

Porównanie wyników metod pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczkowego

A comparison of the results of methods for measuring the efficiency of mud removal

Marcin Kremieniewski

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Odpowiednie oczyszczenie przestrzeni pierścieniowej przed zabiegiem cementowania jest jednym z ważniejszych czynników mających wpływ na prawidłowe uszczelnienie kolumny rur okładzinowych. Nieodpowiednie lub niecałkowite usunięcie płuczki lub pozostałości osadu płuczkowego może skutkować powstawaniem niekontrolowanych wypływów gazu (migracji bądź ekshalacji) na kontakcie płaszcza cementowego z formacją skalną oraz z powierzchnią zapuszczonych rur okładzinowych. Związane jest to z brakiem kompatybilności płuczki i tłoczonego po niej zaczynu cementowego, co objawia się tworzeniem na ścianach otworu żelujących kanałków, umożliwiających przepływ gazu. Dodatkowo brak odpowiedniego oczyszczenia przestrzeni pierścieniowej powodował będzie obniżenie wartości przyczepności płaszcza cementowego do powierzchni styku. Wynikiem powyższego może być brak odpowiedniej stabilizacji kolumny rur poprzez osłabione jej zespolenie w dolnej części ze ścianą otworu, a w górnej części z poprzednią kolumną rur o większej średnicy. W związku z tym w celu poprawy zarówno szczelności odwiertu, jak też jakości stanu zamocowania prowadzi się badania laboratoryjne efektywności oczyszczania przestrzeni pierścieniowej poprzez pomiar skuteczności usuwania osadu płuczkowego. Dotychczas pomiar skuteczności usuwania osadu lub działania cieczy przemywającej prowadzony był przy użyciu wiskozymetru obrotowego. Podczas badania osad płuczkowy wytwarzany jest na powierzchni rotora, a następnie usuwany za pomocą cieczy przemywającej. W ostatnim czasie w INiG – PIB opracowano nową metodę pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczkowego przez zastosowanie nowo zaprojektowanego symulatora przepływu cieczy wiertniczych (patent P.423842). Urządzenie pozwala na symulację przepływu cieczy wiertniczej (płuczki, cieczy przemywającej, buforu) w symulowanej przestrzeni pierścieniowej. Możliwy jest dobór parametrów przepływu (wydatku tłoczenia) oraz czasu kontaktu cieczy z badaną powierzchnią. Ze względu na różnicowanie zasad pomiaru podczas badań przy użyciu wiskozymetru i symulatora – postanowiono przeprowadzić badania porównawcze w celu określenia stopnia zbieżności omawianych metod. Badania polegały na ocenie skuteczności usuwania tego samego rodzaju osadu przez te same cieczy przemywające, lecz przy użyciu różnych metod pomiaru. Uzyskane wartości skuteczności usuwania osadu poddano analizie korelacyjnej, na podstawie której możliwe było porównanie wyników analizowanych metod pomiaru.

Słowa kluczowe: oczyszczanie przestrzeni pierścieniowej, ciecz przemywająca, symulator przepływu cieczy wiertniczych, wiskozymetr, korelacja, osad płuczkowy.

ABSTRACT: The proper cleaning of the annular space before cementing is one of the most important factors affecting the proper sealing of the casing column. Inadequate or incomplete removal of the mud cake or residues of the mud may result in the formation of uncontrolled gas outflows (migration or exhalation) at the contact of the cement sheath with the rock formation and with the surface of run-down casing. It is related to the lack of compatibility in the contact of the mud and the cement. Additionally, the lack of proper cleaning of the annular space will reduce the adhesion value of the cement sheath to the contact surface. The result of the above may be the lack of adequate stabilization of the column of pipes due to its weakened connection in the lower part with the wall, and in the upper part with the previous column of larger diameter pipes. Therefore, to improve both the tightness of the borehole as well as the quality of the cementation condition, laboratory tests of the efficiency of cleaning the annular space are carried out by measuring the efficiency of washing mud removal. So far, measuring the efficiency of mud removal or the effect of washing utilization have been done using a rotary viscometer. During the test, a mud cake is produced on the rotor surface and then removed with washing liquid. Recently, the Oil and Gas Institute – National Research Institute developed a new method for measuring the efficiency of drilling mud removal by using a newly developed drilling fluid flow simulator (Patent P.423842). The device enables the simulation of the drilling fluid flow (drilling fluid, washing fluid, spacer) in the simulated annular space. It is possible to select the parameters of the flow (delivery rate) and the contact time of the liquid with the tested surface. Due to the different measurement principles during the tests with the viscometer and the simulator, it was decided to conduct a comparison and determine the degree of convergence of the discussed methods. The same rinsing liquids were

Autor do korespondencji: M. Kremieniewski, e-mail: marcin.kremieniewski@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 15.09.2020 r. Zatwierdzono do druku: 11.01.2021 r.

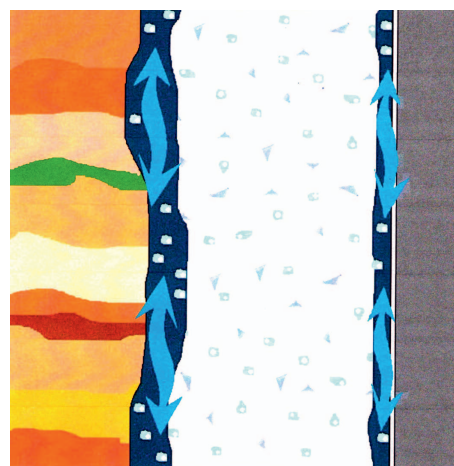
tested to remove the same type of mud, but using different measurement methods. The obtained values of mud removal efficiency were subjected to the correlation analysis, which made it possible to compare the results of the analyzed measurement methods.

Key words: annular space cleaning, washing liquid, drilling fluid flow simulator, viscometer, correlation, mud sludge.

Wprowadzenie

Uzyskanie odpowiedniej szczelności na kontakcie formacja skalna–płaszcz cementowy–rura okładzinowa i jednocześnie wyeliminowanie możliwości wystąpienia migracji bądź ekshalacji gazu po zacementowaniu związane jest w głównej mierze z odpowiednim oczyszczeniem przestrzeni pierścieniowej przed zabiegiem cementowania. Ze względu na pojawiający się od kilku lat problem dotyczący braku szczelności otworu po zacementowaniu zagadnienia związane z odpowiednim przygotowaniem odwiertu do cementowania są priorytetem w branży naftowej (Herman, 1995a, 1995b; Uliasz i Kremieniewski, 2012; Kremieniewski i Rzepka, 2016; Kremieniewski i Stryczek, 2019). Przygotowanie otworu do cementowania to między innymi odpowiednie oczyszczenie przestrzeni pierścieniowej, dlatego też wymagane jest prowadzenie prac badawczych nad poprawą skuteczności usuwania osadu, co wymusza opracowywanie nowych technologii i metod badawczych (Stryczek i Gonet, 2005; Kremieniewski, 2018; Kremieniewski, 2019). W celu zrozumienia wpływu skuteczności oczyszczenia przestrzeni pierścieniowej na poprawę efektywności uszczelnienia otworu wiertniczego należy wspomnieć o przemianach zachodzących w otworze podczas zabiegu cementowania. Po przewierceniu określonego interwału w otworze prowadzona jest cyrkulacja płuczki wiertniczej. Kolejny etap polega na usunięciu z otworu przewodu wiertniczego, wykonaniu pomiarów geofizycznych, a następnie zapuszczeniu kolumny rur okładzinowych. Po tych czynnościach następuje wznowienie obiegu płuczki, czyli płukanie przygotowujące do zabiegu cementowania. Płuczka stosowana do przewiercania określonego interwału posiada własności, które zostały zaprojektowane dla określonych warunków otworowych, jednak parametry te wykazują zazwyczaj niekorzystny wpływ na usuwanie powstałego z niej osadu płuczki podczas wytłaczania płuczki z otworu (Habrat et al., 1980; Nelson, 1990; Kremieniewski, 2020a). Niezbędne jest wówczas zmodyfikowanie właściwości płuczki poprzez obniżenie jej parametrów reologicznych w trakcie cyrkulacji, co określa się mianem obróbki płuczki. Zabieg taki pozwala na usunięcie z płuczki cząstek stałych, zwiercin, materiałów obciążających oraz osadu filtracyjnego osadzonego na formacji przepuszczalnej. Celem obróbki płuczki jest również zmniejszenie jej żelowania. Zgodnie z zaleceniami technologicznymi obieg płuczki powinien być prowadzony do czasu, aż z otworu zostaną usunięte substancje stałe i zżelowana płuczka

(Uliasz et al., 2012; Błaż, 2017). Ponadto kondycjonowanie prowadzone jest w celu zastąpienia partii płuczki o większej gęstości, dostosowanej do wiercenia otworu, na płuczkę o niższej gęstości, która jest łatwiej usuwalna podczas późniejszego cementowania. Po zapuszczeniu rur okładzinowych i wykonaniu obróbki płuczki wiertniczej do otworu wtłacza się cieczę wyprzedzającą, a następnie przystępuje się do cementowania. Zaczyn cementowy po wtłoczeniu go w uszczelniany interwał przestrzeni pierścieniowej przy niedokładnym oczyszczeniu otworu kontaktuje się z osadem płuczki. Następuje wówczas nagły wzrost parametrów reologicznych i mocne żelowanie zaczynu w miejscu styku świeżego zaczynu z płuczką pozostałą na ścianie otworu i na rurach okładzinowych (rys. 1).



Rys. 1. Żelowanie zaczynu w miejscach kontaktu z płuczką pozostałą na ścianie otworu i na powierzchni rur

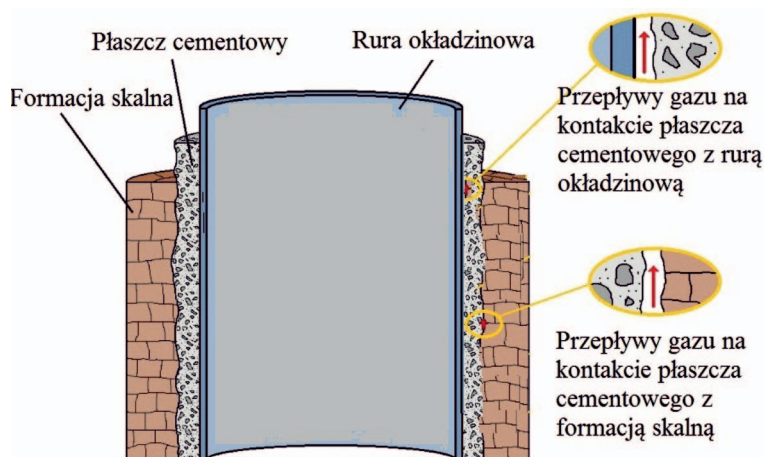
Fig. 1. Gelation of the cement slurry in the places of contact with the scrubber remaining on the borehole wall and the surface of the pipes

Dodatkowo obecne w składzie płuczki polimery powodują lokalne opóźnienie lub zatrzymanie wiązania zaczynu (Stryczek, 2016; Kremieniewski i Kędzierski, 2019). Wynikiem takiego zachowania zaczynu jest możliwość wtargnięcia medium gazowego w strukturę wiążącego na kontakcie z płuczką zaczynu i migracja lub ekshalacja gazu. Ponadto skażające właściwości płuczki pozostałej na ścianach otworu i na rurach okładzinowych powodują obniżenie przyczepności płaszcza cementowego do formacji skalnej i do rur okładzinowych, czego wynikiem jest brak stabilizacji kolumny rur. Analizując przyczyny nieudanych zabiegów cementowania, które od strony technicznej zostały przeprowadzone poprawnie, stwierdzono, że uszczelnienie otworu zależy głównie od rodzaju użytej podczas wiercenia płuczki (od jej właściwości inhibicyjnych)

(Uliasz et al., 2006). W związku z tym istotne jest prowadzenie odpowiednich badań laboratoryjnych skuteczności usuwania osadu powstałego z określonego rodzaju płuczki, a następnie na podstawie badań – dobór rodzaju i składu cieczy przemywających. Parametry tych cieczy są bardzo ważne przy wzajemnej interakcji podczas płukania i wypierania płuczki z otworu. Istotne jest również oddziaływanie cieczy wiertniczych (przemywającej i buforowej) na odsłoniętą skałę poprzez utworzony na ścianie otworu osad filtracyjny zawierający koloidalne cząstki fazy stałej i polimerów. Odpowiednio zaprojektowana ciecz przemywająca powinna pozostawiać nawilżoną kolumnę rur okładzinowych oraz formację skalną - w celu poprawy wiązania zaczynu cementowego (Jasiński, 2016; Kremieniewski, 2018; Kędzierski et al., 2019). Powinna również posiadać parametry reologiczne umożliwiające wtlaczanie jej w reżimie turbulentnym – w celu poprawy skuteczności usuwania płuczki, lecz bez powodowania szczelinowania formacji skalnej. Ważne jest również zapewnienie wystarczającego czasu kontaktu cieczy przemywającej z powierzchniami styku w przestrzeni pierścieniowej lub pozarurowej – w celu uzyskania optymalnego usunięcia płuczki i odpowiedniego oczyszczenia ścian otworu z osadu płuczkowego. Ponadto istotne jest możliwe łatwe usunięcie cieczy wyprzedzającej z przestrzeni pierścieniowej przez wtlaczany zaczyn cementowy. Wyniki prac doświadczalnych pozwalają wnioskować, że jakość i ilość pozostawionego na ścianie otworu osadu płuczkowego znacząco wpływa na efektywność uszczelnienia kolumny rur (Kremieniewski, 2018, 2020b). Wiąże się to z faktem, że przemywki wykazują właściwości reologiczne cieczy newtonowskich i powodują dyspergowanie płuczki. Ze względu na ich niską lepkość korzystne jest ich wtlaczanie przy zachowaniu przepływu turbulentnego (Zima, 2014; Kremieniewski, 2020c). Jak już wspomniano, odpowiedni przepływ cieczy wyprzedzających i usunięcie z przestrzeni pierścieniowej pozostałości po płuczce wiertniczej przed zabiegiem cementowania są kluczowymi czynnikami, które decydują o szczelności płaszcza cementowego podczas eksploatacji odwiertu. Nieodpowiednie wyparcie płuczki z przestrzeni pierścieniowej może spowodować przepływy gazu na kontakcie płaszcza cementowego z powierzchniami styku (rys. 2) (Jasiński, 2016).

Innymi konsekwencjami może być korozja lub uszkodzenie rur okładzinowych, a w ostateczności wzrost kosztów realizacji otworu związany z ponownym cementowaniem. Powyższe potwierdza, że parametry technologiczne cieczy przemywających muszą być precyzyjnie zaprojektowane, a skuteczne usunięcie osadu płuczkowego z przestrzeni pierścieniowej ma zasadnicze znaczenie w realizacji otworu wiertniczego (Kędzierski et al., 2019; Kremieniewski i Kędzierski, 2020).

Mimo znacznego postępu w rozwoju techniki i technologii cementacyjnej w krajowym wiertnictwie w dalszym ciągu odnotowuje się nieudane zabiegi uszczelniania rur, w szczególności w otworach gazowych, czego wynikiem są ekshalacje gazu z przestrzeni pozarurowych (Uliasz et al., 2015; Kremieniewski i Kędzierski, 2020). Dlatego też w celu poprawy skuteczności cementowania wdrażane są różne metody pomiaru efektywności usuwania osadu, które pozwalają na opracowanie optymalnych receptur cieczy przemywających oraz na odpowiedni dobór warunków tłoczenia. Porównanie tych metod pozwala na wytypowanie optymalnej metody badawczej niezbędnej do prowadzenia konkretnego testu. To w konsekwencji może się przekładać na poprawę zarówno skuteczności usuwania osadu płuczkowego, jak też efektywności uszczelniania otworu wiertniczego.



Rys. 2. Kanały gazowe na kontakcie płaszcza cementowego z nieodpowiednio oczyszczonymi powierzchniami styku w przestrzeni pierścieniowej otworu

Fig. 2. Gas channels at the contact of the cement sheath with inadequately cleaned contact surfaces in the annular space of the wellbore

Przebieg prac badawczych

Badania, których celem było porównanie wyników metod pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczkowego wykonane zostały w Laboratorium Zaczynów Uszczelniających INiG – PIB. Analizowanymi metodami pomiaru skuteczności usuwania osadu były:

- pomiar skuteczności usuwania osadu płuczkowego przy użyciu wiskozymetru obrotowego;
- badanie efektywności oczyszczania przestrzeni pierścieniowej przy zastosowaniu symulatora przepływu cieczy wiertniczych.

Pomiary skuteczności i efektywności usuwania osadu zrealizowano na podstawie metodyki opracowanej w INiG – PIB oraz oparto na normach: PN-85/G-02320 *Cementy i zaczyny*

cementowe do cementowania w otworach wiertniczych; PN-EN 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych oraz API SPEC 10 Specification for materials and testing for well cements.

Prace badawcze, podczas których wykonywano pomiar skuteczności działania cieczy przemywających przy użyciu wiskozymetru obrotowego zrealizowano poprzez określenie stopnia usunięcia osadu płuczkowego z powierzchni rotora wiskozymetru obrotowego (rys. 3).



Rys. 3. Wiskozymetr obrotowy Fann model 900

Fig. 3. Fann model 900 rotary viscometer

Jest to jeden z bardziej znanych testów umożliwiających określenie skuteczności usuwania osadu z płuczki wiertniczej przez cieczy przemywające zarówno przed zabiegiem cementowania, jak i przy doborze cieczy przemywających do oczyszczenia strefy złożowej. Pomiar wykonywano poprzez zanurzenie rotora symulującego powierzchnię rur okładzinowych w płuczce (rys. 4) i utworzenie na jego powierzchni osadu poprzez ruch obrotowy rotora z określoną prędkością przy określonym czasie kontaktu.



Rys. 4. Rotor zanurzony w płuczce (wytwarzanie osadu płuczkowego)

Fig. 4. Rotor immersed in the drilling mud (production of mud cake)

Liniową prędkość przepływu cieczy przemywającej prze-liczono na prędkość obrotową według zależności:

$$\omega = \frac{v}{R} \quad (1)$$

$$v = \omega R \quad (2)$$

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta L}{R}}{\Delta t} = \frac{\Delta L}{\Delta t R} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = v \quad (4)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna [rad/s] – lub opuszczając radiany: [1/s = s⁻¹],

R – promień okręgu, którego fragmentem jest zakreślany łuk [m],

v – prędkość liniowa, czyli „zwykła” prędkość punktu [m/s],

t – czas [s].

Powierzchnia rotora została poddana modyfikacji w celu uzyskania chropowatości porównywalnej do powierzchni rur okładzinowych, dzięki czemu możliwe było „wychwycenie” większej ilości osadu płuczkowego. Utworzony na powierzchni rotora osad usuwano w cieczy przemywającej wg metodyki analogicznej do wytwarzania osadu (ruch obrotowy w cieczy przemywającej). Na podstawie obliczeń oraz wyników prowadzonych prac ustalono prędkość obrotową na wartość 60 obr/min, natomiast czas kontaktu cieczy wynosił 5 min (co w symulowanych warunkach laboratoryjnych odpowiadało czasowi kontaktu 10 min – zgodnie z instrukcją rurowania i cementowania). W celu wyznaczenia skuteczności usuwania osadu płuczkowego najpierw określono masę rotora przed wytworzeniem osadu (m_0), następnie na powierzchni rotora wytworzono osad płuczkowy, po czym zważono rotor wraz z osadem (m_1). W końcowym etapie osad usunięto z powierzchni rotora poprzez jego ruch obrotowy w cieczy przemywającej i ponownie określono masę rotora z pozostałością osadu po płukaniu (m_2). Na podstawie uzyskanych wyników obliczono procentową skuteczność usuwania osadu płuczkowego według wzoru:

$$\% = 100 \cdot \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (5)$$

gdzie:

$\%$ – procent wycięcia osadu,

m_0 – masa rotora przed testem (bez osadu),

m_1 – masa rotora z osadem płuczkowym,

m_2 – masa rotora z pozostałością osadu płuczkowego (po przemyciu).

Dla celów porównawczych utworzono punkt kontrolny, który odpowiadał 100-procentowemu usunięciu osadu.

Skuteczność usuwania osadu płuczkowego określano proporcjonalnie do wartości tego punktu odniesienia (wartość bazowa).

Drugim pomiarem było badanie efektywności oczyszczania przestrzeni pierścieniowej przy użyciu skonstruowanego w INiG – PIB symulatora przepływu cieczy wiertniczych (rys. 5) (zgłoszenie patentowe P.423842). Badanie polegało na utworzeniu na rdzeniach piaskowca (rys. 3) osadu z płuczki wiertniczej.

Do wytworzenia osadu płuczkowego zastosowano płuczkę otworową z otworu P23, co umożliwiło uzyskanie osadu z przewierczanych formacji skalnych. Tworzenie osadu polegało na przetłoczeniu płuczki w symulowanej przestrzeni pierścieniowej i obmywaniu tą płuczką w czasie 1 godz. trzech rdzeni umieszczonych w urządzeniu. Wydatek tłoczenia płuczki został określony na podstawie prób wstępnych oraz obserwacji prowadzonych podczas testów przygotowujących próbki rdzeni do badań.

Następnie utworzony osad płuczkowy usuwano z powierzchni rdzeni poprzez tłoczenie cieczy przemywającej przy stałej wartości wydatku tłoczenia oraz stałym czasie kontaktu cieczy przemywającej z próbką skały. Parametry tłoczenia dobrano podczas badań wstępnych, w których przyjęto wydatek tłoczenia na poziomie 11,2 l/min, co pozwalało na utrzymanie turbulentnego reżimu przepływu o wartości liczby Reynoldsa około 3100. Czas kontaktu cieczy przemywającej z powierzchnią próbki ustalono na 5 min. Do prac badawczych użyto rdzeni piaskowca, które posiadały kształt walca o średnicy zewnętrznej 25 mm i długości 60 mm (rys. 6). Rdzenie umieszczono w specjalnie skonstruowanym statywie (rys. 7), usytuowanym w rurze z tworzywa PVC (rys. 8), w której odbywał się przepływ cieczy wiertniczych (płuczka, ciecz przemywająca). Układ taki symulował przestrzeń pierścieniową otworu wiertniczego.

Po przetłoczeniu cieczy przemywającej przez układ z obecnymi wewnątrz rury rdzeniami wyjęto je i umieszczono w formie, a następnie zalano zaczynem cementowym (rys. 9). Po określonym czasie hydratacji (48 godz.) wykonano badania przyczepności na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–rdzeń skalny (oczyszczony z wytworzonego wcześniej osadu). W celu zbadania przyczepności próbki zostały umieszczone między dwiema płytami maszyny wytrzymałościowej (rys. 10) i poddane pomiarowi siły zerwania przyczepności na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–skała pod wpływem obciążenia przyłożonego na próbkę.



Rys. 5. Symulator przepływu cieczy wiertniczych
Fig. 5. Drilling fluid flow simulator



Rys. 6. Rdzeń wycięty z próbki piaskowca

Fig. 6. A core cut from a sandstone sample



Rys. 7. Rdzenie piaskowca zamocowane w statywie

Fig. 7. Sandstone cores fixed in a tripod



Rys. 8. Widok rury z tworzywa wraz uszczelnieniami, w których umocowano dopływ i odpływ cieczy wiertniczej

Fig. 8. View of a plastic pipe with seals, in which the inflow and outflow of drilling fluid are fixed



Rys. 9. Próbkę przygotowaną do badań przyczepności na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–skała

Fig. 9. A sample prepared for adhesion tests on the hardened cement slurry–rock contact



Rys. 10. Maszyna wytrzymałościowa

Fig. 10. A compressive strength testing machine

Przyczepność (MPa) na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–rdzeń skalny została obliczona według wzoru (6):

$$\sigma_p = \frac{P}{S} \cdot 10^{-3} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

$$s = \pi \cdot d \cdot h \quad (7)$$

gdzie:

$\bar{\sigma}_p$ – przyczepność na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–rdzeń skalny [MPa],

P – siła nacisku powodująca zerwanie połączenia na kontakcie stwardniałego zaczynu cementowego ze skałą [kN],

s – powierzchnia styku próbki skały z zaczynem cementowym [m²],

d – średnica rdzenia [m],

h – wysokość zacementowanej części rdzenia [m].

Siła nacisku (P) została odczytana ze wskaźnika maszyny wytrzymałościowej, a powierzchnia styku skały ze stwardniałym zaczynem cementowym była równa wartości pola powierzchni zewnętrznej rdzenia użytego do badań oraz wysokości zaczynu cementowego w formie.

Do celów porównawczych utworzono punkt kontrolny, który odpowiadał przyczepności na kontakcie stwardniały zaczyn–formacja skalna bez osadu (brak osadu = przyczepność 2,37 MPa = 100% usunięcia osadu). Skuteczność usuwania osadu płuczkowego określano proporcjonalnie do wartości punktu odniesienia według zależności (8):

$$S_u = \frac{x_1 \cdot 100\%}{x_2} \quad (8)$$

gdzie:

S_u – skuteczność usuwania osadu płuczkowego [%],

x_1 – średnia przyczepność na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–formacja skalna [MPa],

x_2 – wartość bazowa (2,37 MPa) na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–formacja skalna [MPa].

Uzyskane wyniki badań skuteczności usuwania osadu płuczkowego przez wybrane ciecze przemylające zestawiono w tabelach 1 i 2.

Analizując uzyskane wyniki badań usuwania osadu z powierzchni rotora, otrzymano procentową skuteczność usuwania osadu (wymycia) w zakresie od 45,2% – przy zastosowaniu cieczy przemylającej o zawartości 10% środka SL327 do 72,9% – przy użyciu cieczy przemylającej o koncentracji 1%

Tabela 1. Wyniki badań skuteczności usuwania osadu z powierzchni rotora

Table 1. The results of the tests on the effectiveness of the removal of mud cake from the rotor surface

Rodzaj środka	Koncentracja cieczy przemylającej	Masa rotora przed testem m_0		Masa rotora po płuczce m_1		Masa rotora po cieczy przemylającej m_2		Procent wymycia		Procent wymycia (usunięcia osadu) wartość średnia
	[%]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]
Próbka bazowa	–	72,18	72,21	72,18	72,21	72,18	72,21	100	100	wartość bazowa 100%
SL327	0,1	72,15	72,15	74,13	74,17	72,69	72,74	72,73	70,79	71,76
	1,0	72,15	72,16	74,18	74,22	72,67	72,75	74,38	71,36	72,87
	5,0	72,06	72,14	74,48	74,52	73,01	72,99	60,74	64,29	62,51
	10,0	72,23	72,2	74,56	74,62	73,52	73,51	44,64	45,87	45,25
RR26	0,1	72,18	72,22	74,44	74,34	73,15	73,00	57,08	63,21	60,14
	1,0	72,28	72,36	74,35	74,48	72,85	72,86	72,46	76,42	74,44
	5,0	72,24	72,32	74,36	74,55	72,85	72,91	71,23	73,54	72,38
	10,0	72,29	72,32	74,56	74,32	73,19	72,93	60,35	69,50	64,93

Tabela 2. Wyniki badań przyczepności oraz skuteczności usuwania osadu z powierzchni rdzenia

Table 2. The results of the tests of adhesion and effectiveness of the removal of mud cake from the core surface

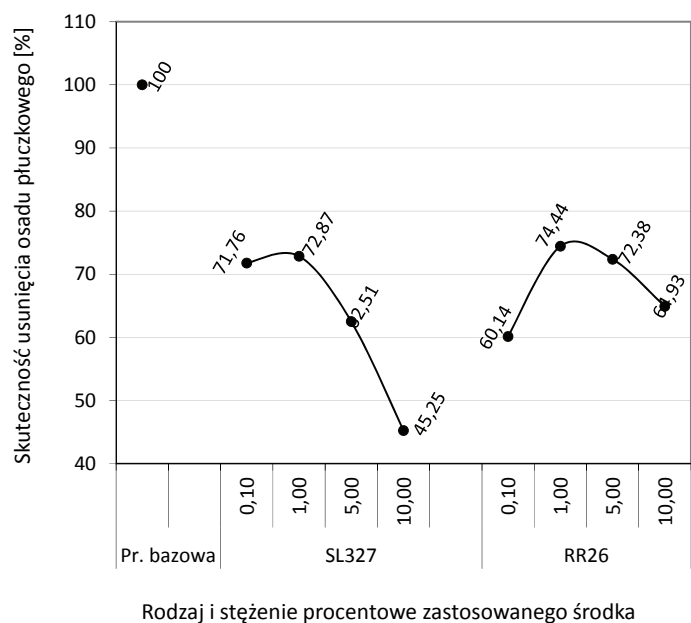
Rodzaj środka	Koncentracja cieczy przemywającej	Siła zerwania przyczepności		Przyczepność na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–skała		Średnia przyczepność na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy–skała	Procentowa skuteczność usuwania osadu z powierzchni rdzeni w stosunku do wartości przyczepności bazowej
	[%]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
Próbka bazowa	–	8,2	8,2	2,37	2,37	wartość bazowa 2,37 MPa	100
SL327	0,1	3,0	3,2	0,87	0,92	0,90	37,80
	1,0	3,3	3,1	0,95	0,90	0,92	39,02
	5,0	2,3	2,4	0,66	0,69	0,68	28,66
	10,0	0,9	0,9	0,26	0,26	0,26	10,98
RR26	0,1	2,5	2,7	0,72	0,78	0,75	31,71
	1,0	3,8	4,0	1,10	1,16	1,13	47,56
	5,0	3,6	3,8	1,04	1,10	1,07	45,12
	10,0	3,0	3,0	0,87	0,87	0,87	36,58

SL327 (tab. 1). Natomiast w przypadku wykorzystania cieczy przemywającej na osnowie środka RR26 uzyskano procentową skuteczność usuwania osadu w zakresie od 60,1% – przy użyciu 0,1-procentowego roztworu do wartości 74,4% – po przemywaniu cieczą o zawartości 1% środka RR26. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Podczas badań skuteczności usuwania osadu w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych – na podstawie wyżej opisanej metodyki uzyskano procentową skuteczność usuwania osadu z powierzchni rdzeni w stosunku do wartości przyczepności bazowej w zakresie od 11% – przy zastosowaniu 10-procentowego roztworu środka SL327 w cieczy przemywającej do 39% – po użyciu 1-procentowej koncentracji cieczy przemywającej na bazie środka SL327 (tab. 2). Podczas badań usuwania osadu przez ciecz RR26 otrzymano usunięcie osadu w zakresie od 31,7% – podczas tłoczenia 0,1-procentowego roztworu cieczy przemywającej do 47,6% – w przypadku cieczy zawierającej 1,0% środka RR26. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem koncentracji cieczy przemywającej w niskich przedziałach stężeń (0,1% do 1,0%) wzrasta skuteczność usuwania osadu. Natomiast po przekroczeniu pewnej granicy stężenia użytego środka (ok. 1%) skuteczność usuwania osadu obniża się, co obrazuje rysunek 11. Takie zachowanie cieczy przemywających może być spowodowane efektem krytycznego stężenia micelizacji użytego środka powierzchniowo czynnego, co objawia się powyższym efektem.

Porównując wyniki badań skuteczności usuwania osadu płuczkowego przy użyciu symulatora przepływu cieczy wiertniczych uzyskano wartości wyższe o około 34 jednostki niż wyniki otrzymane podczas badań za pomocą wiskozymetru obrotowego dla cieczy przemywającej na bazie środka SL327 (rys. 12).



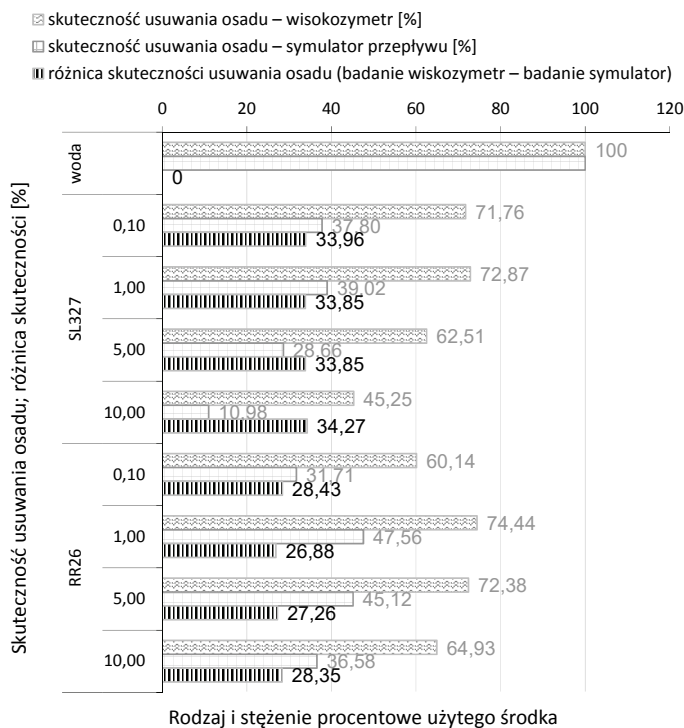
Rys. 11. Skuteczność usuwania osadu płuczkowego przez ciecz przemywającą o określonej koncentracji zastosowanego środka

Fig. 11. The effectiveness of the mud cake removal by the washing liquid with a specific concentration of the given agent

W przypadku użycia cieczy przemywającej RR26 różnica wyników zawiera się w zakresie od 26 do 29 jednostek, przy czym wartości uzyskane podczas badań w symulatorze przepływu są wyższe (rys. 12). Otrzymane różnice w skuteczności usuwania osadu przy zastosowaniu różnych metod badawczych mogą być spowodowane współczynnikiem chropowatości powierzchni oraz infiltracją cieczy z płuczki w strukturę, na której wytwarzano osad. Powierzchnia rotora wiskozymetru obrotowego posiada współczynnik chropowatości wynoszący $Rz = 5,3 [-]$ (rys. 14) Jednak rotor został poddany modyfikacji

poprzez nałożenie siatki o wymiarach oczek $0,05 \times 0,05$ mm oraz grubości drutu $0,035$ mm (rys. 13). Taki zabieg pozwalał na uzyskanie współczynnika chropowatości $Rz = 34$ [-] (rys. 15). Natomiast współczynnik chropowatości próbki piaskowca wynosił 25 [-] (rys. 16), jednak ze względu na współczynnik przepuszczalności wynoszący $0,64$ mD oraz porowatość równą 48% część filtratu z płuczki wiertniczej uległa infiltracji w głąb struktury piaskowca, przez co osad na powierzchni rdzenia skalnego był mocniej odwodniony i bardziej skonsolidowany. Powyższe spowodowało, że skuteczność usuwania osadu z powierzchni rdzenia charakteryzowała się niższymi wartościami.

W celu dokładnego porównania wyników metod pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczki przeprowadzono analizę korelacyjną, w której na podstawie współczynnika korelacji Pearsona określono stopień zbieżności uzyskanych wyników badań. Współczynnik korelacji Pearsona obliczono na podstawie wzoru (9), następnie według wzoru (10) wyznaczono kowariancję, która określa zależność liniową między analizowanymi zmiennymi x i y , oraz estymator największej wiarygodności Sd_x , Sd_y , dający najmniejsze wartości odchyleń (wzory (11), (12)). W końcowym etapie obliczano wskaźnik determinacji liniowej (13), informujący o procencie wyjaśnionej liniowo zmienności zmiennej zależnej przez zmienną niezależną. Interpretacje siły związków korelacyjnych przedstawiono na rysunku 17.

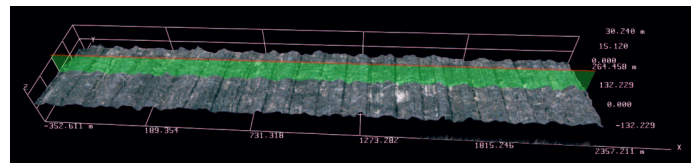


Rys. 12. Wyniki badań skuteczności usuwania osadu przy użyciu różnych metod badawczych oraz różnica pomiędzy uzyskanymi wynikami

Fig. 12. The results of the mud cake removal efficiency tests using different test methods and the difference between the results

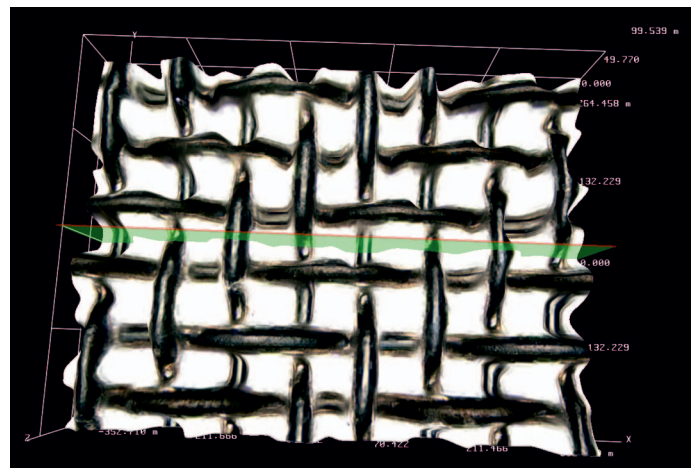


Rys. 13. Widok rotora zmodyfikowanego przy użyciu siatki stalowej
Fig. 13. View of the rotor modified with a steel mesh



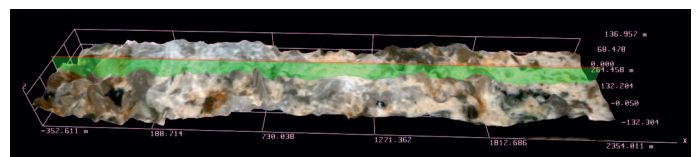
Rys. 14. Chropowatość rotora $Rz = 5,3$

Fig. 14. Rotor roughness $Rz = 5.3$



Rys. 15. Chropowatość siatki stalowej $Rz = 34$

Fig. 15. Steel mesh roughness $Rz = 34$



Rys. 16. Chropowatość rdzenia piaskowca $Rz = 25$

Fig. 16. Sandstone core roughness $Rz = 25$

$$r_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{Sd_x \cdot Sd_y} \quad (9)$$

gdzie:

x – wartości skuteczności usuwania osadu płuczki przy użyciu wiskozymetru obrotowego [%],

y – wartości efektywności usuwania osadu płuczki z powierzchni rdzenia w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych [%],

Sd_x, Sd_y – estymatory największej wiarygodności,
 n – liczba prób,

$$\text{cov}(x, y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (10)$$

$$Sd_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11)$$

$$Sd_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (12)$$

$$WD = r_{x,y}^2 \cdot 100\% \quad (13)$$

• wartości średnie:

$$\bar{x} = 63,1$$

$$\bar{y} = 29,1$$

• po podstawieniu do wzorów:

$$\text{cov}(x, y) = \frac{495,692}{4} = 123,99$$

$$Sd_x = \sqrt{\frac{489,419}{4}} = 11,06$$

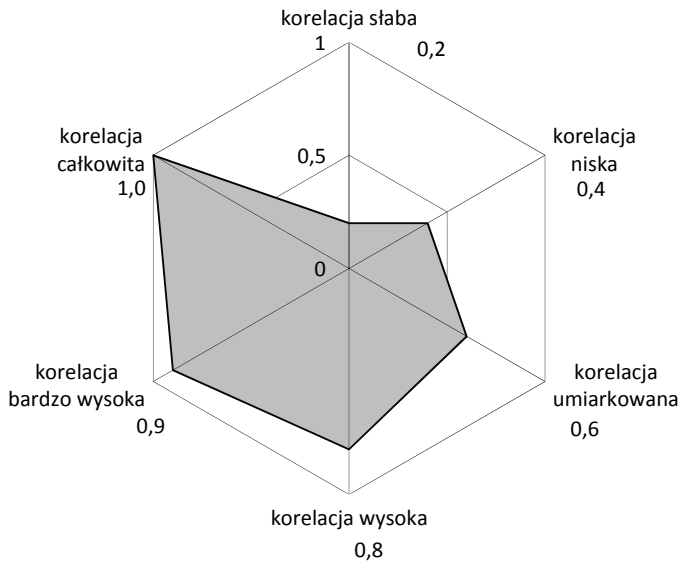
$$Sd_y = \sqrt{\frac{502,624}{4}} = 11,21$$

$$r_{x,y} = \frac{123,99}{11,06 \cdot 11,21} = 0,999969$$

$$r = 0,99 \in (0,9; 1,0)$$

$$WD = (0,999969)^2 \cdot 100\%$$

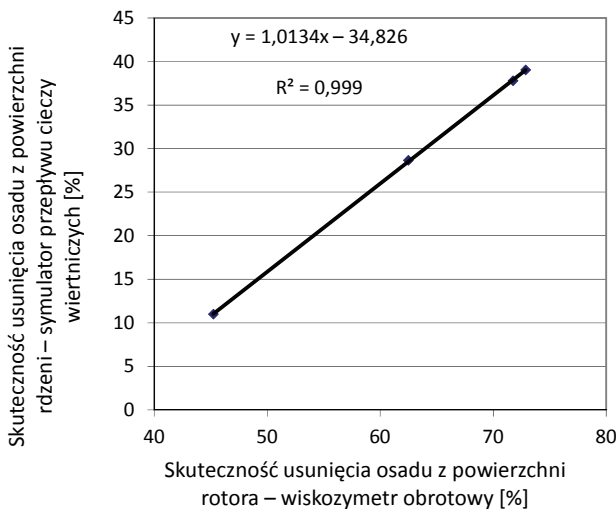
$$WD = 99,99\%$$



Rys. 17. Współczynniki korelacji Pearsona

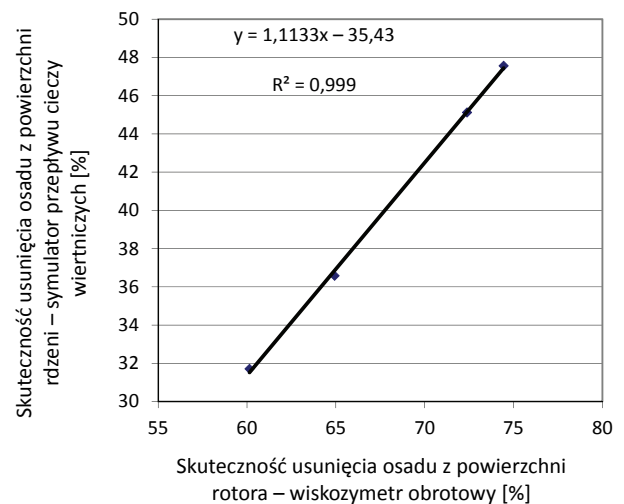
Fig. 17. Pearson's correlation coefficients

Na podstawie przeprowadzonej analizy korelacyjnej uzyskanych wyników badań skuteczności usuwania osadu podczas



Rys. 18. Zależność przebiegu skuteczności usuwania osadu w badaniu przy użyciu wiskozymetru i skuteczności usuwania osadu w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych. Testy dla cieczy przemywającej na bazie środka SL327 (korelacja całkowita)

Fig. 18. The dependency of the course of efficiency for removing the mud cake in the test using a viscometer and the mud cake removal rate in the drilling fluid flow simulator. Tests for a washing liquid based on SL327 (total correlation)



Rys. 19. Zależność przebiegu skuteczności usuwania osadu w badaniu przy użyciu wiskozymetru i skuteczności usuwania osadu w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych. Testy dla cieczy przemywającej na bazie środka RR26 (korelacja całkowita)

Fig. 19. The dependency of the course of efficiency for removing the mud cake in the test using a viscometer and the mud cake removal efficiency in the drilling fluid flow simulator. Tests for a washing liquid based on RR26 (total correlation)

Tabela 3. Dane obliczeniowe z korelacji skuteczności usuwania osadu (badanie przy użyciu wiskozymetru oraz przy użyciu symulatora przepływu cieczy wiertniczych). Testy dla cieczy przemywającej na bazie środka SL327

Table 3. Calculation data from the correlation of the mud cake removal efficiency (test using a viscometer and a drilling fluid flow simulator) Tests for a washing liquid based on SL327

n	x_i	y_i	$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	71,76	37,80	8,7	8,7	75,23	75,04	75,43
2	72,87	39,02	9,8	9,9	96,80	95,50	98,11
3	62,51	28,66	-0,6	-0,5	0,27	0,35	0,21
4	45,25	10,98	-17,8	-18,1	323,66	318,53	328,88
	$\Sigma = 252,39$	$\Sigma = 116,46$			$\Sigma = 495,962$	$\Sigma = 489,419$	$\Sigma = 502,624$

x_i – procent wymycia (usunięcia osadu), wartość średnia [%]

y_i – procentowa skuteczność usuwania osadu z powierzchni rdzeni w stosunku do wartości przyczepności bazowej [%]

pomiaru przy użyciu wiskozymetru do skuteczności usuwania osadu w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych stwierdzono mocne dopasowanie analizowanych wyników. Otrzymano wartość liniowej regresji R^2 w zakresie korelacji całkowitej ($R^2 = 0,9999$) dla obydwu badanych cieczy przemywających (rys. 18, 19). Wykonana analiza korelacyjna potwierdziła niemal identyczny przebieg usuwania osadu przez ciecz przemywającą podczas badania za pomocą wiskozymetru i w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych. Uzyskane na podstawie wyników badań potwierdzenie zależności analizowanych cech pozwala stwierdzić, że niezależnie od stosowanej metody efektywność usuwania osadu jest porównywalna. Należy jednakże mieć na uwadze mikrostrukturę rdzenia skalnego, który – jak już wspomniano – cechuje się określoną porowatością i przepuszczalnością, przez co efektywność usuwania osadu będzie niższa niż w przypadku badania za pomocą wiskozymetru obrotowego. Na podstawie tego można stwierdzić, że bardziej reprezentatywną metodą pomiaru efektywności usuwania osadu lub skuteczności działania danej cieczy przemywającej jest pomiar w symulatorze przepływu

cieczy wiertniczych. Natomiast badanie za pomocą wiskozymetru obrotowego pozwala na stosunkowo szybkie określenie porównawcze działania danej cieczy w stosunku do innej lub określenie skuteczności usuwania osadu z powierzchni rur okładzinowych.

Dodatkowo w celu porównania wyników metod pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczkowego przeprowadzono matematyczną analizę statystyczną odchylenia standardowego populacji oraz podano przedziały ufności. Obliczenia statystyczne (tab. 3 i 4) wykonane zostały na podstawie uzyskanych wyników pomiarowych z tabel 1 i 2. Celem analizy było wyznaczenie średnich wartości wytrzymałości procentowego wymycia (tab. 3) oraz średniej przyczepności na kontakcie stwardniałego zaczynu z formacją skalną dla poszczególnych próbek. Określono przedział ufności (przyjęto współczynnik ufności: $1 - \alpha = 0,95$). Dla analizowanych próbek zestawiono wartości procentowego wymycia (tab. 3) oraz przyczepności stwardniałego zaczynu do skały dla dwóch próbek (tab. 4). Następnie na ich podstawie obliczono średnią arytmetyczną.

Tabela 4. Obliczenia statystyczne dla uzyskanych wyników badań skuteczności usuwania osadu badanych przy użyciu wiskozymetru obrotowego

Table 4. Statistical calculations for the obtained results of the research on the effectiveness of mud cake removal, tested using a rotary viscometer

Rodzaj środka	Koncentracja cieczy przemywającej [%]	Procentowa wartość usunięcia osadu (wymycia) [%]		Średnia arytmetyczna W_s [MPa]	Odchylenie standardowe z próby	Poziom ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)	Przedział ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)
		próba 1	próba 2				
SL327	0,1	72,73	70,79	71,76	0,9700	2,9514	68,8086–74,7114
	1,0	74,38	71,36	72,87	1,5100	4,5944	68,2756–77,4644
	5,0	60,74	64,29	62,52	1,7750	5,4007	57,1143–67,9157
	10,0	44,64	45,87	45,26	0,6150	1,8712	43,3838–47,1262
RR26	0,1	57,08	63,21	60,15	3,0650	9,3257	50,8193–69,4707
	1,0	72,46	76,42	74,44	1,9800	6,0244	68,4156–80,4644
	5,0	71,23	73,54	72,39	1,1550	3,5142	68,8708–75,8992
	10,0	60,35	69,50	64,93	4,5750	13,9201	51,0049–78,8451

Tabela 5. Obliczenia statystyczne dla uzyskanych wyników badań przyczepności stwardniałego zaczynu cementowego do próbek skały po przemyciu. Próbkę deponowano 48 godzin w warunkach otworopodobnych

Table 5. Statistical calculations for the obtained results of tests on the adhesion of the hardened cement slurry to the rock samples after washing. The samples were deposited for 48 hours

Rodzaj środka	Koncentracja cieczy przemywającej [%]	Przyczepność na kontakcie stwardniały zaczyn cementowy-skała [MPa]		Średnia arytmetyczna \bar{W}_s [MPa]	Odchylenie standardowe z próby	Poziom ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)	Przedział ufności (dla $1 - \alpha = 0,95$)
		próba 1	próba 2				
SL327	0,1	0,87	0,92	0,90	0,0250	0,0761	0,8189–0,9711
	1,0	0,95	0,90	0,93	0,0250	0,0761	0,8489–1,0011
	5,0	0,66	0,69	0,68	0,0150	0,0456	0,6294–0,7206
	10,0	0,26	0,26	0,26	0,0000	0,0000	0,2600–0,2600
RR26	0,1	0,72	0,78	0,75	0,0300	0,0913	0,6587–0,8413
	1,0	1,10	1,16	1,13	0,0300	0,0913	1,0387–1,2213
	5,0	1,04	1,10	1,07	0,0300	0,0913	0,9787–1,1613
	10,0	0,87	0,87	0,87	0,0000	0,0000	0,8700–0,8700

W kolejnych rubrykach tabel 3 i 4 zamieszczono obliczenia:

- odchylenia standardowego z próby:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (14)$$

- poziomu ufności*:

$$p_u = t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} \quad (15)$$

- przedziału ufności*:

$$p \left\{ \bar{x} - t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} < x < \bar{x} + t_\alpha \cdot \frac{\sigma(x)}{\sqrt{n-1}} \right\} = 1 - \alpha \quad (16)$$

* w obliczeniach przyjęto współczynnik ufności $1 - \alpha = 0,95$, gdzie:

n – liczebność próby,

x_i – wyniki próby,

\bar{x} – średnia arytmetyczna z próby,

t_α – wartość zmiennej t -Studenta odczytana z tablicy tego rozkładu dla $n - 1$ stopni swobody,

p – prawdopodobieństwo, że wynik jest równy $1 - \alpha$ w przedziale opisanym równaniem (3).

Analizując uzyskane wyniki analizy statystycznej, otrzymano odchylenie standardowe z próby w zakresie od 0,98 do 4,57 podczas badania skuteczności usuwania osadu przy użyciu wiskozymetru. Natomiast w badaniu skuteczności usuwania osadu na podstawie pomiaru przyczepności odchylenie standardowe z próby zawierało się w zakresie nieprzekraczającym 0,03. Powyższe pozwala stwierdzić, że rozrzut wyników wokół wartości średniej jest znacznie mniejszy w przypadku pomiaru przyczepności niż podczas pomiaru procentowej skuteczności usuwania osadu. Związane jest to z wielkością

danych, gdzie procentowe usunięcie osadu wyrażane jest w liczbach pierwszych, natomiast przyczepność określana w setnych częściach liczb dziesiętnych. Również poziom ufności dla $1 - \alpha = 0,95$ cechuje się większymi wartościami dla wartości procentowego usunięcia osadu niż w przypadku badania przyczepności na kontakcie stwardniałego zaczynu do formacji skalnej. Przekłada się to na przedział ufności, który ma znacznie węższy zakres w przypadku wyników badań przyczepności niż wyników procentowego usunięcia osadu. Na podstawie uzyskanych rezultatów potwierdza się teza, że znacznie lepszą i dokładniejszą metodą pomiaru jest badanie skuteczności usuwania osadu płuczkowego z powierzchni rdzeni w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych.

Wnioski

Na podstawie prac badawczych, których celem było porównanie wyników metod pomiaru skuteczności usuwania osadu płuczkowego za pomocą wiskozymetru obrotowego oraz w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych, sformułowane zostały następujące wnioski:

- Procentowa skuteczność usuwania osadu z powierzchni rotora zawiera się w zakresie od 45,25% do ponad 73% dla cieczy SL327 oraz od 60,14% do ponad 74% dla cieczy RR26.
- Procentowa skuteczność usuwania osadu z powierzchni rdzenia w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych zawiera się w zakresie od 11% do ponad 39% dla cieczy SL327 oraz od 32,71% do ponad 47% dla cieczy RR26.
- Różnice uzyskanych wyników badań zawierały się w zakresie ok. 34 jednostek dla cieczy przemywającej SL327

oraz ok. 29 jednostek dla cieczy RR26, przy czym w przypadku obu cieczy wyższe wartości usunięcia osadu otrzymywano podczas badania przy użyciu wiskozymetru obrotowego.

- Przeprowadzona analiza korelacyjna skuteczności usuwania osadu przy zastosowaniu różnych metod badawczych potwierdza bardzo mocne dopasowanie uzyskanych wyników badań. Wartość liniowej regresji w zakresie korelacji całkowitej dla obydwu badanych cieczy przemysłowych pozwala stwierdzić, że niezależnie od stosowanej metody efektywność usuwania osadu jest porównywalna.
- Niższa wartość skuteczności usuwania osadu w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych mogła być wynikiem użycia rdzenia skalnego jako próbki, na której wytwarzano osad. Rdzeń charakteryzował się wyższym współczynnikiem chropowatości, porowatości oraz filtracji niż stałowy rotor wiskozymetru obrotowego.
- Wraz ze wzrostem koncentracji cieczy przemysłowej w niskich przedziałach stężeń – od 0,1% do 1,0% – wzrasta skuteczność usuwania osadu, natomiast po przekroczeniu stężenia ok. 1% skuteczność usuwania osadu obniża się, co może potwierdzać przekroczenie wartości krytycznego stężenia micelizacji dla stosowanych cieczy przemysłowych.
- Testy skuteczności usuwania osadu za pomocą wiskozymetru obrotowego umożliwiają stosunkowo szybkie określenie porównawcze działania danej cieczy w stosunku do innej.
- Badania przy użyciu symulatora przepływu cieczy wiertniczych wydają się bardziej dokładne ze względu na możliwość wytworzenia warunków strukturalnych, w których faza ciekła z osadu płuczkowego mogła infiltrować w strukturę formacji skalnej (rdzenia), przez co osad na powierzchni rdzenia był bardziej skonsolidowany, trudniej usuwalny i miał bardziej reprezentatywny charakter.
- Na podstawie uzyskanych wyników analizy statystycznej (odchylenie standardowe z próby) stwierdzono, że rozrzut wyników wokół wartości średniej jest znacznie mniejszy w przypadku pomiaru przyczepności niż pomiaru procentowej skuteczności usuwania osadu, co jest związane z szeregiem wielkości uzyskanych danych.
- Analizując otrzymany zakres przedziału ufności, który był znacznie węższy w przypadku wyników badań przyczepności niż wyników procentowego usunięcia osadu, stwierdzono, że znacznie lepszą i dokładniejszą metodą pomiaru jest badanie skuteczności usuwania osadu płuczkowego z powierzchni rdzenia w symulatorze przepływu cieczy wiertniczych.

Artykuł powstał na podstawie pracy badawczej pt. *Analiza możliwości poprawy oczyszczenia przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego przed zabiegiem cementowania* – praca INiG – PIB

na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0058/KW/2017, nr archiwalny: DK-4100-0045/2017 oraz pracy badawczej pt. *Analiza możliwości poprawy parametrów technologicznych zaczynu cementowego za pomocą domieszki grafenu* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0024/KW/2020, nr archiwalny: DK-4100-0012/2020 oraz pracy badawczej pt. *Wpływ grafenu na poprawę parametrów mechanicznych płaszcza cementowego* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0096/KW/2020, nr archiwalny: DK-4100-0084/2020.

Literatura

- Błaż S., 2017. Nowe rodzaje cieczy przemysłowych osady z płuczki inwersyjnej przed zabiegiem cementowania otworów wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 5: 302–311. DOI: 10.18668/NG.2017.05.02.
- Habrata S., Raczkowski J., Zawada S., 1980. Technika i technologia cementowania w wiertnictwie. *Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa*.
- Herman Z., 1995a. Doskonalenie procesu cementowania rur okładzinowych w otworach wierconych przy użyciu płuczek: polimerowej z inhibitorem i polimerowej z inhibitorem kapsułującym w wybranych rejonach Karpat i przedgórz Karpat. Etap 01 – Opracowanie receptur zaczynów cementowych i technologii cementowania kolumn rur okładzinowych w wytypowanych rejonach wiercen w Karpatach Wschodnich. *Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Herman Z., 1995b. Doskonalenie procesu cementowania rur okładzinowych w otworach wierconych przy użyciu płuczek: polimerowej z inhibitorem i polimerowej z inhibitorem kapsułującym w wybranych rejonach przedgórz Karpat. Etap 02 – Opracowanie receptur zaczynów cementowych i technologii cementowania dla wybranych rejonów skał zbiornikowych przedgórz Karpat. *Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Jasiński B., 2016. Ocena wpływu cieczy przemysłowej na jakość zacementowania rur w otworze wiertniczym po użyciu płuczki glikolowo-potasowej. *Nafta-Gaz*, 6: 413–421. DOI: 10.18668/NG.2016.06.04.
- Kędziński M., Rzepka M., Kremieniewski M., 2019. Wpływ temperatury na skuteczność działania cieczy przemysłowych stosowanej w zabiegu cementowania otworu wiertniczego. *Nafta-Gaz*, 4: 205–213. DOI: 10.18668/NG.2019.04.02.
- Kremieniewski M., 2018. Ocena skuteczności oczyszczania kolumny rur okładzinowych przed cementowaniem na podstawie badań przy użyciu wiskozymetru obrotowego. *Nafta-Gaz*, 9: 59–66. DOI: 10.18668/NG.2018.09.06.
- Kremieniewski M., 2019. Korelacja skuteczności usuwania osadu za pomocą cieczy na osnowie jonowych (anionowych) i niejonowych SPCz. *Nafta-Gaz*, 3: 167–177. DOI: 10.18668/NG.2019.03.05.
- Kremieniewski M., 2020a. Recipe of Lightweight Slurry with High Early Strength of the Resultant Cement Sheath. *Energies*, 1583: 1–13. DOI: 10.3390/en13071583.
- Kremieniewski M., 2020b. Ultra-Lightweight Cement Slurry to Seal Wellbore of Poor Wellbore Stability. *Energies*, 3124: 1–18. DOI: 10.3390/en13123124.
- Kremieniewski M., 2020c. Zmiana wczesnej wytrzymałości na ścislenie pod wpływem wybranych środków poprawiających stabilność sedimentacyjną. *Nafta-Gaz*, 7: 466–473. DOI: 10.18668/NG.2020.07.05.
- Kremieniewski M., Kędziński M., 2019. Badanie frakcjonowania lekkich materiałów obniżających gęstość jako wstępnego parametru podczas projektowania receptury zaczynu lekkiego. *Nafta-Gaz*, 12: 759–766. DOI: 10.18668/NG.2019.12.04.

- Kremieniewski M., Kędziński M., 2020. Badania nad opracowaniem hybrydowej cieczy buforowej. *Nafta-Gaz*, 8: 517–526. DOI: 10.18668/NG.2020.08.04.
- Kremieniewski M., Rzepka M., 2016. Przyczyny i skutki przepływu gazu w zacementowanej przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego oraz metody zapobiegania temu zjawisku. *Nafta-Gaz*, 9: 722–728. DOI: 10.18668/NG.2016.09.06.
- Kremieniewski M., Stryczek S., 2019. Zastosowanie cementu wysokoglinowego do sporządzania zaczynów uszczelniających w technologiach wiertniczych. *Cement Wapno Beton*, 3: 215–226.
- Nelson E.B. (ed.), 1990. Well Cementing. *Schlumberger Educational Service, Houston, Texas, USA*.
- Stryczek S. (ed.), 2016. Studia nad doбором zaczynów uszczelniających w warunkach wiercenia w basenie pomorskim. *Wydawnictwo AGH, Kraków*.
- Stryczek S., Gonet A., 2005. Kierunki ograniczania migracji gazu z przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego. *WUG: Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 3: 10–13.
- Uliasz M., Chudoba J., Herman Z., 2006. Płuczki wiertnicze z inhibitorami polimerowymi i ich oddziaływanie na przewiercane skały. *Prace INiG*, 139: 1-76.
- Uliasz M., Kremieniewski M. (kier. zespołu), 2012. Kompleksowa analiza przyczyn migracji gazu w otworach realizowanych na przedgórzu Karpat i w Karpatach pod kątem właściwości cieczy wiertniczych stosowanych w czasie wiercenia i cementowania kolumn rur okładzinowych (etap I). *Praca INiG, nr zlecenia: 0529/KW/2011, nr archiwalny: DK-4100-0086/2011, Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Uliasz M., Zima G., Błaż S., Jasiński B., 2012. Systemy płuczek wiertniczych do wiercenia otworów w formacjach łupkowych. [W:] *Rzeczpospolita łupkowa: studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*, 183: 225–241.
- Uliasz M., Zima G., Błaż S., Jasiński B., 2015. Ocena wpływu cieczy wiertniczych w aspekcie zapobiegania migracji gazu w otworach na przedgórzu Karpat. *Nafta-Gaz*, 1: 11–17.
- Zima G., 2014. Wpływ właściwości płuczek wiertniczych na jakość cementowania w gazonośnych poziomach miocenu. *Nafta-Gaz*, 12, 899–907.

Akty prawne i dokumenty normatywne

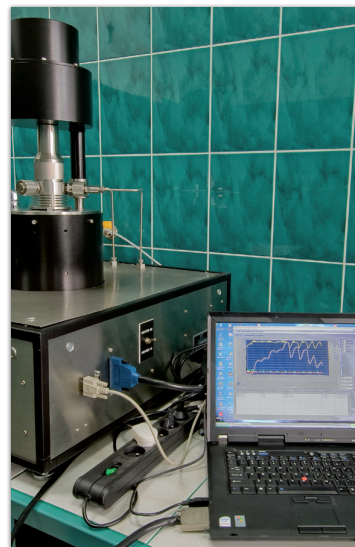
- PN-85/G-02320 Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych.
- PN-EN 10426-2 Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych oraz API SPEC 10 Specification for materials and testing for well cements.



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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU TECHNOLOGII WIERCENIA

- opracowywanie składów i technologii sporządzania wodnodispersyjnych i olejowodispersyjnych płuczek wiertniczych, cieczy specjalnych (roboczych, nadpakerowych, buforowych, przemywających) i zaczynów cementowych do wiercenia otworów i rekonstrukcji odwiertów w warunkach normalnej i wysokiej temperatury oraz występowania różnych ciśnień złożowych i skażeń chemicznych;
- dobór właściwości płuczek wiertniczych, zaczynów cementowych, cieczy buforowych oraz opracowanie metod usuwania osadów filtracyjnych w celu poprawy skuteczności cementowania otworów wiertniczych;
- badania serwisowe płuczek wiertniczych podczas wiercenia otworu oraz zaczynów cementowych w trakcie zabiegu cementowania;
- specjalistyczne badania laboratoryjne dotyczące oznaczania: wpływu cieczy wiertniczych na przewiercane skały, napięcia powierzchniowego na granicy faz, współczynnika tarcia w warunkach HPHT, sedymentacji materiału obciążającego, wynoszenia zwiercin w otworach kierunkowych i poziomych, doboru materiałów uszczelniających do zapobiegania ucieczkom płuczki wiertniczej i zaczynu cementowego w warstwy szczelinowate, odporności na migrację gazu w wiążącym zaczynie cementowym w warunkach otworopodobnych, odporności korozyjnej kamienia cementowego, związków chemicznych w cieczach wiertniczych i ich toksyczności przy użyciu bakterii jako bioindykatorów;
- zagospodarowywanie zużytych płuczek wiertniczych i urobku.



Kierownik: dr inż. Małgorzata Uliasz Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5219 Faks: 13 436 79 71 E-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl

 INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy