

Marcin Rzepka

Institut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Zaczyny cementowe do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych, w temperaturze dynamicznej do ok. 120°C

Wprowadzenie

W ostatnich latach coraz częściej firmy naftowe w naszym kraju zaczynają wykonywać wiercenia otworów, których końcowe głębokości wynoszą ok. 4000–4500 metrów (np. Huwniki-1, Grundy-2, Babica-2). Temperatury dynamiczne panujące na dnie tych otworów sięgają ok. 110–120°C. Według informacji napływających z przemysłu, w najbliższych latach planowane są kolejne wiercenia głębokich otworów.

W otworze wiertniczym na dużych głębokościach panują specyficzne warunki. Stopień geotermiczny zmienia się w zależności od głębokości otworu oraz budowy geologicznej górotworu (np. temperatura statyczna na dnie otworu wiertniczego w głębokości ok. 3000 metrów wynosi

ok. 100–120°C). Ciśnienie hydrostatyczne w otworze zależy od wysokości i ciężaru właściwego cieczy wiertniczej (np. na głębokości ok. 3000 metrów w przypadku ciężkiego zaczynu cementowego ciśnienie to może wynosić ok. 60–70 MPa). Wody złożowe (solanki) w dużym stopniu oddziałują na stwardniały zaczyn cementowy (szczególnie agresywne w stosunku do płaszcza cementowego są jony Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2}), dlatego też zaczyny przeznaczone do dużych głębokości powinny zawierać w swoim składzie dodatki: podnoszące odporność termiczną, opóźniające wiązanie, obniżające filtrację oraz poprawiające odporność na korozję chemiczną wywołaną działaniem solanek złożowych [1, 2, 4, 5].

Środki opóźniające czas wiązania w zaczynach cementowych

W wysokich temperaturach niezwykle ważne jest zapewnienie zaczynowi cementowemu odpowiedniej przelączalności podczas całego trwania zabiegu. Należy wówczas wprowadzać do zaczynu cementowego tzw. środki opóźniające wiązanie, które powodują wydłużenie czasu przejścia pompowanego (płynnego) zaczynu w stwardniałą masę (kamień cementowy). Do podstawowych środków stosowanych jako opóźniacze wiązania zalicza się:

- lignosulfoniany,
- kwasy hydrokarboksylowe,
- pochodne celulozy,
- fosforany organiczne,
- komponenty nieorganiczne:
 - kwasy i sole: borowy, fosforowy,
 - NaCl – przy koncentracji ok. 20% b/wow,
 - tlenki cynku i ołowiu.

Wpływ statycznej i dynamicznej temperatury w otworze na proces cementowania rur

Zagadnienie projektowania zaczynów cementowych do zabiegu cementowania w głębokich otworach wiertniczych związane jest głównie z dwoma czynnikami, tj.:

warunkami temperaturowymi oraz gradientem ciśnień w otworze. Szczególnie duże znaczenie ma rozgraniczenie temperatury statycznej (temperatury skał) od temperatury

dynamicznej, panującej w czasie przepływu płuczki lub zaczynu cementowego w otworze.

Określenie rozkładu temperatur w otworze wiertniczym nastęca pewne trudności, gdyż każdy otwór jest złożonym systemem wymiany ciepła z górotworem. Termiczne właściwości skał zależą od wielu czynników: ciśnienia, porowatości, składu mineralnego, struktury oraz gęstości.

Ustalane warunki temperaturowe występują wtedy, gdy wypełniająca otwór ciecz wiertnicza ma temperaturę równą pierwotnej temperaturze otaczającej skały. W celu uzyskania warunków zbliżonych do równowagi cieplnej między płuczka a otaczającymi skałami, wymagany jest przestój co najmniej kilkudniowy (co w praktyce jest trudne do zrealizowania). Na podstawie wartości gradientu geotermicznego określa się temperaturę statyczną otworu. Można przyjąć, że zmiana temperatury z głębokością zachodzi według następującej prawidłowości:

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

gdzie:

T_s – temperatura statyczna na dowolnej głębokości [$^\circ\text{C}$],

T_o – temperatura warstwy neutralnej (w Polsce przyjmuje się wartość: 8°C),

G – gradient geotermiczny danego regionu [$^\circ\text{C}/\text{m}$],

h – głębokość zalegania ustalonej warstwy [m].

Z powyższego wzoru wynika, że dla prawidłowego wyznaczenia w otworze temperatury statycznej konieczna jest znajomość wartości gradientu geotermicznego dla regionu, w którym wykonywane jest wiercenie. Jak wiadomo, gradient geotermiczny dla skał osadowych może się wahać w szerokich granicach – jego średnia wartość dla Europy wynosi ok. $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

Temperatura dynamiczna jest wynikiem aktywnego przenoszenia ciepła przez krążące w otworze wiertniczym ciecze. Przepływ płuczki, buforu i zaczynu cementowego obniża temperaturę na dnie otworu i zmienia rozkład tem-

peratur na całej jego długości, w związku z czym 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.

Na wartość temperatury dynamicznej bardzo duży wpływ (poza głębokością) ma również prędkość przepływu (krążenia cieczy), średnica otworu, właściwości przepływających cieczy i ciepło właściwe skał. Stosunkowo mała przewodność cieplna skał osadowych oraz duży opór cieplny stawiany przez osad filtracyjny powodują, że różnice wartości temperatury statycznej i dynamicznej na dnie otworu, jak również temperatury cieczy wiertniczej na wypływie, mogą sięgać kilkudziesięciu stopni.

Podczas krążenia cieczy w otworze najwyższa temperatura dynamiczna występuje nie w strefie przydennej, a na wysokości ok. $\frac{3}{4}$ głębokości otworu i przewyższa temperaturę denną o kilka (a niekiedy nawet o kilkanaście) stopni C. Położenie punktu najwyższej temperatury T_{max} zależy od indywidualnych warunków panujących w danym otworze (m.in. prędkości przepływu, gradientu temperatury i głębokości otworu). Gdy natężenie przepływu wzrasta, punkt T_{max} przemieszcza się w górę otworu w przestrzeni pierścieniowej.

Podnoszenie się temperatury dennej na określoną wysokość od spodu otworu ma korzystne znaczenie dla wiązania zaczynu cementowego w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego. Daje to gwarancję, że zaczyn cementowy wiąże w oznaczonym czasie nie tylko w przydennej strefie otworu, tj. w warunkach temperatury do jakiej dobrany był jego skład, ale również w dłuższym odcinku przestrzeni pierścieniowej.

Najbardziej wiarygodne wyniki w zakresie wyznaczenia rozkładu temperatury dynamicznej w otworze uzyskuje się poprzez bezpośredni pomiar (np. poprzez zastosowanie termometrów wrzutowych, zwanych również sondami termoczułymi).

Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne dla opracowania składów zaczynów cementowych przeznaczonych do warunków wysokich temperatur i ciśnień złożowych były wykonywane w Zakładzie Technologii Wiercenia INiG Oddz. Krosno zgodnie z normami PN-EN 10426-2 *Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów – część 2: Badania cementów wiertniczych*, PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiert-*

niczych oraz API SPEC 10 *Specification for materials and testing for well cements*.

Zaczyny zarabiano wodą zasoloną chlorkiem sodu w ilości 10% bwow oraz chlorkiem potasu w ilości 3% bwow. Środek odpieniający, upłynniacz, dodatek antyfiltracyjny i opóźniacz dodawano do wody zarobowej. Używano lateksu w ilości od 10 do 25% bwoc (w stosunku do masy suchego cementu). Mikrosilikę mieszano razem z hema-

tytem, mikrocementem i cementem. Następnie składniki sypkie wprowadzano do wody zarobowej. Wszystkie zaczyny sporządzano na bazie cementu wiertniczego G.

Po sporządzeniu zaczynu cementowego wykonywano badania parametrów reologicznych, określano gęstość i rozlewność. Mierzono odstęp wody oraz czas gęstnienia zaczynu (oznaczano wartości 30 Bc i 100 Bc). Po

przeanalizowaniu wyników badań, wybrane receptury wytypowano do badań filtracji, parametrów reologicznych w temperaturze 110 lub 120°C oraz parametrów kamienia cementowego. Dla kamienia cementowego wykonywano oznaczenia wytrzymałości na ściskanie, przyczepności do rur stalowych oraz przepuszczalności dla gazu po 2, 7 i 28 dniach.

Receptury zaczynów cementowych proponowane do zastosowanie przemysłowego

Na podstawie badań laboratoryjnych wytypowano ramowe składy czterech zaczynów cementowych (A, B, C i D), proponowane do zastosowanie w warunkach przemysłowych. W tabelicy 1 zamieszczono składy zaczynów o gęstościach od 1820 do 2350 kg/m³, które mogą być użyte do uszczelnienia eksploatacyjnych kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych, gdzie temperatura denna wynosi ok. 110–120°C. Konkretny zaczyn należy

dobierać do danych warunków geologiczno-złożowych w zależności od występującego w otworze gradientu ciśnienia złożowego i szczelinowania. Na rysunkach od 1 do 4 przedstawiono przebieg zmian konsystencji badanych zaczynów, a na rysunkach od 5 do 7 – wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, przyczepności do rur stalowych oraz przepuszczalności dla gazu kamieni cementowych powstałych po związaniu zaczynów A, B, C i D.

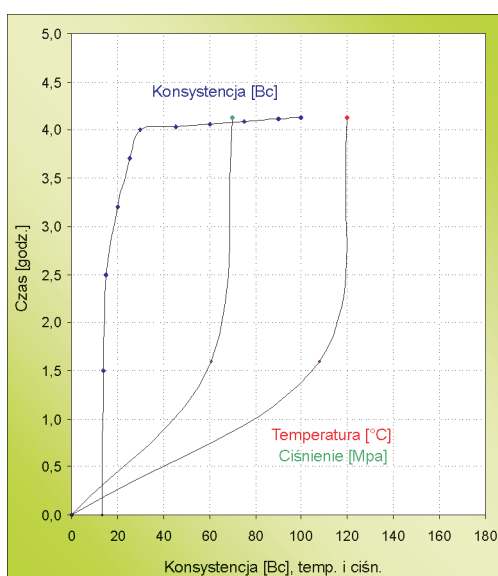
Tablica 1. Składy zaczynów cementowych proponowane do zastosowania w przemyśle

Skład zaczynu (ilości podano w % bwoc) Temperatura 110°C (D) oraz 120°C (A, B, C), Ciśnienie 70 MPa	ρ [kg/m ³]	Odstęp wody [%]	η_{pl} [mPa s]	τ_y [Pa]	F [cm ³ /30 min]	Cz_g [h:min] 30 Bc 100 Bc
SKŁAD A Woda w/c = 0,34 Dodatek antyfiltracyjny – ok. 0,1 Uplynniciak – ok. 0,4 Opóźniacz wiązania – ok. 0,4 Lateks zagraniczny II – 20 NaCl (bwow) – 10 (do masy wody) Mikrosilika – 10 Hematyt – 50 Cement wiertniczy G – 100	2150	0,0	112	10	48	4:00 4:08
SKŁAD B Woda w/c = 0,34 Dodatek antyfiltracyjny – ok. 0,1 Uplynniciak – ok. 0,4 Opóźniacz wiązania – ok. 0,4 Lateks zagraniczny II – 25 NaCl (bwow) – 10 (do masy wody) Mikrosilika – 10 Hematyt – 70 Cement wiertniczy G – 100	2200	0,0	124	12	44	3:22 3:30
SKŁAD C Woda w/c = 0,38 Dodatek antyfiltracyjny – ok. 0,1 Uplynniciak – ok. 0,4 Opóźniacz wiązania – ok. 0,45 Lateks zagraniczny II – 25 NaCl (bwow) – 10 (do masy wody) Mikrosilika – 10 Hematyt – 110 Cement wiertniczy G – 100	2350	0,0	165	13	40	3:25 4:13

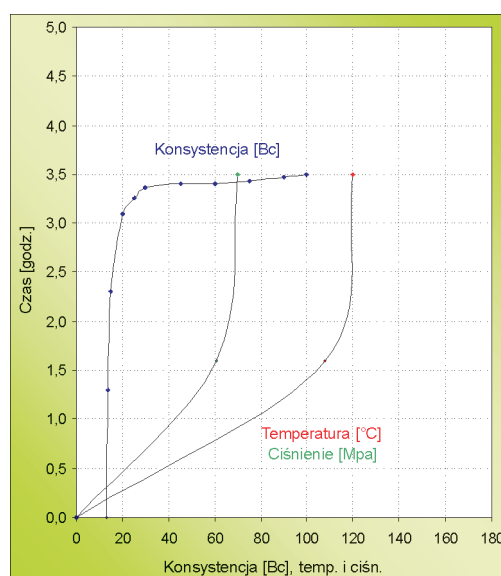
Tablica 1. Składy zaczynów cementowych proponowane do zastosowania w przemyśle

Skład zaczynu (ilości podano w % bwoc) Temperatura 110°C (D) oraz 120°C (A, B, C), Ciśnienie 70 MPa	ρ [kg/m ³]	Odstój wody [%]	η_{pl} [mPas]	τ_y [Pa]	F [cm ³ /30 min]	Cz_g [h:min] 30 Bc 100 Bc
SKŁAD D Woda w/c – 0,55 KCl (bwow) – 3 (do masy wody) Uplynnierz – ok. 0,4 Dodatek antyfiltracyjny – ok. 0,2 Opóźniacz wiązania – ok. 1,5 Lateks zagraniczny I – 10 Mikrocement – 20 Mikrosilica – 20 Cement wiertniczy G – 100 Dodatek ekspansywny – ok. 0,3	1820	0,0	120	14	60	4:17 4:24

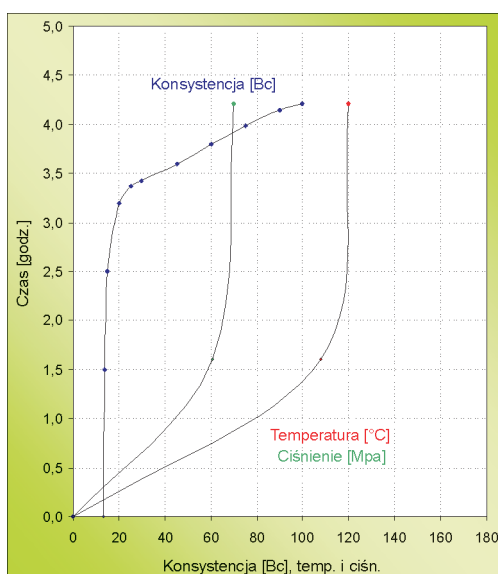
Oznaczenia: ρ – gęstość zaczynu cementowego, η_{pl} – lepkość plastyczna, τ_y – granica płynięcia, F – filtracja, Cz_g – czas gęstnienia (30 i 100 Bc).



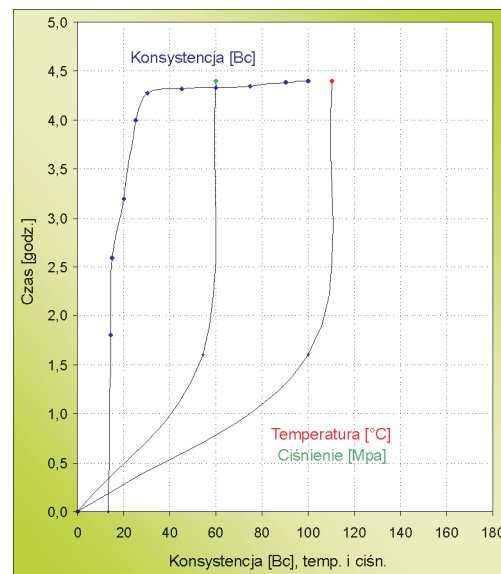
Rys. 1. Zmiany konsystencji zaczynu cementowego A



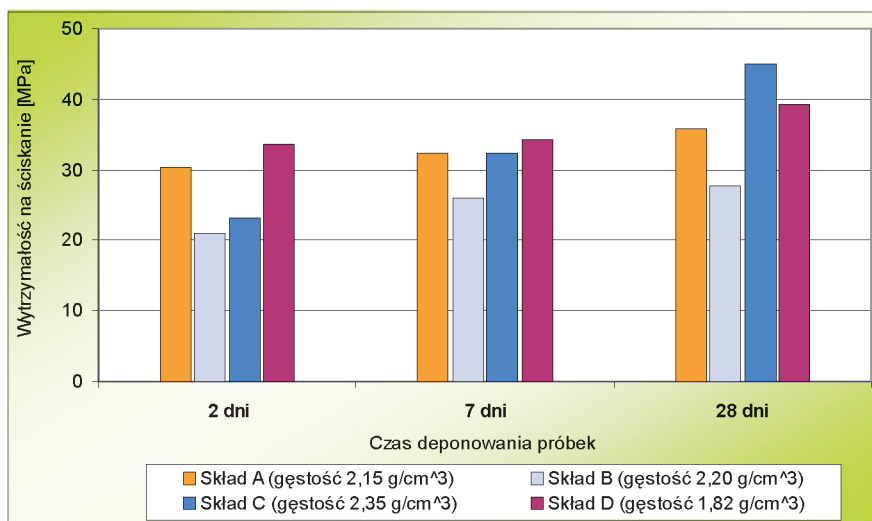
Rys. 2. Zmiany konsystencji zaczynu cementowego B



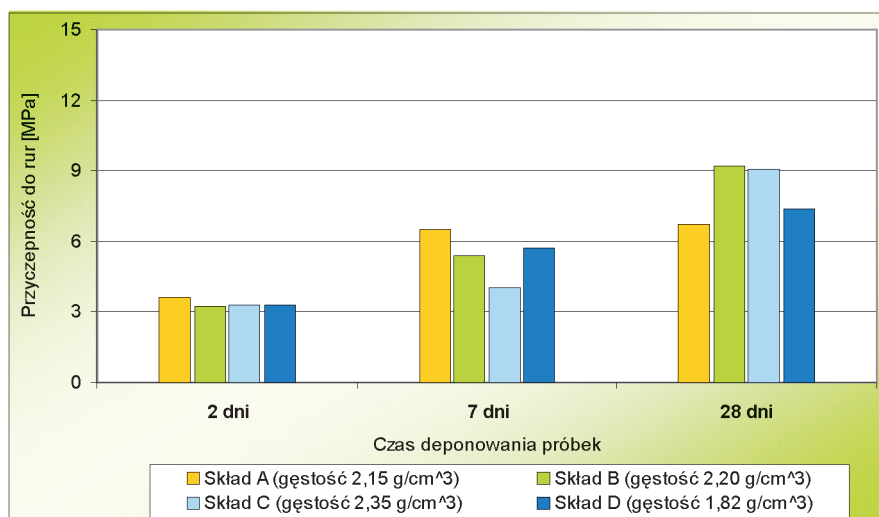
Rys. 3. Zmiany konsystencji zaczynu cementowego C



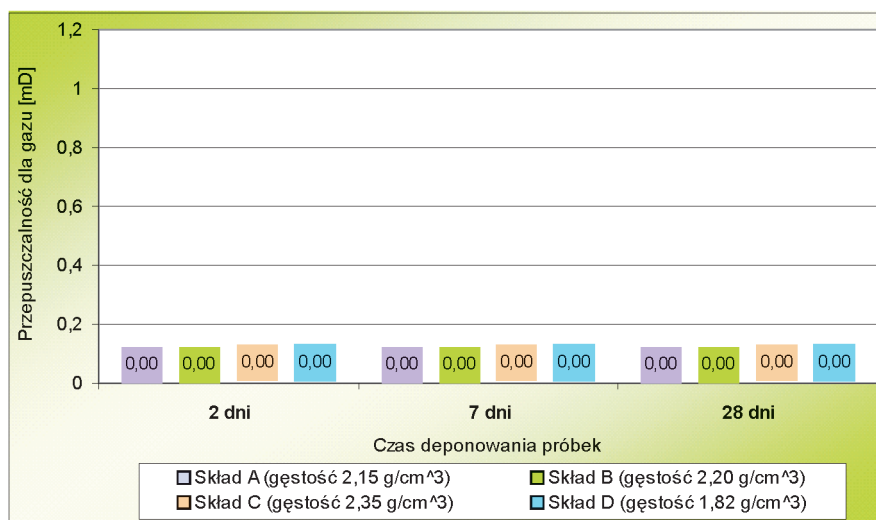
Rys. 4. Zmiany konsystencji zaczynu cementowego D



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie próbek kamieni cementowych badanych w 110 i 120°C



Rys. 6. Przyczepność do rur próbek kamieni cementowych badanych w 110 i 120°C



Rys. 7. Przepuszczalność dla gazu próbek kamieni cementowych badanych w 110 i 120°C

Podsumowanie

1. W wyniku badań laboratoryjnych opracowano receptury ciężkich zaczynów uszczelniających dla temperatury dynamicznej ok. 110–120°C i ciśnienia ok. 60–70 MPa, dla Niżu Polskiego. Zaczyny te zarabiane były 10% solanką NaCl i zawierały od 50 do 110% środka obciążającego.
2. Wykonano również badania zaczynów o „normalnej gęstości”, tj. ok. 1800 kg/m³, w temp. 110°C, z przeznaczeniem do zastosowania ich na obszarze przedgórza Karpat.
3. Parametry technologiczne opracowanych zaczynów cementowych można z powodzeniem regulować dodatkami powszechnie stosowanymi w krajowym wiertnictwie.
4. Środek odciążający – hematyt – dodawany do zaczynów, pozwolił na uzyskanie gęstości w granicach od ok. 2150 do ok. 2350 kg/m³ (możliwe jest stosowanie większych ilości hematytu w celu uzyskania wymaganego ciężaru).
5. Opracowane zaczyny cementowe po dobraniu odpowiednich środków upłynniających charakteryzują się dobrymi parametrami reologicznymi. Ich lepkości plastyczne wynoszą ok. 110–160 mPa · s.
6. Czasy gęstnienia opracowanych zaczynów cementowych wynoszą od ok. 3 do ok. 5 godzin i można je z powodzeniem regulować dodatkami odpowiedniego środka opóźniającego. Lepkości początkowe zaczynów badanych w konsystometrze ciśnieniowym są niewielkie (ok. 5–15 Bc), a przebieg zmian konsystencji zaczynów cementowych ma charakter „prostokątny” (tzn. czas pomiędzy uzyskaniem konsystencji 30 i 100 Bc jest krótki).
7. Filtracje zaczynów z dodatkiem 20% lateksu wynoszą ok. 50 cm³/30 min. Obniżenie filtracji można uzyskać stosując zaczyn z dodatkiem 25% lateksu.
8. Opracowane zaczyny posiadają zerowy odstęp wody.
9. Kamienie cementowe powstałe po związaniu opracowanych zaczynów są nieprzepuszczalne dla gazu i cechują się niezwykle wysokimi parametrami mechanicznymi. Już po okresie dwóch dni wytrzymałość na ściskanie większości badanych próbek kamieni cementowych przekracza 25 MPa, natomiast po okresie 28 dni hydratacji wytrzymałość na ściskanie osiąga wartości ok. 35–40 MPa. Przyczepność kamienia cementowego do rur stalowych jest również bardzo duża (po okresie dwóch dni wynosi ok. 3–4 MPa, by po 28 dniach wzrosnąć do ok. 7–9 MPa).
10. Opracowane receptury zaczynów mogą znaleźć zastosowanie w procesie cementowania kolumn rur okładzinowych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień złożowych na Niżu Polskim i przedgórzu Karpat dla głębokości ok. 4000–4500 metrów.

Artykuł nadesłano do Redakcji 30.11.2009. Przyjęto do druku 15.02.2010.

Literatura

- [1] Herman Z., Migdał M.: *Problemy cementowania rur okładzinowych na Niżu Polskim*. Nafta-Gaz 12, Kraków 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] Rzepka M. i in.: *Receptury zaczynów cementowych z dodatkiem mikrocementu do warunków wysokich temperatur i ciśnień złożowych*. Praca naukowo-badawcza, Kraków 2005.
- [5] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów*

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Raczkowski

uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych. Sympozjum Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice, Piła-Płotki 2001.



Dr inż. Marcin RZEPKA – absolwent AGH w Krakowie. Pracownik Instytutu Nafty i Gazu Oddział w Krośnie. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z doborem i opracowaniem składów zaczynów cementowych o zróżnicowanych właściwościach technologicznych dla różnorodnych warunków złożowych oraz badaniami testującymi parametry świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych.