

Ciecz robocza na osnowie wody morskiej

Completion fluid based on seawater

Grzegorz Zima, Piotr Kasza, Bartłomiej Jasiński, Sławomir Błaż, Małgorzata Uliasz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Wykonywanie prac rekonstrukcyjnych na odwiertach związane jest z zastosowaniem specjalnych cieczy roboczych. Do ich sporządzenia mogą być używane roztwory wodne jednej lub kilku soli i solanki złożowe z dodatkiem środków chemicznych. Zastosowanie roztworów soli wiąże się z dodatkowymi kosztami sporządzenia cieczy roboczych. Ciecz robocza zatłaczana do odwiertu powinna charakteryzować się takimi właściwościami, aby w kontakcie ze skałą zbiornikową nie wpływała negatywnie na jej przepuszczalność. Natomiast dotychczasowe doświadczenia przemysłowe i badania laboratoryjne wykazały, że wykorzystanie do sporządzenia cieczy solanek złożowych często negatywnie wpływa na właściwości zbiornikowe skał ze względu na obecność w nich jonów, które powodują wytrącanie trudno rozpuszczalnych związków. Zatłaczanie do odwiertu solanek zawierających zanieczyszczenia mechaniczne, których źródłem mogą być woda, sól, cząstki ilaste, krzemionka, a także niedokładnie wyczyszczone systemy urządzeń do ich sporządzenia i zatłaczania, wiąże się z ryzykiem kolmatowania przestrzeni porowej skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej. Wykorzystanie do przygotowania cieczy roboczych wody morskiej przyczyni się do ograniczenia kosztów zabiegów rekonstrukcji. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad opracowaniem składów cieczy roboczych sporządzonych na osnowie wody morskiej pobranej z Bałtyku. W pierwszym etapie dokonano doboru środków chemicznych do sporządzenia cieczy roboczych na osnowie wody morskiej zapewniających uzyskanie stabilnych parametrów reologicznych i filtracji w warunkach otworopodobnych oraz odpowiedniego poziomu inhibicji hydratacji skał. Przy wyborze kierowano się kompatybilnością zastosowanych środków z wodą morską, gdyż nie powinny one powodować pogorszenia właściwości skał zbiornikowych. Wykonano również badania kompatybilności opracowanych cieczy z solanką złożową pobraną z odwiertu na szelfie Morza Bałtyckiego. Zapewnienie właściwego poziomu inhibicji przy minimalnej gęstości wymagało precyzyjnego doboru odpowiednich środków chemicznych, które umożliwiły dodatkowo uzyskanie odpowiednich parametrów reologicznych i filtracji. Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano skład cieczy roboczej na osnowie wody morskiej do zastosowania podczas rekonstrukcji odwiertów.

Słowa kluczowe: ciecz robocza, woda morska, środki skrobiowe.

ABSTRACT: Performing reconstruction work on wells involves the use of special completion fluids. They can be prepared using aqueous solutions of one or more salts and formation brine with the addition of chemicals. The use of salt solutions involves additional costs of preparing working fluids. The working fluid injected into the well should have properties that, upon contact with reservoir rock, do not adversely affect its permeability. However, previous industrial experience and laboratory tests have shown that the use of formation brines to prepare completion fluids often negatively affects the reservoir properties of rocks due to the presence of ions in them, which cause the precipitation of insoluble compounds. Injecting brines containing mechanical impurities into the well, the source of which may be water, salt, clay particles, silica, as well as imprecisely cleaned systems of equipment for their preparation and injection, is associated with the risk of clogging the pore space of reservoir rocks in the near-wellbore zone. The use of seawater to prepare completion fluids will help reduce the costs of workover operations. The article presents the results of laboratory research on the development of compositions of workover fluids prepared on the basis of seawater taken from the Baltic Sea. In the first stage, chemicals were selected for the preparation of seawater-based working fluids, ensuring stable rheological and filtration parameters in borehole conditions and an appropriate level of rock hydration inhibition. The selection was guided by the compatibility of the agents used with seawater, which should not damage the properties of reservoir rocks. Compatibility tests of the developed fluids with formation brine collected from a well on the Baltic Sea shelf were also carried out. Ensuring the appropriate level of inhibition at a minimum density required the precise selection of chemicals, which additionally enabled obtaining appropriate rheological and filtration parameters. Based on the conducted research, the composition of the working fluid based on seawater was proposed for use during workover operations.

Key words: completion fluid, sea water, starch agents.

Autor do korespondencji: G. Zima, e-mail: grzegorz.zima@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 15.01.2024 r. Zatwierdzono do druku: 28.03.2024 r.

Wstęp

Wykonywanie prac rekonstrukcyjnych w odwiertach związane jest z zastosowaniem specjalnych cieczy roboczych. Do ich sporządzania mogą być używane roztwory wodne jednej lub kilku soli i solanki złożowe z dodatkiem środków chemicznych. Zastosowanie roztworów soli wiąże się z dodatkowymi kosztami przygotowania cieczy roboczych. Ciecz robocza zatłaczana do odwiertu powinna charakteryzować się takimi właściwościami, aby w kontakcie ze skałą zbiornikową nie wpływała negatywnie na jej przepuszczalność. Natomiast dotychczasowe doświadczenia przemysłowe i badania laboratoryjne wykazały, że wykorzystanie do sporządzania cieczy solanek złożowych często negatywnie oddziałuje na właściwości zbiornikowe skał ze względu na obecność w nich jonów, które powodują wytrącanie trudno rozpuszczalnych związków. Użycie do tego celu wody morskiej przyczyni się do ograniczenia kosztów zabiegów rekonstrukcji. W związku z tym opracowanie składu cieczy roboczej wymagało zastosowania polimerów kompatybilnych z wodą morską, które nie powodowały pogorszenia właściwości skał zbiornikowych. Dokonano doboru środków chemicznych do sporządzania cieczy roboczych na podstawie wody morskiej, zapewniających uzyskanie stabilnych parametrów reologicznych i filtracji w warunkach otworopodobnych oraz odpowiedniego poziomu inhibicji hydratacji skał. Wykonano również badania kompatybilności opracowanych cieczy z solankami złożowymi. Zapewnienie właściwego poziomu inhibicji przy minimalnej gęstości wymagało precyzyjnego doboru odpowiednich środków chemicznych, które umożliwiły dodatkowo uzyskanie odpowiednich parametrów reologicznych i filtracji. Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano skład cieczy roboczej na podstawie wody morskiej do zastosowania podczas rekonstrukcji odwiertów. Uzyskane wyniki pozwolą na wykorzystanie wody morskiej do sporządzania cieczy roboczych podczas prac rekonstrukcyjnych.

Rodzaje cieczy roboczych

Stosowane w warunkach przemysłowych cieczy robocze przygotowywane są na podstawie solanki i mogą to być:

- solanki bez fazy stałej, czyli
 - roztwory soli sporządzane, w zależności od wymaganej gęstości, z pojedynczych soli nieorganicznych (NaCl, KCl, CaCl₂) lub organicznych (HCOOK, HCOONa, HCOOCs, CH₃COOK) oraz mieszanek kilku różnych soli, a w razie potrzeby dodatkowo obrobione właściwą zasadą dla podwyższenia pH, inhibitorem korozji oraz SPCz,

- solanki (wody) złożowe po usunięciu z nich zanieczyszczeń mechanicznych i chemicznych poddane modyfikacji celem podwyższenia pH i bardzo często gęstości poprzez dodatek soli uwzględniający inhibitor jonowy oraz poddane obróbce inhibitorem korozji i SPCz;
- solanki zawierające fazę stałą, czyli roztwory soli lub wody złożowe obrobione polimerami odpornymi na zasolenie, regulującymi ich parametry reologiczne i filtrację z dodatkiem blokatora, inhibitora korozji lub SPCz.

Przy doborze rodzaju i składu solanki do sporządzania cieczy roboczych należy uwzględnić takie czynniki jak: wymagana gęstość, temperatura w otworze, rodzaj skał tworzących ścianę odwiertu, występowanie gazów kwaśnych, temperatura otoczenia na powierzchni, ze względu na krystalizację soli z roztworu, oraz koszty (Ali et al., 1999; Alvarez et al., 2019; Howard et al., 2019; Bridges, 2000; Bungert et al., 2000). Przed zatłoczeniem takiej solanki do odwiertu należy jednak przeprowadzić badania jej kompatybilności z wodą złożową z danego odwiertu celem sprawdzenia wytrącania się nierozpuszczalnych związków chemicznych. W przypadku potwierdzenia ryzyka powstawania osadów z wytrąconych związków chemicznych korzystniej jest zastosować sole organiczne, np. HCOONa oraz CH₃COOK lub HCOOK, które charakteryzują się kompatybilnością z wodami złożowymi zawierającymi m.in. HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻. Kolejnym rodzajem solanek bez fazy stałej są solanki (wody) złożowe, które przed zatłoczeniem do odwiertu wymagają licznych zabiegów przygotowawczych, obejmujących:

- usunięcie z solanki zanieczyszczeń mechanicznych przez filtrowanie;
- zmodyfikowanie składu chemicznego wody złożowej celem podwyższenia jej gęstości i tym samym właściwości inhibicyjnych oraz wartości pH;
- ponowne filtrowanie zmodyfikowanej solanki celem usunięcia zanieczyszczeń chemicznych dla uzyskania odpowiedniego stopnia jej czystości.

Przeprowadzenie tych zabiegów jest konieczne ze względu na zawartość w solankach złożowych różnych zanieczyszczeń oraz ich nieodpowiedni skład chemiczny, co pozwala tym samym ograniczyć intensywność zjawisk powodujących pogorszenie przepuszczalności skały zbiornikowej, takich jak pęcznienie, dyspergowanie czy kolmatowanie strefy przyodwiertowej. Stosowanie solanek bez fazy stałej pomimo zapewnienia im odpowiednich właściwości będzie powodowało infiltrowanie w złożę dużych ich objętości, powodując uszkodzenie przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej. Jeżeli takie objętości solanki przefiltrują przez niewielką powierzchnię ściany otworu w interwale złożowym, to nawet przy minimalnym jej zanieczyszczeniu nastąpi zakolmatowanie strefy przyodwiertowej (Herman i Uliasz, 2001, 2006; Herman et al., 2002; Berg et al., 2006; Badrul et al., 2009; Biały, 2016; Uliasz, 2020).

W roli środków obniżających filtrację i regulujących właściwości reologiczne cieczy roboczych preferowane są polimery organiczne, łatwiej ulegające rozkładowi biologicznemu, a także degradacji pod wpływem cieczy kwasującej. Należą do nich koloidy ochronne typu skrobiowego, biopolimer oraz żywica guarowa. W zależności od warunków geologiczno-złożowych i wymaganych właściwości reologicznych cieczy roboczych nie wyklucza się również stosowania wysokolepnych środków celulozowych. Bardzo ważną rolę w składzie cieczy roboczej spełniają także blokatory o różnych wymiarach, dobieranych w zależności od wymiarów porów w skale, którymi mogą być węglan wapnia lub zwymiarowany chlorek sodu. Zastosowanie w składzie cieczy roboczej układu polimer–blokator przyczyni się przede wszystkim do zapobiegania uszkodzeniu przepuszczalności poziomów produktywnych na skutek utworzenia w przypowierzchniowych porach skały zbiornikowej bariery, osnowy dla osadu filtracyjnego powstającego na ścianie odwiertu, ograniczającego migrację do skały ciekłej fazy cieczy roboczej. Wymagane jest, aby utworzony osad filtracyjny tylko okresowo blokował strefę przyodwiertową, na czas wykonywania zaplanowanych prac w odwiercie, a po ich zakończeniu powinien być łatwo usuwalny ze ściany otworu w strefie złożowej. Blokator pełni również rolę środka obciążającego, dlatego w składach cieczy o wymaganej niskiej gęstości należy uwzględnić taką ilość, która pozwoli na utworzenie osadu na ścianie odwiertu (Uliasz i Herman, 2003; Zima, 2009; Biały, 2016).

Właściwości i zadania cieczy roboczych

O wielkości uszkodzenia przepuszczalności poziomów produktywnych decyduje głównie rodzaj i właściwości, zarówno chemiczne, jak i fizyczne, zastosowanej cieczy roboczej. Zmniejszenie wielkości uszkodzenia przepuszczalności skał zbiornikowych można uzyskać, stosując odpowiedni skład cieczy roboczej, dobrany na podstawie wyników badań zmian przepuszczalności skał zbiornikowych poziomu produktywnego danego odwiertu oraz interakcji z wodą złożową. Wykonanie tych badań nie zawsze jest możliwe, głównie z powodu braku materiału rdzeniowego. Niemniej jednak dla spełnienia podstawowego kryterium, czyli ograniczenia niekorzystnego oddziaływania na skały zbiornikowe, po uwzględnieniu warunków geologiczno-złożowych ciecz robocza bezpośrednio kontaktująca się ze strefą przyodwiertową powinna przede wszystkim:

- charakteryzować się właściwym stopniem czystości;
- posiadać odpowiednią gęstość, właściwości reologiczne, filtrację i pH;
- charakteryzować się właściwościami inhibicyjnymi;

- zapobiegać korozji osprzętu;
- zmniejszać napięcie powierzchniowe na granicy rozdziału faz;
- zapobiegać interakcji z płynami złożowymi, a zwłaszcza z wodą złożową (Uliasz, 2008; Jasiński, 2012; Fleming et al., 2016; Howard et al., 2017).

Ważnym problemem mającym duży wpływ na wielkość uszkodzenia skały zbiornikowej jest czystość solanek. Zatlaczanie do odwiertu solanek zawierających zanieczyszczenia mechaniczne, których źródłem mogą być woda, sól, cząstki ilaste, krzemionka, a także niedokładnie wyczyszczone systemy urządzeń do ich sporządzania i zatłaczania, wiąże się z ryzykiem kolmatowania przestrzeni porowej skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej. Nawet niewielka zawartość tych zanieczyszczeń (powyżej 0,1 g/dm³ o wymiarach większych od 2 μm) w filtrujących do złoża znacznych ilościach solanki, w której składzie nie zastosowano środków ograniczających jej inwazję do przestrzeni porowej skały zbiornikowej, ma duże znaczenie przede wszystkim w warunkach, gdy skała charakteryzuje się średnią lub dużą przepuszczalnością. Niebezpieczne dla strefy przyodwiertowej są również zanieczyszczenia o charakterze chemicznym, występujące głównie w solankach złożowych, w postaci wytrącających się osadów różnych związków chemicznych.

Dla wytworzenia przeciwcisnienia na złożo wymagane jest, aby zatłoczona ciecz posiadała odpowiednią gęstość, która nie powinna być większa niż potrzebna do kontroli ciśnienia złożowego. W celu zapewnienia najmniejszego uszkodzenia przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej – prace w odwiercie należy prowadzić przy małych różnicach ciśnień, a ciśnienie hydrostatyczne wytworzone przez słup cieczy roboczej powinno mieścić się w zakresie około 0,1–0,2 MPa ponad wartość ciśnienia złożowego. Gęstość solanki, a przede wszystkim rodzaj soli użytych do jej sporządzania, wpływa na wielkość lepkości, która w temperaturze otoczenia dla czystych roztworów soli wynosi 1–12 cP i ulega obniżeniu wraz ze wzrostem temperatury. Ze względu jednak na funkcję, jaką ma spełniać zatłoczona do odwiertu solanka, np. wynoszenie wyplukiwanego zasypu, cząstek przewiercanych skał lub frezowanego osprzętu wglębnego, wymagane są wyższe jej parametry reologiczne, które reguluje się dodatkami zagęstnika (biopolimeru XCD) lub koloidów ochronnych. Obróbka solanki tymi środkami wpłynie równocześnie na podwyższenie właściwości reologicznych i ograniczenie infiltrowania w pory skały dużych jej objętości. Dalsze obniżenie filtracji można uzyskać, stosując blokatory węglanowe o wymiarach cząstek dobranych do wymiarów por w skale, jako tzw. składnik mostkujący dla cieczy (Herman i Uliasz, 2007; Uliasz, 2021).

Jednym z ważnych kryteriów doboru składu cieczy roboczych do danych warunków geologiczno-złożowych są jej

właściwości zapobiegające hydratacji minerałów ilastych. Większość piaskowcowych skał zbiornikowych zawiera pewną ilość minerałów ilastych, które w kontakcie z cieczami roboczymi sporządzonymi na osnowie wody ulegają hydratacji powierzchniowej i osmotycznej w stopniu zależnym od właściwości stosowanej cieczy i rodzaju minerału ilastego, powodując pogorszenie ich przepuszczalności. Całkowite wyeliminowanie hydratacji cząstek ilastych zawartych w skale zbiornikowej jest niemożliwe, lecz zakres hydratacji można znacznie ograniczyć przez obróbkę tych cieczy nieorganicznymi środkami chemicznymi, jak KCl lub NH_4Cl , pełniącymi rolę inhibitorów jonowych.

Przydatność HCOOK, HCOONa, HCOOCs w technologii cieczy wiertniczych i eksploatacyjnych stosowanych w różnych warunkach ciśnienia i temperatury wieloaspektowo przedstawiono w licznych artykułach (Rahman et al., 1995; Bungert et al. 2000; Reid i Santos, 2003; Uliasz et al., 2016). Wyniki podjętych badań oraz testów złożowych dowodziły, że posiadają one unikatowe połączenie właściwości fizykochemicznych, które można wykorzystać do opracowania cieczy o wysokiej gęstości zachowującej stabilną charakterystykę reologiczną w wysokich temperaturach, zapobiegającej uszkodzeniu przepuszczalności skał zbiornikowych i spełniającej wymogi ochrony środowiska. Uzyskanie powyższych właściwości przez ciecz zawierającą sole mrówczanowe możliwe jest dzięki dobrej ich rozpuszczalności w wodzie, która sprawia, że można otrzymywać ciężkie roztwory alkaliczne stanowiące osnowę do sporządzania płuczek do dowiercania lub cieczy roboczych o minimalnej zawartości fazy stałej w postaci blokatora dla ograniczenia jej migracji w porowate skały zbiornikowe. Przy pełnym zasoleniu ich gęstości wynoszą: HCOONa – $1,3 \text{ kg/dm}^3$, HCOOK – $1,56 \text{ kg/dm}^3$, HCOOCs – $2,3 \text{ kg/dm}^3$, dlatego sole te nazywane są często naturalnymi materiałami obciążającymi. Solanki mrówczanowe mogą być również przygotowywane jako mieszaniny tych soli. Sole mrówczanowe wykazują także kompatybilność z polimerami, która ułatwia sporządzanie tych cieczy oraz obróbkę podczas stosowania w warunkach złożowych, umożliwiając regulowanie właściwości reologiczno-strukturalnych i filtracji. Dzięki wysokiej rozpuszczalności najważniejsza jest jednak ich kompatybilność z wodami złożowymi, eliminująca tworzenie w kanałach porowych skał osadów związków chemicznych, jako jednego z czynników mających wpływ na pogarszanie przepuszczalności skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej.

Metodyka badań laboratoryjnych

Przeprowadzone badania laboratoryjne dotyczyły opracowania cieczy roboczych sporządzonych na osnowie wody morskiej

do obróbki odwiertów. Badania obejmowały dobór składu cieczy roboczych na osnowie wody morskiej z dodatkiem określonej soli dla danego rodzaju cieczy (KCl lub HCOOK) na podstawie oceny ich właściwości reologiczno-strukturalnych zapewniających stabilność układu, właściwości inhibicyjnych zapobiegających hydratacji minerałów ilastych oraz wielkości filtracji w założonych warunkach pomiaru. Dokonano również oceny ich stabilności w czasie 14 dni z wykorzystaniem aparatu Turbican Tower oraz interakcji opracowanych cieczy z wodami złożowymi pochodzącymi ze złoża na szelfie Morza Bałtyckiego.

Badania laboratoryjne zrealizowane zostały w temperaturze otoczenia (około 20°C) oraz odpowiadającej warunkom złożowym (około 50°C). Do badań wykorzystano specjalistyczną aparaturę umożliwiającą wykonanie ich w różnych warunkach, w tym otworopodobnych. Na podstawie wyników szeregu wstępnych badań laboratoryjnych wykonanych z użyciem różnych środków chemicznych i materiałów płuczkowych – do opracowania składów cieczy roboczych wytypowano:

- koloidy ochronne typu skrobiowego do regulacji filtracji, tj. skrobię kleikowaną i karboksymetyloskrobię (KMS), które również mają wpływ na właściwości reologiczno-strukturalne;
- środek strukturotwórczy, biopolimer XCD, zapobiegający sedymentacji fazy stałej (materiały obciążające, osady i zanieczyszczenia mechaniczne);
- sole – KCl i HCOOK, pełniące rolę jonowych inhibitorów hydratacji skał ilasto-lupkowych oraz materiałów obciążających;
- polimerowy inhibitor hydratacji skał ilasto-lupkowych – poliglikol;
- biocyd do ograniczania biodegradacji koloidów ochronnych i środka strukturotwórczego na czas wykonywania zabiegu;
- NaOH, do regulacji pH;
- materiał mostkujący, blokator węglanowy, służący do ochrony strefy przyodwiertowej poprzez utworzenie na ścianie odwiertu tymczasowego osadu ograniczającego inwazję filtratu z cieczy w pory skały zbiornikowej.

Przeprowadzone w pierwszej kolejności badania laboratoryjne dotyczyły określania ilości KCl lub HCOOK w celu otrzymania roztworów o założonej gęstości. Następnym etapem badań było rozpoznanie wpływu wytypowanych polimerów na wielkość filtracji i właściwości reologiczno-strukturalne cieczy roboczych zawierających ustalone ilości tych soli.

W związku z tym przygotowanie cieczy roboczych polegało na dyspergowaniu w 1 dm^3 wody słodkiej obrobionej biocydem środków skrobiowych oraz biopolimeru przez około 20 godz., a następnie wprowadzaniu do otrzymanej zawiesiny koloidalnej ustalonych ilości danej soli. Po rozpuszczeniu zadanych ilości soli w koloidalnej zawieszynie polimerowej dodawano

kolejne składniki wg założonej receptury cieczy roboczej oraz poliglikol i blokator węglanowy.

Po sporządzeniu cieczy robocze poddawano wstępnym badaniom w temperaturze pokojowej celem ustalenia wymaganej ilości wytypowanych środków chemicznych dla uzyskania odpowiednich ich parametrów reologiczno-strukturalnych i filtracji oraz właściwości inhibicyjnych. Ocenę zdolności cieczy roboczych zawierających jony K^+ i poliglikol do zapobiegania hydratacji minerałów ilastych przeprowadzono z udziałem wzorcowej skały ilasto-łupkowej reprezentowanej przez łupek mioceński. W ramach badań sporządzone cieczy także sezonowano przez 14 dni w $50^{\circ}C$ dla określenia zmian ich właściwości reologiczno-strukturalnych ze względu na zdolność do zawieszania zadanych blokatorów.

Przeprowadzone badania umożliwiły wytypowanie składów cieczy roboczych, których właściwości reologiczne i filtrację określono w warunkach HPHT. W założonej temperaturze złożowej ($50^{\circ}C$) oraz otoczenia, w warunkach statycznych, przez 14 dni monitorowano również sedymentację blokatora, co pozwoliło na ocenę stabilności w czasie suspensji wybranych cieczy roboczych.

Natomiast pozyskane filtry z tych cieczy użyte zostały do badań nad określeniem ich napięcia powierzchniowego na granicy z gazem oraz wzajemnych reakcji pomiędzy związkami chemicznymi zawartymi w danej cieczy roboczej i solance złożowej.

Oddziaływanie każdej cieczy roboczej na ścianę odwiertu, w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących w strefie przyodwiertowej, m.in. ze względu na hydratację minerałów ilastych w nich zawartych, może powodować uszkodzenie przepuszczalności skał zbiornikowych. W związku z tym w celu określenia właściwości inhibicyjnych opracowanych cieczy roboczych zostały przeprowadzone badania efektywności ich działania na wzorcową próbkę skały ilasto-łupkowej (łupek mioceński). Badania wpływu tych cieczy na stopień ograniczenia właściwości hydrofilowych użytych próbek skał wykonano wg opracowanej w INiG – PIB metody dyspersji skał ilasto-łupkowych. Jest to podstawowa, jakościowa metoda oceny skuteczności inhibicyjnego działania cieczy wiertniczych na skały ilasto-łupkowe. Wynikiem tego badania jest procentowy stosunek masy odzyskanej skały po założonym czasie jej dyspergowania w badanej cieczy – m_c do całkowitej masy próbki użytej do badań – m , oznaczony jako P_1 , oraz procentowy stosunek masy skały po dyspergowaniu jej w wodzie słodkiej – m_w do całkowitej masy próbki – m , oznaczony jako P_2 .

Zachowanie stabilnych parametrów reologiczno-strukturalnych cieczy roboczych w czasie prowadzonych prac w odwiertcie to kolejna wymagana ich cecha, która ma wpływ na ograniczanie sedymentacji fazy stałej. Pozwala ona na utrzymywanie w zawieszeniu nie tylko blokatorów będących

składnikami cieczy, ale także różnego rodzaju zanieczyszczeń powstałych podczas prac oraz ułatwia ich wynoszenie z odwiertu. W związku z tym w celu oceny stabilności sporządzonych cieczy roboczych zostały przeprowadzone badania wielkości sedymentacji blokatora węglanowego w czasie 14 dni, w temperaturze $50^{\circ}C$. Do badań tych wykorzystano aparat Turbiscan Tower (rysunek 1), który służy do analizy właściwości fizycznych zawiesin, emulsji i pian. Przy użyciu tego aparatu możliwe jest śledzenie przebiegu w tych systemach zjawisk takich jak: sedymentacja lub śmietankowanie, zachodzące w wyniku migracji cząstek, oraz koalescencja lub flokulacja, występujące pod wpływem zmiany wielkości cząstek. Zastosowana do opisu tych zjawisk technologia oparta jest na technice wielokrotnego rozpraszania światła (przechodzącego i wstecznie odbitego), która automatycznie rejestruje zmiany stabilności badanych systemów.



Rysunek 1. Aparat Turbiscan Tower

Figure 1. Turbiscan Tower apparatus

Po umieszczeniu próbki cieczy w komorze pomiarowej następuje jej skanowanie za pomocą ruchomej głowicy i dwóch detektorów pracujących synchronicznie z zadaną częstotliwością, które zbierają dane dotyczące natężenia światła przechodzącego przez próbkę i wstecznie rozproszonego przez próbkę co 20 mikronów wzdłuż jej wysokości. Zmiany sygnału w kolejnych pomiarach świadczą o zachodzącej destabilizacji suspensji badanej próbki i są przedstawiane na wykresie w postaci różnych kolorów. Do oceny stabilności próbki w założonym czasie i temperaturze pomiaru służy indeks stabilności – TSI . Jest to bezwymiarowy wskaźnik automatycznie wyznaczany w czasie pomiaru. Im wyższa wartość TSI , tym próbka jest bardziej niestabilna.

W celu określenia właściwego doboru składu cieczy roboczych, a szczególnie rodzaju użytych soli, zostały przeprowadzone badania zgodności chemicznej wybranych roztworów soli, czyli KCl, HCOOK, z solanką złożową. Badania te miały na celu określenie wzajemnych reakcji pomiędzy związkami chemicznymi zawartymi w danej solance i roztworze soli o stężeniu proponowanym w składzie cieczy roboczej.

Zastosowana do badań solanka złożowa wymagała oczyszczenia w procesie filtrowania ze względu na występujące w niej zanieczyszczenia cząstkami stałymi. Po oczyszczeniu solanki została wykonana analiza chemiczna oraz określono jej gęstość i wartość pH. Następnie solanki poddawano testom kompatybilności, które polegały na łączeniu ich w stosunku 1 : 1 z roztworami powyższych soli i obserwacji zachowywania się otrzymanych mieszanin w momencie łączenia oraz po 24 godz. ich starzenia.

Brak powstawania osadów w każdej mieszaninie dowodził zgodności chemicznej solanki z roztworem zastosowanej soli.

W kolejnym etapie badań testy kompatybilności solanek złożowych zostały wykonane zarówno dla sporządzonych cieczy roboczych, jak i pozyskanych z nich filtratów.

Wyniki badań

Ciecze do obróbki odwiertu sporządzone zostały na osnowie koloidalnej zawiesiny polimerowej środków skrobiowych i biopolimeru zawierającej ustalone ilości KCl lub HCOOK. Często analiza warunków geologiczno-złożowych wskazuje na potrzebę opracowania dla planowanego zabiegu cieczy o gęstości poniżej 1,0 kg/dm³ ze względu na niski gradient ciśnienia złożowego. W przypadku zastosowania wody morskiej

Tabela 1. Właściwości wody morskiej użytej w badaniach
Table 1. Properties of seawater used in the research

Gęstość, ρ [kg/dm ³]	pH	Zawartość jonów [g/dm ³]	
1,004	7,0	Cl ⁻	4,25
		Ca ²⁺	0,20
		Mg ²⁺	0,18
		K ⁺	0,11
		Na ⁺	2,11

jako osnowy cieczy roboczych uzyskanie takiej gęstości nie jest możliwe, w związku z tym jako cel priorytetowy uznano zapewnienie odpowiednich właściwości ograniczających hydratację skał przez dodatek minimalnej ilości inhibitora jonowego (KCl lub HCOOK) i poliglikolu oraz zastosowano blokator węglanowy ograniczający infiltrację filtratu w złożo.

Badania wstępne poprzedzono analizą chemiczną wody w celu określenia zawartości poszczególnych jonów mogących mieć wpływ na hydratację polimerów. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały badania doboru ilości środków skrobiowych i biopolimeru XCD, w celu uzyskania odpowiednich parametrów reologicznych, oraz soli i innych inhibitorów hydratacji skał, których dodatek pozwolił na otrzymanie możliwie najniższej gęstości cieczy charakteryzującej się zdolnością ograniczania hydratacji minerałów ilastych występujących w skale zbiornikowej.

Przeprowadzono serię badań cieczy (tabela 2), która została sporządzona na osnowie 2% skrobi kleikowanej, 1% KMS i 0,2% biopolimeru z dodatkiem 3% blokatora węglanowego, inhibitora polimerowego poliglikolu oraz inhibitora jonowego (5% KCl lub 5,6% HCOOK). Parametry reologiczne cieczy posiadały wartości, które zapobiegały sedymentacji fazy stałej,

Tabela 2. Właściwości cieczy roboczych na osnowie wody morskiej
Table 2. Properties of seawater-based workover fluids

Nr cieczy	Skład cieczy [%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa · s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja API [cm ³]	pH	Uwagi	
			η_{pl}	η_s		I	II				
1	Biocyd	0,1	1060	21	30,0	8,6	1,0	1,6	8,2	9,2	brak sedymentacji
	Skrobia kleikowana	2,0									
	KMS	1,0									
	Biopolimer	0,2									
	KCl	5,0									
	Blokator węglanowy	3,0									
2	Biocyd	0,1	1060	18	27,5	9,1	2,0	2,7	5,6	9,0	brak sedymentacji
	Skrobia kleikowana	2,0									
	KMS	1,0									
	Biopolimer	0,2									
	KCl	5,0									
	Blokator węglanowy poliglikol	3,0 2,0									

cd. Tabela 2/cont. Table 2

Nr cieczy	Skład cieczy	[%]	Gęstość, ρ [kg/m ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia, τ_y [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]		Filtracja API [cm ³]	pH	Uwagi
				η_{pl}	η_s		I	II			
3	Biocyd	0,1	1060	21	30,0	8,6	1,2	1,6	8,2	9,6	brak sedymentacji
	Skrobia kleikowana	2,0									
	KMS	1,0									
	Biopolimer	0,2									
	HCOOK	5,6									
	Blokator węglanowy	3,0									
4	Biocyd	0,1	1060	16	25,5	9,1	2,0	2,6	4,6	9,5	brak sedymentacji
	Skrobia kleikowana	2,0									
	KMS	1,0									
	Biopolimer	0,2									
	HCOOK	5,6									
	Blokator węglanowy	3,0									
	poliglikol	2,0									

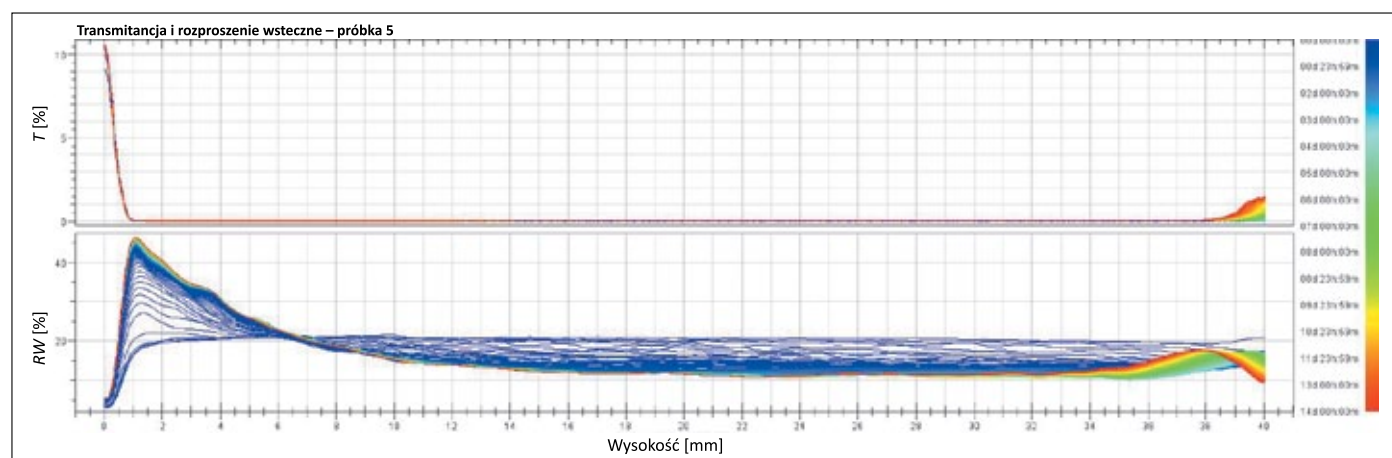
a uzyskane wartości filtracji wynosiły 5,6 cm³ w przypadku cieczy z dodatkiem KCl i 4,6 cm³ w przypadku HCOOK. Badania te potwierdziły celowość zastosowania skrobi kleikowanej w składzie cieczy – ze względu na jej korzystny wpływ na wartość filtracji. Użycie skrobi kleikowanej w składzie cieczy korzystnie wpływa również na ich właściwości inhibicyjne.

Do badania dyspersji z użyciem opracowanych cieczy zastosowano skalę wzorcową – lupek mioceński. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką zdolność ograniczania hydratacji badanej skały przez opracowane ciecze. Odzyski skały po dyspergowaniu w cieczy (P_1) wynosiły 84–88%, natomiast po ponownym dyspergowaniu w wodzie (P_2) wynosiły 58–64%.

Badania opracowanych cieczy roboczych przeprowadzone na aparacie Turbiscan Tower w temperaturze 50°C potwierdziły ich stabilność w teście 14-dniowym (rysunki 2 i 3). Na

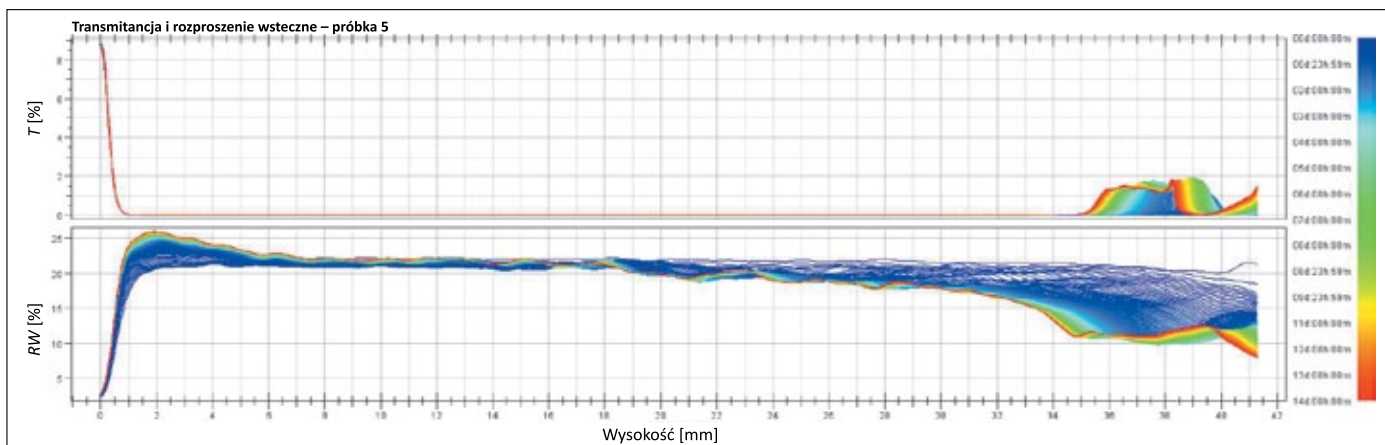
wykresach zmian transmitancji światła przechodzącego (ΔT) zaobserwowano jedynie tworzenie się cienkiego osadu blokatora, o grubości poniżej 1 mm. Świadczy o tym niewielkie obniżenie transmitancji T na wysokości próbki w zakresie 1–2 mm w czasie testu 14-dniowego. Na wykresach zmian światła wstecznie odbitego (RW) można zaobserwować powstawanie niewielkiego odstoju wody w górnej części próbek. Uwidacznia się to przez obniżenie wartości RW przy powierzchni cieczy, wynikające ze wzrostu przejrzystości próbek. W teście 14-dniowym grubość warstewki wody nie przekracza 2 mm. Parametrem obrazującym globalną stabilność próbki jest wartość TSI , która informuje o zjawiskach niestabilności zachodzących w całej objętości próbki. W teście 14-dniowym niestabilność (wartość TSI) nie przekraczała wartości 10.

Dla opracowanych cieczy, ich filtratów oraz roztworów soli o stężeniach odpowiadających zastosowanym w opracowanych



Rysunek 2. Natężenie światła przechodzącego i wstecznie odbitego dla cieczy roboczej sporządzonej z dodatkiem 2% skrobi kleikowanej, 1% karboksymetyloskrobi i 5% KCl w czasie 14 dni w temperaturze 50°C

Figure 2. Intensity of transmitted and back-reflected light for a workover fluid prepared with the addition of 2% starch, 1% carboxymethyl starch and 5% KCl during 14 days at 50°C



Rysunek 3. Natężenie światła przechodzącego i wstecznie odbitego dla cieczy roboczej sporządzonej z dodatkiem 2% skrobi kleikowanej, 1% karboksymetyloskrobi i 5,6% HCOOK w czasie 14 dni w temperaturze 50°C

Figure 3. Intensity of transmitted and back-reflected light for a workover fluid prepared with the addition of 2% starch, 1% carboxymethyl starch and 5.6% HCOOK during 14 days at 50°C

cieczach roboczych przeprowadzono badania ich kompatybilności z solanką złożową z odwiertu. Wyniki badania cieczy przedstawiono na załączonych fotografiach (rysunek 4). Badania prowadzono przez okres 7 dni w temperaturze otoczenia, a dla filtratów cieczy roboczych i roztworów soli dodatkowo w temperaturze 50°C, również przez 7 dni. W żadnych z wykonanych badań interakcji nie stwierdzono powstawania wytrąceń mogących niekorzystnie wpływać na przepuszczalność skały zbiornikowej. Szczególnie istotne jest w tym przypadku obserwowanie interakcji roztworów soli z solanką złożową, które nie jest zakłócone przez obecność polimerów i blokatora węglanowego. W przypadku interakcji solanki złożowej z cieczami roboczymi następowało natomiast rozcieńczanie cieczy, skutkujące obniżeniem ich parametrów reologicznych i zwiększeniem koncentracji blokatora węglanowego przy dnie.

Ważnym składnikiem opracowanych cieczy jest poliglikol, który odpowiada za nadanie im odpowiednich właściwości inhibicyjnych oraz wpływa dodatkowo na obniżenie napięcia powierzchniowego filtratu na granicy z gazem. Niskie napięcie powierzchniowe ułatwia wypieranie filtratu z cieczy przez gaz

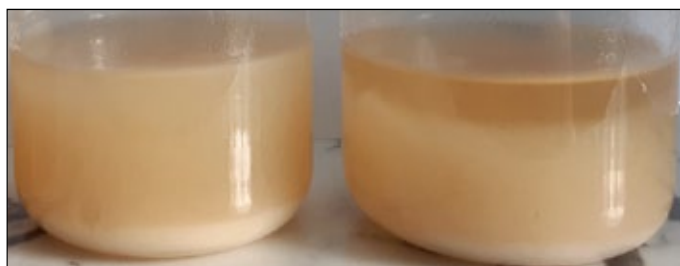
w porach skalnych. Obniżenie napięcia powierzchniowego filtratów cieczy roboczych jest związane z dodatkiem poliglikolu, który oprócz właściwości inhibicyjnych wykazuje czynność powierzchniową i korzystnie wpływa na obniżenie napięcia powierzchniowego. W związku z tym opracowane ciecze nie wymagają zastosowania dodatkowych środków powierzchniowo czynnych w celu ułatwienia wypierania filtratu tych cieczy z porów skał przez gaz.

Przeprowadzone za pomocą wiskozymetru HPHT badania zmian parametrów reologicznych cieczy roboczych w funkcji temperatury potwierdziły stabilność tych parametrów w zakresie temperatury 20–50°C. Na wykresach (rysunki 5 i 6) zmian lepkości plastycznej i granicy płynięcia w cyklu ogrzewania i ponownego oziębiania parametry te ulegają nieznacznemu obniżeniu podczas ogrzewania, a następnie powracają do wartości zbliżonych do początkowych po ochłodzeniu do temperatury wyjściowej.

Zmiany lepkości plastycznej w zakresie temperatur 20–50°C wynoszą 3–5 mPa·s, natomiast zmiany granicy płynięcia w tym zakresie temperatur: 3–6 Pa.

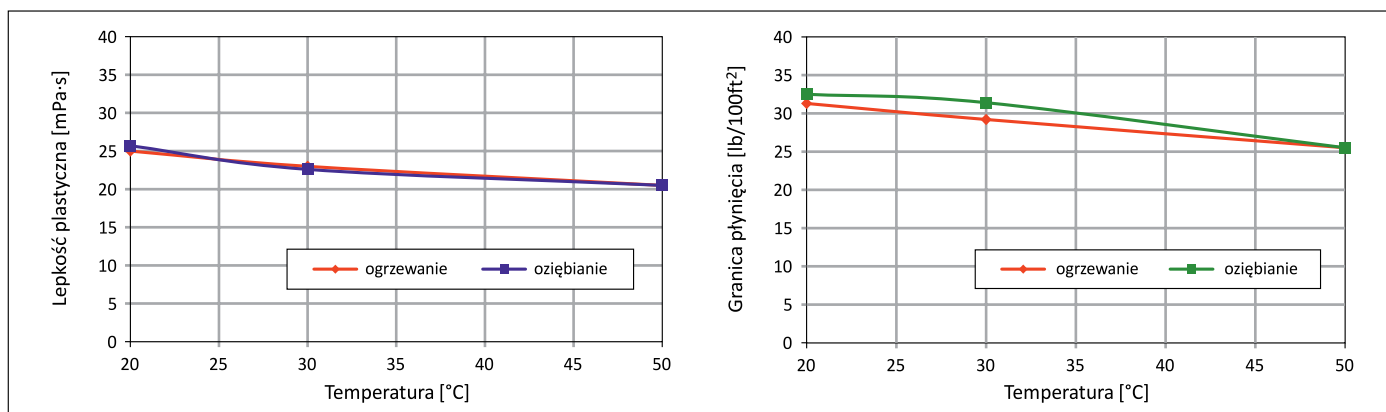
Dyskusja wyników i wnioski

Przedstawione w pracy wyniki badań laboratoryjnych dotyczyły opracowania składów wodnodispersyjnych cieczy roboczych sporządzonych na podstawie wody morskiej do zastosowania podczas rekonstrukcji odwiertów. W badaniach wykorzystano wodę morską pobraną z Bałtyku. Opracowane ciecze robocze to ciecze zawierające fazę stałą w postaci blokatora węglanowego, w których składach zastosowano sole potasowe, jak KCl lub HCOOK, środki skrobiowe, biopolimer oraz poliglikol.



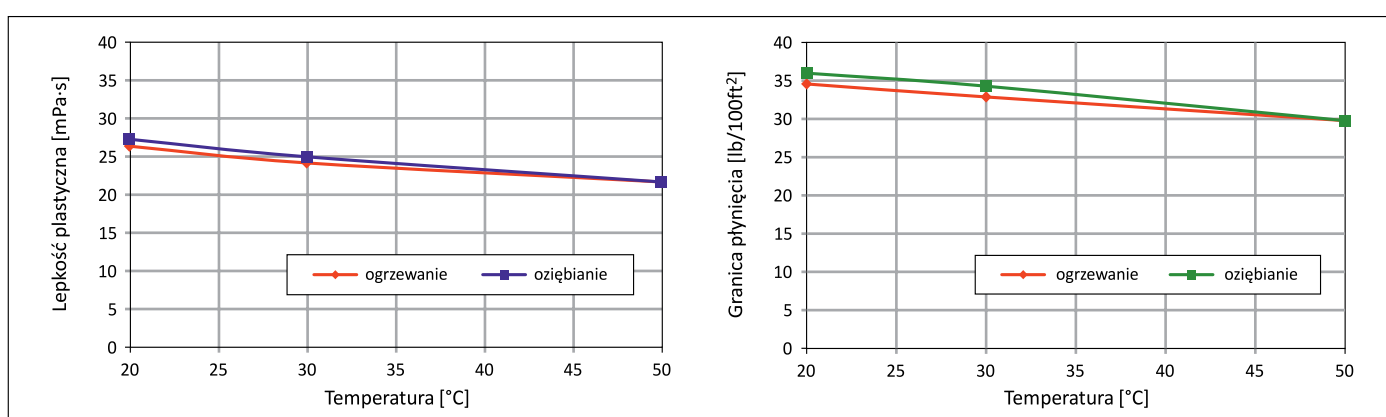
Rysunek 4. Interakcje solanki złożowej z cieczą roboczą (z dodatkiem KCl – po lewej i HCOOK – po prawej)

Figure 4. Interactions of formation brine with the workover fluids (with the addition of KCl – on the left and HCOOK – on the right)



Rysunek 5. Zmiany lepkości plastycznej i granicy płynięcia cieczy roboczej z dodatkiem KCl w funkcji temperatury

Figure 5. Changes in the plastic viscosity and yield point of the workover fluid with the addition of KCl as a function of temperature



Rysunek 6. Zmiany lepkości plastycznej i granicy płynięcia cieczy roboczej z dodatkiem HCOOK w funkcji temperatury

Figure 6. Changes in the plastic viscosity and yield point of the workover fluid with the addition of HCOOK as a function of temperature

Wytypowane sole zastosowano w ilości zapewniającej uzyskanie odpowiednich właściwości inhibycyjnych sporządzonych cieczy przy jak najniższej ich gęstości. W zależności od rodzaju soli ich ilości w 1000 ml wody morskiej wynosiły: 5% – KCl i 5,6% – HCOOK, a otrzymane roztwory posiadały gęstość 1,06 kg/dm³.

Ilości wytypowanych środków skrobiowych i biopolimeru zależały od wartości uzyskiwanych parametrów reologiczno-strukturalnych cieczy i ich filtracji oraz zdolności do zawieszania blokatora. Osiągnięcie optymalnych właściwości cieczy uzyskano dla 1% KMS, 2% skrobi kleikowanej, 0,2% biopolimeru.

Po okresie sezonowania w temperaturze 20°C cieczy roboczych sporządzonych na osnowie zestawu koloidów zawierających wytypowane ilości soli wyniki badań właściwości technologicznych dowodziły, że opracowane cieczy posiadały zbliżone wartości parametrów reologiczno-strukturalnych i najniższą filtrację spośród badanych cieczy, odznaczały się zdolnością do zawieszania blokatora. Procesy zachodzące w cieczach roboczych w czasie cyklicznego działania temperatury w badaniach z wykorzystaniem wiskozymetru HPHT

nie spowodowały dużego pogorszenia ich właściwości reologiczno-strukturalnych ani sedymentacji blokatorów. Wszystkie opracowane cieczy robocze zapobiegały dyspersji próbek skały wzorcowej, przy czym najwyższą zdolność ograniczania ich hydratacji posiadały cieczy zawierające w składzie skrobię kleikowaną.

Uzyskane filtry z opracowanych cieczy w kontakcie z solanką złożową tworzyły kompatybilne mieszaniny, w których nie stwierdzono powstawania produktów reakcji. Biorąc pod uwagę warunki geologiczno-złożowe występujące na szelfie Morza Bałtyckiego oraz otrzymane wyniki badań laboratoryjnych wykonanych w warunkach zbliżonych do otworowych, do prac rekonstrukcyjnych można zaproponować opracowane wodnodispersyjne cieczy robocze, które charakteryzowały się ograniczoną sedymentacją blokatorów i wykazywały stabilność parametrów reologiczno-strukturalnych w zadanych warunkach pomiaru.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania laboratoryjne nad opracowaniem cieczy roboczej sporządzonej na osnowie wody morskiej*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0055/KW/2023, nr archiwalny: DK-4100-0038/2023.

Literatura

- Ali S.A., Shelby D.C., Foxenberg W.E., Freeman M., 1999. Guidelines for rig-site removal of iron contamination from completion brines. *Petroleum Engineer International*, 72: 35–39.
- Alvarez L.A., Cedeno M.D., Villon P.V., Pinoargote R.C., 2019. Design of a fluid for workover operations in the Gustavo Galindo Oilfield, Ecuador. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(11): 2118–2124.
- Badrul M.J., Graeme R.R., Ishenny M.N., Suhadi A.N., Devadaas M., 2009. Increasing Production by Maximizing Underbalance During Perforation Using Nontraditional Lightweight Completion Fluid. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/108423-PA.
- Berg E., Sedberg S., Kaarigstad H., Omland T.H., Svanes K., 2006. Displacement of Drilling Fluids and Cased-Hole Cleaning: What Is Sufficient Cleaning? *IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida, USA*. DOI: 10.2118/99104-MS.
- Biały E., 2016. Wykorzystanie enzymów do udrażniania strefy przyodwiertowej po dowierceni. *Nafta-Gaz*, 11: 926–933. DOI: 10.18668/NG.2016.11.05.
- Bridges K.L., 2000. Completion and workover fluids. *SPE Monograph Volume 19, Richardson, USA*.
- Bungert D., Maikranz S., Sundermann R., Downs J., Benton W., Dick M.A., 2000. The Evolution and Application of Formate Brines in High-Temperature/High-Pressure Operations. *IADC/SPE 59191*. DOI: 10.2118/59191-MS.
- Fleming N., Moland L.G., Svanes G., Watson R., Green J., Patey I., Byrne M., Howard S., 2016. Formate Drilling and Completion Fluids: Evaluation of Potential Well-Productivity Impact, Valemon. *SPE Production & Operations*, 31(01): 22–28. DOI: 10.2118/174217-PA.
- Herman Z., Uliasz M., 2001. Zmiany przepuszczalności skał porowatych pod wpływem oddziaływania cieczy zasolonych. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 9: 12–20.
- Herman Z., Uliasz M., 2006. Ciecze robocze w rekonstrukcjach odwiertów. *Nafta-Gaz*, 62(11): 584–593.
- Herman Z., Uliasz M., 2007. Ochrona złóż ropy naftowej i gazu ziemnego podczas udostępniania i prac rekonstrukcyjnych poprzez użycie cieczy wiertniczych zawierających nietoksyczne sole mrówczanowe. *Wiertnictwo–Nafta–Gaz*, 24(2): 757–768.
- Herman Z., Uliasz M., Pudło J., 2002. Rola cieczy roboczych w rekonstrukcji odwiertów. *Nafta-Gaz*, 58(2): 95–106.
- Howard S., Anderson Z., Oort E., 2017. HPHT Formation Fluid Loss Control without Bridging Particles. AADE-17-NTCE-110.
- Howard S., Leon S., Lochen J., Abrahams B., Oort E., 2019. Formate Fluid Design, Testing, and Modeling for Slim-Hole and Coiled Tubing Operations. AADE-19-NTCE-111.
- Jasiński B., 2012. Badania nad zastosowaniem emulsji olejowo-wodnych jako cieczy roboczych o obniżonej gęstości. *Nafta-Gaz*, 68(12): 1155–1164.
- Rahman S.S., Rahman M.M., Khan R.A., 1995. Response of low-permeability, illitic sandstone to drilling and completion fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 12: 309–322. DOI: 10.1016/0920-4105(94)00052-6.
- Reid P., Santos H., 2003. Novel Drilling, Completion and Workover Fluids for Depleted Zones: Avoiding Losses, Formation Damage and Stuck Pipe. *SPE/IADC 85326*.
- Uliasz M., 2008. Metody eliminacji zanieczyszczeń solanek złożowych stosowanych jako cieczy robocze przy rekonstrukcji odwiertów. *Nafta-Gaz*, 64(10): 710–720.
- Uliasz M., 2020. Ciecz robocza do rekonstrukcji odwiertów o obniżonym ciśnieniu złożowym. *Nafta-Gaz*, 76(7): 457–465. DOI: 10.18668/NG.2020.07.04.
- Uliasz M., 2021. Ciecze robocze – ich właściwości technologiczne i rola w procesie rekonstrukcji odwiertów. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 235: 1–160. DOI: 10.18668/PN2021.235.
- Uliasz M., Herman Z., 2003. Nowe rodzaje cieczy roboczych bezpieczne dla środowiska. *WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 109(9): 7–10.
- Uliasz M., Zima G., Błaż S., Jasiński B., 2016. Roztwory mrówczanów jako składniki płuczek wiertniczych. *Przemysł Chemiczny*, 95(2): 297–302.
- Zima G., 2009. Wpływ solanek na hydratację polimerów. *Nafta-Gaz*, 65(9): 692–696.



Mgr inż. Bartłomiej JASIŃSKI
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bartlomiej.jasinski@inig.pl



Dr inż. Grzegorz ZIMA
Kierownik Zakładu Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: grzegorz.zima@inig.pl



Mgr inż. Sławomir BŁAŻ
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: slawomir.blaz@inig.pl



dr hab. inż. Piotr KASZA, prof. INiG – PIB
Zastępca Dyrektora ds. Eksploatacji Złóż Węglowodorów
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: piotr.kasza@inig.pl



Dr inż. Małgorzata ULIASZ
Adiunkt w Zakładzie Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl