągnięcia przez zaczyn konsystencji 30 Bc, aby był on dłuższy o odpowiedni margines bezpieczeństwa od czasu trwania całego zabiegu cementowania (margines bezpieczeństwa na niespodziewane sytuacje w otworze ustala się indywidualnie, w zależności od ilości tłoczonego zaczynu i głębokości otworu).

Pomiary konsystencji zaczynu i ocena warunków HPHT panującej w otworze wiertniczym

Konsystencję zaczynu cementowego określa się w jednostkach Beardena (B_C). Jest to wielkość bezwymiarowa, która nie ma bezpośredniego przełożenia lub zamiany na fizyczne jednostki lepkości cieczy. Wielkość konsystencji należy określać za pomocą układu potencjometru oraz obwodu do pomiaru napięcia. Procedura ta jest opisana szczegółowo w PN-EN ISO 10426-2:2006. Wielkości konsystencji oraz momenty skręcające powiązane są zależnością:

$$T = 78{,}2 + 20{,}02 \cdot B_C \qquad (1)$$

gdzie:
T – moment skręcający [gramy × centymetr],
$B_{c:}$ – konsystencja [w jednostkach Beardena].

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

- czas mieszania zaczynu w zbiorniku na powierzchni;
- wartość temperatury dynamicznej panującej na dnie otworu wiertniczego (dla danego gradientu geotermicznego);
- prędkość wzrostu temperatury w symulowanych warunkach złożowych;
- wielkość ciśnienia panującego na dnie otworu;
- prędkość narastania ciśnienia aż do ciśnienia panującego na dnie otworu.

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 [°C]), do temperatury przewidywanej na dnie otworu podczas cyrkulacji (dynamicznej T_D [°C]) w czasie (t_C [min]) wymaganym do wtłoczenia pierwszej partii zaczynu do spodu otworu. Prędkość przyrostu temperatury $v_{\Delta T}$ można obliczyć, posługując się wzorem:

$$v_{\Delta T} = \frac{T_D - T_P}{t_C} \ [°C/min] \qquad (2)$$

Prędkość przyrostu ciśnienia do poziomu ciśnienia dennego:
Ciśnienie wywierane na zaczyn cementowy podczas badań powinno rosnąć do poziomu ciśnienia dennego, a prędkość przyrostu tego ciśnienia można określić wzorem:

$$V_{\Delta p} = \frac{p_D - p_P}{t_C} \ [Pa/min] \qquad (3)$$

We wzorze tym $V_{\Delta p}$ to prędkość przyrostu ciśnienia, [Pa/min], p_D to ciśnienie panujące na dnie otworu [Pa], p_p to ciśnienie początkowe [Pa], t_C to czas wytłoczenia czołowej partii zaczynu cementowego do spodu otworu [podawany w minutach].

Zaczyny cementowe opracowane w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym

W INiG – PIB Zakładzie Technologii Wiercenia w ostatnich latach testowano i opracowano szereg innowacyjnych receptur zaczynów cementowych, które są wykorzystywane w praktyce, a także mogą znaleźć zastosowanie w przyszłości do prowadzenia prac związanych z cementowaniem otworów wiertniczych.

Autorzy artykułu, a także inni pracownicy INiG – PIB, opracowywali coraz to bardziej ulepszone zaczyny cementowe na bazie lateksu i mikrocementu, jak również zaczyny zawierające nanokomponenty (Dębińska, 2015; Rzepka i Kędzierski, 2024, 2025). Badania laboratoryjne zaczynów cementowych były wykonywane w Zakładzie Technologii Wiercenia w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających zgodnie z normami:

- PN-EN ISO 10426-1. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1: Specyfikacja. Warszawa 2013;
- PN-EN ISO 10426-2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. Warszawa 2006.

W związku z koniecznością doskonalenia receptur cementowych używanych w przypadku uszczelniania rur okładzinowych w specyficznych warunkach geologiczno-technicznych autorzy artykułu przyjęli za cel modyfikację składów receptur świeżego zaczynu cementowego za pomocą lateksu i nanocząsteczek. Modyfikacje zaczynów wykonanych w INiG – PIB pozwolą na precyzyjne sterowanie jego parametrami reologicznymi i czasem gęstnienia, co zapewni stabilność zaczynu cementowego w warunkach otworowych i pozwoli na szczelne wypełnienie przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego.

Omówienie wyników badań zaczynów cementowych opracowanych w INiG – PIB

W celu doskonalenia receptur cementowych w INiG – PIB projektuje się zaczyny zgodnie z warunkami, jakie panują w konkretnych otworach wiertniczych. Na początku przyjmuje się założenia odnośnie do temperatury dynamicznej, ciśnienia

na dnie otworu, a także niezbędnego czasu potrzebnego na wytłoczenie zaczynu do przestrzeni pierścieniowej. W projekcie uwzględnia się margines bezpieczeństwa (tzw. dodatkowy czas na nieprzewidywalne okoliczności w czasie cementowania).

Podczas badań laboratoryjnych prowadzonych w INiG – PIB korzystano z wysokiej klasy aparatury pomiarowej, m.in. konsystometru cementowego HPHT, prasy filtracyjnej, wiskozymetru obrotowego i innych. Z szerokiej gamy opracowanych i testowanych w INiG – PIB zaczynów cementowych w niniejszym artykule zaprezentowano wybrane receptury należące do grupy zaczynów o „normalnej gęstości", tj. około 1850–1900 kg/m^3. Zaczyny te mogą być użyte do cementowania rur okładzinowych w warunkach geologiczno-technicznych panujących w otworze wiertniczym na głębokości około 1800–2000 metrów na złożach węglowodorów oraz w podziemnych magazynach gazu. Temperaturę badania ustalono na 60°C, a ciśnienie denne na 25 MPa. Wszystkie zaczyny zarabiano wodą wodociągową zasoloną 3% KCl i sporządzano na bazie cementu wiertniczego klasy G. Zastosowano następujące dodatki i domieszki do zaczynów cementowych:

- odpieniacz, tj. środek gaszący pianę (produkt oksyetylenowania i oksypropylenowania nasyconego alkoholu tłuszczowego);
- środek upłynniający, tzw. upłynniacz (modyfikowane sulfoniany polinaftalenowe);
- dodatek antyfiltracyjny (mieszanina organicznych polimerów oraz modyfikowanych kopolimerów);
- opóźniacz wiązania (lignosulfoniany wapnia i sodu);
- lateks wiertniczy (wodna dyspersja kopolimeru butadienowo-styrenowo-amidowego z dodatkiem środków modyfikujących);
- stabilizator lateksu (roztwór wodny mieszaniny etoksylowanych alkoholi nienasyconych);
- mikrocement (cement portlandzki o powierzchni właściwej ok. 1200 m^2/kg);
- nanotlenek krzemu nano-SiO_2 oraz nanotlenek glinu nano-Al_2O_3 o średnicach ziaren ok. 20–30 nm.

W celu uzyskania receptur cementowych cechujących się optymalnymi parametrami technologicznymi prowadzono testy laboratoryjne nad dopasowaniem odpowiedniej ilości poszczególnych środków wprowadzanych do receptury. Założono przy tym, że w recepturach stosowana będzie stała ilość lateksu (10%), stabilizatora lateksu (1%), nano-Al_2O_3 (0,5%) oraz nano-SiO_2 (0,3%). Mikrocement używano w zaczynie lateksowym w ilości 20%, a w zaczynach z nanokomponentami w ilości 5% w stosunku do masy suchego cementu. Wartości ww. środków ustalone zostały na podstawie wcześniejszych prac wykonywanych w latach ubiegłych w INiG – PIB w ramach działalności statutowej. W tabeli 1 pokazano, w jaki sposób poszczególne dodatki chemiczne wpływały na konkretne parametry technologiczne opracowywanych zaczynów. Zestawione w tabeli 1 wyniki dotyczą badań prowadzonych z zaczynami klasycznym, lateksowym oraz testów zaczynów zawierających nanokomponenty (nano-Al_2O_3 oraz nano-SiO_2).

Działanie odpieniacza: W badaniach używano 0,2%, 0,5% oraz 0,8% odpieniacza. Jak można zauważyć, zastosowywanie niewielkich ilości odpieniacza nie wpłynęło wystarczająco na gaszenie się piany podczas mieszania zaczynu. Dodatek środka odpieniającego w ilości 0,5% zadziałał poprawianie (zaczyny zostały odpienione prawidło). Z kolei po dodaniu większej ilości odpieniacza nie zaobserwowano polepszenia stopnia odpienienia zaczynów. Dlatego też uznano, że 0,5% odpieniacza w stosunku do masy suchego cementu jest w przypadku opracowywanych receptur wartością optymalną.

Działanie upłynniacza: W przypadku badań klasycznych zaczynów cementowych nie używano upłynniacza (aby nie generować dodatkowych kosztów zaczynu). W pozostałych przypadkach używano czterech różnych koncentracji upłynniacza w ilości 0,2%, 0,4%, 0,5% oraz 0,7%. Skuteczność działania upłynniacza określano, mierząc parametry reologicznie testowanych receptur. Za optymalną ilość upłynniacza uznawano taką, w przypadku której zanotowano największe obniżenie lepkości zaczynu cementowego. Dla zaczynu lateksowego taką optymalną ilością było 0,4%, a dla zaczynów z nanokomponentami 0,5% tego środka w stosunku do masy suchego cementu.

Działanie dodatku antyfiltracyjnego: W badanych zaczynach używano trzech stężeń dodatku antyfiltracyjnego, a mianowicie 0,1%, 0,25% oraz 0,5%. W przypadku zaczynu klasycznego 0,1% dodatku nie wpłynęło na zmniejszenie filtracji. Użycie 0,25% pozwoliło znacznie zmniejszyć wartość filtracji w porównaniu z wartością uzyskaną dla zaczynu bazowego. Dalsze zwiększanie środka antyfiltracyjnego (do wartości 0,5%) wpłynęło niekorzystnie na wzrost lepkości zaczynu. Dlatego też uznano, że optymalna będzie ilość dodatku antyfiltracyjnego wynosząca 0,25% w stosunku do masy cementu. Z kolei dla zaczynu lateksowego oraz zaczynów z nanokomponentami wprowadzenie 0,1% (w stosunku do masy cementu) dodatku antyfiltracyjnego okazało się wystarczające (dalsze zwiększanie stężenia tego środka powodowało silny wzrost lekkości i pogorszenie własności reologicznych).

Działanie opóźniacza wiązania: Do badań używano trzech stężeń opóźniacza (0,1%, 0,15% oraz 0,25%). We wszystkich rodzajach badanych zaczynów okazało się, że optymalne stężenie tego środka wynosiło 0,15% w stosunku do masy cementu (czasy gęstnienia zaczynów wynosiły wówczas około trzech do czterech godzin). Użycie 0,1% opóźniacza spowodowało, że zaczyny cementowe gęstniały zbyt szybko – poniżej trzech godzin (co mogłoby być niebezpieczne podczas wykonywania

Tabela 1. Badanie skuteczności działania poszczególnych środków modyfikujących w zaczynach cementowych
Table 1. Evaluation of the effectiveness of individual modifying agents in cement slurries

Rodzaj dodatku	**Stężenie [%]**	**Zaczyn klasyczny** (woda, cement wiertniczy)	**Zaczyn lateksowy** (woda, lateks wiertniczy, mikrocement, cement wiertniczy)	**Zaczyn z nano-Al_2O_3** (woda, nano-Al_2O_3, mikrocement, cement wiertniczy)	**Zaczyn z nano-SiO_2** (woda, nano-SiO_2, cement wiertniczy)
Odpieniacz	0,20	zbyt mała ilość (zaczyn nadal był spieniony)	zbyt mała ilość (zaczyn nadal był spieniony)	zbyt mała ilość (zaczyn nadal był spieniony)	zbyt mała ilość (zaczyn nadal był spieniony)
	0,50	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe
	0,80	brak poprawy gaszenia piany w porównaniu z mniejszym stężeniem	brak poprawy gaszenia piany w porównaniu z mniejszym stężeniem	brak poprawy gaszenia piany w porównaniu z mniejszym stężeniem	brak poprawy gaszenia piany w porównaniu z mniejszym stężeniem
Upłynniacz	0,20	–	zbyt mała ilość (zaczyn posiadał za dużą lepkość)	zbyt mała ilość (zaczyn posiadał za dużą lepkość)	zbyt mała ilość (zaczyn posiadał za dużą lepkość)
	0,40	–	działanie prawidłowe	zbyt mała ilość (zaczyn posiadał za dużą lepkość)	zbyt mała ilość (zaczyn posiadał za dużą lepkość)
	0,50	–	brak poprawy upłynnienia w porównaniu z mniejszym stężeniem	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe
	0,70	–	–	brak poprawy upłynnienia w porównaniu z mniejszym stężeniem	brak poprawy upłynnienia w porównaniu z mniejszym stężeniem
Dodatek antyfiltracyjny	0,10	brak obniżenia filtracji	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe
	0,25	działanie prawidłowe	silny wzrost lekkości zaczynu	silny wzrost lekkości zaczynu	silny wzrost lekkości zaczynu
	0,50	silny wzrost lekkości zaczynu	–	–	–
Opóźniacz wiązania	0,10	zbyt krótki czas gęstnienia zaczynu	zbyt krótki czas gęstnienia zaczynu	zbyt krótki czas gęstnienia zaczynu	zbyt krótki czas gęstnienia zaczynu
	0,15	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe	działanie prawidłowe
	0,25	za długi czas gęstnienia zaczynu	za długi czas gęstnienia zaczynu	za długi czas gęstnienia zaczynu	za długi czas gęstnienia zaczynu

zabiegu cementowania i spowodować związanie zaczynu cementowego w rurach okładzinowych). Z kolei zastosowanie 0,25% opóźniacza spowodowało znaczne wydłużenie wiązania – ponad 6 godzin, co mogłoby skutkować długotrwałym oczekiwaniem na związanie zaczynu cementowego w otworze wiertniczym.

Składy zaczynów cementowych o najlepszych parametrach technologicznych zestawiono w tabelach od 2 do 5. Zaczyn o symbolu A (tabela 2) jest klasyczną recepturą niezawierającą szczególnych dodatków specjalnych. Zawiera on w swym składzie jedynie odpieniacz oraz dodatki opóźniający i antyfiltracyjny. Receptura taka może być stosowana podczas najprostszych cementowań, w przypadku których nie ma rygorystycznych wymogów odnośnie do wartości filtracji czy odstoju wody. Kolejny zaczyn, oznaczony symbolem B (tabela 3), sporządzony był na bazie 10% lateksu wiertniczego oraz 20% mikrocementu (mielonego cementu portlandzkiego) i może być użyty na obszarach o podwyższonym ryzyku ekshalacji gazowych. Oprócz lateksu i mikrocementu pozostałe domieszki w zaczynie B były zbliżone do tych, jakie zastosowano w zaczynie A. Zaczyn lateksowy B cechuje się wyjątkowo korzystnymi parametrami technologicznymi. Charakteryzuje się niską lepkością, nie wykazuje odstoju wody, a jego filtracja wynosi zaledwie 30 ml/30 min. Czasy, po jakich zaczyn B osiągnął 30 Bc i 100 Bc, wynoszące odpowiednio 3 i ½ h oraz 4 i ¼ h, są to czasy prawidłowe, które pozwalają na bezpieczne przeprowadzenie zabiegu cementowania rur okładzinowych. Zaczyny o symbolu C (tabela 4) oraz symbolu D (tabela 5) opracowywano w INiG – PIB od kilku lat. Zostały one wzbogacone domieszkami nanokomponentów w postaci nanotlenku glinu oraz nanokrzemionki. Zaczyny te stanowią interesującą alternatywę dla zaczynu lateksowego. Nanokomponenty zapewniają bowiem wyjątkową szczelność płaszcza cementowego i powodują wzrost jego parametrów mechanicznych. Zaczyny C i D, badane w ramach kilku prac statutowych, cechowały się brakiem odstoju wody, obniżoną

filtracją (choć nieco wyższą niż w przypadku zaczynu lateksowego) oraz odpowiednimi czasami gęstnienia. Zaczyny te charakteryzuje także prawidłowy przebieg zmian konsystencji (czasy początku gęstnienia zaczynów z nanododatkami zachodzą po około 3 i ½ h, a czasy końca gęstnienia po ponad 4 h).

Spoglądając na zamieszczone w tabelach od 2 do 5 wyniki badań, mamy zatem możliwość wyboru opracowanych w INiG – PIB zaczynów cementowych do konkretnych warunków terenowych, w zależności od potrzeb występujących na konkretnym obszarze geologicznym.

Tabela 2. Skład i parametry zaczynu A
Table 2. Composition and properties of slurry A

Skład zaczynu A		Parametry zaczynu	
Woda	w/c = 0,44	Gęstość [kg/m^3]	1910
KCl (bwow)	3,0%	Odstój wody [%]	0,2
Dodatek antyfiltracyjny	0,25%	Lepkość plastyczna [mPa·s]	105,0
Odpieniacz	0,5%	Granica płynięcia [Pa]	20,6
Opóźniacz wiązania	0,15%	Filtracja [ml/30 min.]	570
Cement wiertniczy klasy G	100,0%	Czas gęstnienia w warunkach HPHT	60°C, 25 MPa
		Konsystencja 30 Bc po czasie [godz.]	3 i ¼
		Konsystencja 100 Bc po czasie [godz.]	3 i ½

Tabela 3. Skład i parametry zaczynu B
Table 3. Composition and properties of slurry B

Skład zaczynu B		Parametry zaczynu	
Woda	w/c = 0,49	Gęstość [kg/m^3]	1850
KCl (bwow)	3,0%	Odstój wody [%]	0,0
Odpieniacz	0,5%	Lepkość plastyczna [mPa·s]	73,5
Upłynniacz	0,4%	Granica płynięcia [Pa]	5,0
Dodatek antyfiltracyjny	0,1%	Filtracja [ml/30 min.]	30
Opóźniacz wiązania	0,15%	Czas gęstnienia w warunkach HPHT	60°C, 25 MPa
Lateks wiertniczy	10%	Konsystencja 30 Bc po czasie [godz.]	3 i ½
Stabilizator lateksu	1%	Konsystencja 100 Bc po czasie [godz.]	4 i ¼
Mikrocement (mielony cement)	20,0%		
Cement wiertniczy klasy G	100,0%		

Tabela 4. Skład i parametry zaczynu C
Table 4. Composition and properties of slurry C

Skład zaczynu C		Parametry zaczynu	
Woda	w/c = 0,46	Gęstość [kg/m^3]	1900
KCl (bwow)	3,0%	Odstój wody [%]	0,0
Nano-Al_2O_3 (nanotlenek glinu)	0,5%	Lepkość plastyczna [mPa·s]	177,0
Odpieniacz	0,5%	Granica płynięcia [Pa]	28,8
Upłynniacz	0,5%	Filtracja [ml/30 min.]	90
Dodatek antyfiltracyjny	0,1%	Czas gęstnienia w warunkach HPHT	60°C, 25 MPa
Opóźniacz wiązania	0,15%	Konsystencja 30 Bc po czasie [godz.]	3 i ½
Mikrocement (mielony cement)	5,0%	Konsystencja 100 Bc po czasie [godz.]	4 i ¾
Cement wiertniczy klasy G	100,0%		

Tabela 5. Skład i parametry zaczynu D

Table 5. Composition and properties of slurry D

Skład zaczynu D		Parametry zaczynu	
Woda	w/c = 0,46	Gęstość [kg/m^3]	1910
KCl (bwow)	3,0%	Odstój wody [%]	0,0
Nano-SiO_2 (nanotlenek krzemu)	0,3%	Lepkość plastyczna [mPa·s]	70,5
Odpieniacz	0,5%	Granica płynięcia [Pa]	6,5
Upłynniacz	0,5%	Filtracja [ml/30 min.]	82
Dodatek antyfiltracyjny	0,1%	Czas gęstnienia w warunkach HPHT	60°C, 25 MPa
Opóźniacz wiązania	0,15%	Konsystencja 30 Bc po czasie [godz.]	3 i ¼
Mikrocement (mielony cement)	5,0%	Konsystencja 100 Bc po czasie [godz.]	4
Cement wiertniczy G	100,0%		

Podsumowanie

Prowadzenie testujących badań laboratoryjnych parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających i cieczy buforowych przed przystąpieniem do zabiegu cementowania jest niezbędne dla sprawnego i bezpiecznego przeprowadzenia zabiegu cementowania rur. Podczas sporządzania zaczynu czas mieszania cementu i czas jego tłoczenia do otworu powinien odpowiadać realnym warunkom panującym na wiertni. Parametry zaczynu cementowego powinny być określane w warunkach otworopodobnych (tj. w temperaturze i ciśnieniu panującym na dnie otworu wiertniczego). Najważniejszymi parametrami technologicznymi, które powinny być każdorazowo oznaczane dla zaczynu uszczelniającego używanego w danym otworze wiertniczym, są gęstość, parametry reologiczne, odstój wody (wolna woda), filtracja HPHT oraz czas gęstnienia HTPH (przebieg zmian konsystencji). Wyniki badań zaczynów cementowych powinny być przeanalizowane przez specjalistów do spraw cementowań każdorazowo przed przystąpieniem do wykonywania zabiegu uszczelniania rur.

Opracowane w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym i zaprezentowane w niniejszym artykule receptury zaczynów cementowych z powodzeniem mogą być stosowane podczas prac związanych z uszczelnianiem rur okładzinowych na złożach węglowodorów oraz w podziemnych magazynach gazu. I tak na przykład zaczyn lateksowy cechuje się wyjątkowo korzystnymi parametrami technologicznymi i jest obecnie powszechnie używany do uszczelniania otworów wiertniczych głównie na przedgórzu Karpat i w Karpatach, gdzie mogą występować zagrożenia związane z ekshalacjami gazu z otworów wiertniczych. Receptura ta charakteryzuje się odpowiednio dobranym czasem gęstnienia, niską filtracją (poniżej 50 ml/30 min) oraz zerowym odstojem wody. Ponadto na podstawie wielu prac badawczych wykonywanych w ostatnich latach w INiG – PIB opracowanych zostało szereg innowacyjnych receptur cementowych zawierających domieszki różnych nanokomponentów. Poprzez zastosowanie takich materiałów jak nano-Al_2O_3 czy też nano-SiO_2 w zaczynach cementowych uzyskano wyjątkowo trwałą mikrostrukturę oraz wyraźny wzrost wytrzymałości mechanicznej kamienia cementowego, co zostało potwierdzone w artykułach naukowych (Hadi i Ameer, 2017). Nanotlenek glinu oraz nanokrzemionka działają jako „jądra", które silnie wiążą się z hydratami cementu, sprzyjając procesowi jego hydratacji. Jednocześnie wypełniają przestrzeń porową w kamieniu cementowym, zmniejszając tym samym jego porowatość i przepuszczalność.

Analizując wyniki badań przedstawione w artykule, można stwierdzić, że istnieje możliwość doboru zaczynów cementowych opracowanych w INiG – PIB odpowiednio do konkretnych warunków terenowych oraz potrzeb występujących w danym obszarze wierceń.

Artykuł powstał na podstawie dwóch prac statutowych: *Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w pod-ziemnych magazynach wodoru w sczerpanych złożach węglowodorów*, numer archiwalny DK-4100-16/22, zlecenie wewnętrzne INiG – PIB 0028/KW/22/01 oraz *Długoterminowe badania stwardniałych zaczynów cementowych poddanych cyklicznym zmianom ciśnienia i temperatury w warunkach odwzorowujących pracę podziemnych magazynów wodoru*, numer archiwalny DK-4100-13/25, zlecenie wewnętrzne INiG – PIB 0035/KW/25/01.

Literatura

Al-Yami A., Ramasamy J., Wagle V., 2017. Chemical Additives for Oil Well Cementing. *Research and Reviews: Journal of Chemistry*, 6(4).

Baret J.F., Le Roy-Delage S., Dargaud B., 2002. Cementing compositions and use of such compositions for cementing oil wells or the like. *U.S. Patent No. 6,458,198, October 1*.

Calvert D.J., Smith D.K., 1990. API Oilwell Cementing Practices. *OTC 6210, 22nd Annual OTC in Houston, Texas, May 7–10*. DOI: 10.4043/6210-MS.

Ciechanowska M., Twaróg W., Witek W., 1998. Ocena skuteczności cementowania rur okładzinowych. *Nafta-Gaz*, 54(4): 160–169.

Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 5: 290–300. DOI: 10.18668/NG.2015.05.03.

Hadi H.A., Ameer H.A., 2017. Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement. *Journal of Engineering*, 23(12): 51–69. DOI: 10.31026/j.eng.2017.12.04.

Nelson E.B., Guillot D., 2006. Well Cementing, Second Edition. *Schlumberger*. ISBN-13: 978-097885300-6.

Rocha J.S., Calado V., Tavares F., 2013. Study of the Influence of Cement Slurry Composition in the Gas Migration. *OTC 24420, Technology Conference Brasil held in Rio de Janeiro*, 29–31 October 2013. DOI: 10.4043/24420-MS.

Rzepka M., Kędzierski M., 2019. Zaczyny cementowe z dodatkiem nanokomponentów do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych o głębokości końcowej około 1000–2000 metrów. *Nafta-Gaz*, 11: 674–682. DOI: 10.18668/NG.2019.11.02.

Rzepka M., Kędzierski M., 2020. Możliwości zastosowania nanotlenku glinu w zaczynach cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 1: 46–56. DOI: 10.18668/NG.2020.01.06.

Rzepka M., Kędzierski M., 2023. Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru w sczerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 4: 244–251. DOI: 10.18668/ng.2023.04.

Rzepka M., Kędzierski M., 2024. Wybrane zagadnienia z nanotechnologii zaczynów cementowych stosowanych do uszczelniania otworów wiertniczych. *Monografia INiG – PIB nr 244, Kraków*. ISBN: 978-83-65649-52-2.

Rzepka M., Kędzierski M., 2025. Badania kamieni cementowych powstałych z zaczynów przeznaczonych do uszczelniania podziemnych magazynów wodoru w sczerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 5: 325–333. DOI: 10.18668/NG.2025.05.03.

Salam K.K. i in., 2013. Evaluation of Thickening Time of Oil Field Class G Cement Slurry at High Temperature and Pressure using Experimental Design International. *Journal of Engineering Sciences*, 2: 361–367.

Stryczek S., Gonet A., 2001. Wymagania odnośnie do zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. *Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynieryjnych oraz hydrotechnice", Piła-Płotki*.

Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Aliyev A.A., 2023. Oil and Gas Well Cementing for Engineers. *John Wiley & Sons Ltd*. DOI: 10.1002/9781394164882.

Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., 2015. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *Int. J. Min. & Geo-Eng.*, 49(2): 281–288. DOI: 10.22059/ijmge.2015.56113.

Akty prawne i normatywne

PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja.

PN-EN ISO 10426-2:2006 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.



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



Mgr inż. Miłosz KĘDZIERSKI
Asystent w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: *milosz.kedzierski@inig.pl*