

Wybrane zagadnienia z zakresu właściwości cieczy specjalnych i ich roli w procesie udostępniania złóż

Selected issues concerning the properties of special fluids and their role in the process of reservoir completion

Małgorzata Uliasz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Ciecze specjalne to grupa cieczy wykorzystywanych w różnych zabiegach prowadzonych po zakończeniu wiercenia otworu (w tak zwanych pracach zakończeniowych), które nie należy porównywać do płuczek wiertniczych. Do cieczy specjalnych należą m.in. ciecze przemywające i czyszczące, robocze, nadpakerowe, do perforacji rur oraz bufory do operacji linowych i oczyszczania rur. Skład i właściwości technologiczne tych cieczy dobierane są do warunków geologiczno-złożowych oraz roli cieczy w pracach prowadzonych w odwiertach. Do usuwania płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej i oczyszczania powierzchni rur używane są wysokolepkie bufory i ciecze przemywające z dodatkiem polimerów lub środków powierzchniowo czynnych, które mogą być sporządzane na bazie wody słodkiej. Ciecze bezpośrednio oddziałujące na strefę złożową sporządzane są na podstawie soli nieorganicznych lub organicznych – mrówczanowych o stężeniu uzależnionym od gradientu ciśnienia złożowego oraz zawartości minerałów ilastych w formacji złożowej. W składach tych cieczy mogą być stosowane również materiały obciążające i środki chemiczne regulujące podstawowe właściwości technologiczne, a także biocydy, środki ograniczające korozję osprzętu, obniżające napięcie powierzchniowe na granicy faz oraz degradujące polimery. Ciecze te wykorzystywane są w zabiegach wglębnego zbrojenia odwiertów i ich przygotowywania do opróbowania, perforowania rur okładzinowych, oczyszczania strefy przyodwiertowej z pozostałości poperforacyjnych i osadów wytworzonych przez płuczki wiertnicze oraz w pracach rekonstrukcyjnych. Przeprowadzenie każdego z tych zabiegów wymaga zatłoczenia odwiertu odpowiednim rodzajem cieczy specjalnej, która w jak największym stopniu powinna zapewniać ochronę skał zbiornikowych. Przedstawioną w artykule charakterystykę danej cieczy specjalnej i jej podstawowe właściwości opracowano na podstawie wyników badań laboratoryjnych wykonanych w ramach tematyki badawczej realizowanej w INiG – PIB. Badania te przeprowadzone zostały dla warunków geologiczno-złożowych występujących w odwiertach zapadliska przedkarpackiego oraz Nizy Polskiego.

Słowa kluczowe: ciecze specjalne, zadania cieczy specjalnych, właściwości cieczy specjalnych, udostępnianie złoża, rekonstrukcje odwiertów.

ABSTRACT: Special fluids are a group of fluids used in various post-drilling processes (in the so-called completion works) that should not be compared to drilling fluids. Special fluids include washing and cleaning fluids, working fluids, packer fluids, pipe perforation fluids and buffers for wireline operations and pipe cleaning. The composition and technological properties of these fluids are selected according to geological and reservoir conditions and their role in wellbore operations. Highly viscous buffers and washing fluids with added polymers or surfactants are used to remove drilling mud from the annular space and to clean the pipe's surface. They can be prepared using fresh water. Fluids which directly affect the reservoir zone are based on a matrix of inorganic or organic salts (formates), whose concentration depends on the reservoir pressure gradient and the content of clay minerals in the formation. The compositions of these fluids may also include loading materials and chemicals that regulate their basic technological properties, as well as biocides, equipment corrosion inhibitors, interfacial tension reducers and polymer breakers. They are used for downhole equipment and for preparing wells for testing, perforating casings, cleaning post-perforation residues and sediments generated by drilling muds from near-well zones as well as workover works. Each of these processes requires injection of the appropriate type of special fluid into the wellbore, which should protect the reservoir rocks to the greatest possible extent. The characteristics of a given special fluid and its basic properties, as presented in the article, were enumerated on the basis of laboratory tests carried out as part of research at the Oil and Gas Institute – National Research Institute (INiG – PIB). The tests were carried out for geological and reservoir conditions occurring in wellbores of the Carpathian Foredeep and the Polish Lowland.

Key words: special fluids, special fluids roles, special fluids properties, reservoir completion, wellbore workover.

Autor do korespondencji: M. Uliasz, e-mail: malgorzata.uliasz@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 11.10.2021 r. Zatwierdzono do druku: 09.11.2021 r.

Wprowadzenie

W procesach technologicznych związanych z udostępnianiem złoża, przygotowaniem odwiertów do eksploatacji oraz ich rekonstrukcją wykorzystywane są ciecze o specjalnym przeznaczeniu, tzw. ciecze specjalne. Stanowią one odrębną grupę cieczy, które są stosowane po zakończeniu wiercenia otworu i spełniają inną funkcję niż płuczki wiertnicze, dlatego nie mogą być do nich zaliczane.

Ciecze specjalne wykorzystywane są głównie do takich zabiegów jak:

- oczyszczanie strefy przyodwiertowej podczas prac przygotowujących otwór do opróbowania, jak również oczyszczanie powierzchni rur z osadów utworzonych przez płuczkę wiertniczą i innych zanieczyszczeń;
- zbrojenie i opróbowanie odwiertów oraz usuwanie płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej przed zatłoczeniem cieczy nadpakerowej;
- prace rekonstrukcyjne.

Skład i właściwości technologiczne cieczy specjalnych dobierane są ze względu na rolę, jaką spełniają na poszczególnych etapach prac prowadzonych w odwiercie, oraz na warunki geologiczno-złożowe. W związku z tym rozróżnia się:

- ciecze przemywające i czyszczące;
- ciecze buforowe (do operacji linowych i czyszczenia rur);
- ciecze robocze;
- ciecze nadpakerowe;
- ciecze do perforacji.

Wyżej wymienione ciecze sporządzane są na bazie wody słodkiej oraz jako czyste roztwory wodne jednego lub dwóch elektrolitów, w których składach mogą być także stosowane materiały i środki chemiczne kontrolujące ich właściwości reologiczne i inhibujące, filtrację, gęstość, pH.

W praktyce przemysłowej ciecze specjalne potocznie nazywane są cieczami roboczymi. Spośród nich jedynie ciecze nadpakerowe (ang. *packer fluids*) nazywane są zgodnie z ich przeznaczeniem. Z uwagi na wykorzystywanie tych cieczy w różnych zabiegach technologicznych prowadzonych po zakończeniu wiercenia otworu, tj. od czasu jego ukończenia do oddania go do eksploatacji, określane są również jako ciecze do zakończenia (ang. *completion fluids*) oraz w okresie eksploatacji odwiertu, podczas prac rekonstrukcyjnych, jako ciecze robocze (ang. *workover fluids*).

Ciecze typu *completion fluids*, które bezpośrednio oddziałują na strefę przyodwiertową, to w większości roztwory soli o odpowiedniej czystości i kompatybilności z płynami złożowymi, często obrobione środkami powierzchniowo czynnymi oraz inhibitorami korozji. Gęstość tych roztworów i rodzaj zastosowanej soli uzależniony jest od gradientu ciśnienia złożowego i właściwości hydrofilowych skał zbiornikowych.

Natomiast w składzie cieczy typu *workover fluids* dodatkowo powinny być zastosowane środki do kontroli właściwości reologicznych i filtracji. Dodatek odpowiednich środków chemicznych ogranicza migrację filtratu w pory skały oraz ułatwia zawieszanie wygenerowanych w trakcie tych prac różnych zanieczyszczeń (mechaniczne i chemiczne) i wyniesienie wyplukiwanego zasypu.

Rodzaje cieczy specjalnych i ich rola w procesie udostępniania złóż

Składy cieczy specjalnych zależą od ich zastosowania w poszczególnych fazach prac. Ciecze zatłaczane do przestrzeni zarurowanej odwiertu sporządzane są najczęściej na bazie wody słodkiej. Są to głównie ciecze przemywające zawierające w składach wyselekcjonowane środki powierzchniowo czynne (SPCz) o właściwościach czyszczących, odtłuszczających i zwilżających powierzchnie stalowe oraz wysokolepkie ciecze buforowe spełniające rolę „tłoków hydraulicznych”, do których sporządzania wykorzystywane są wysokocząsteczkowe polimery organiczne. Zadaniem cieczy buforowych jest usunięcie płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej przed zatłoczeniem cieczy nadpakerowej. Natomiast ciecze kontaktujące się ze strefą złożową to solanki o gęstości zależnej od gradientu ciśnienia złożowego. Sporządzane są na osnowie soli nieorganicznych, najczęściej NaCl i KCl, oraz organicznych (HCOOK, HCOONa, HCOOCs · H₂O). Wykorzystanie tych soli pozwala na otrzymywanie solanek o gęstości do 2,3 kg/dm³. Porównywalne gęstości solanek można również uzyskać, używając do ich sporządzenia CaCl₂ oraz soli bromkowych (NaBr, KBr, CaBr₂ i ZnBr₂), których stosowania w warunkach złożowych zaniechano ze względów ekologicznych. Natomiast CaCl₂ należy używać z dużą ostrożnością z uwagi na jego ograniczoną kompatybilność z wodami złożowymi, powodującą wytrącanie się osadów trudno rozpuszczalnych związków chemicznych.

Solanki o żądanej gęstości mogą być sporządzane jako solanki bez fazy stałej oraz z dodatkiem materiałów obciążających i środków chemicznych regulujących podstawowe właściwości technologiczne. Składy tych cieczy, w zależności od temperatury panującej w odwiercie oraz czasu ich kontaktu ze ścianą odwiertu, mogą również zawierać biocydy, środki ograniczające korozję osprzętu, obniżające napięcie powierzchniowe na granicy faz i zapobiegające powstawaniu blokad emulsyjnych oraz o działaniu utleniającym powodujące rozkład polimerów.

Podstawowym zadaniem cieczy specjalnych, które bezpośrednio oddziałują na strefę przyodwiertową, jest zapobieganie uszkodzeniu i ograniczanie uszkodzenia przepuszczalności

skał zbiornikowych. Na wielkość zmian przepuszczalności skał zbiornikowych spowodowanych oddziaływaniem danej cieczy wpływa szereg czynników. Do najważniejszych należą: właściwości fizyczne i chemiczne cieczy, jej czystość i produkty interakcji z wodami złożowymi oraz skałami zbiornikowymi. Uzyskanie odpowiednich parametrów cieczy wymaga przeprowadzenia szeregu badań laboratoryjnych nad ustaleniem jej składu odpowiadającego warunkom geologiczno-złożowym określonego poziomu perspektywicznego, z uwzględnieniem jej roli w danym procesie technologicznym.

Ciecze robocze

Działania w kierunku przedłużenia lub przywrócenia zdolności produkcyjnej odwiertów wymagają okresowego wykonywania różnych zabiegów dla poprawy ich stanu technicznego oraz przewodności hydraulicznej skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej. Zakres tych działań obejmuje zabiegi rekonstrukcyjne odwiertów, do których przeprowadzenia konieczne jest zatłoczenie ich odpowiednią cieczą roboczą celem zapewnienia bezpieczeństwa wykonywanych prac i ochrony złoża (Uliasz i Herman, 2007).

Do opracowania składów cieczy roboczych do złóż o normalnym i podwyższonym gradiencie ciśnienia złożowego w prowadzonych w INiG – PIB badaniach laboratoryjnych wykorzystano sole nieorganiczne i organiczne oraz oczyszczone i zmodyfikowane wody złożowe, stanowiące solanki bez fazy stałej oraz zawierające fazę stałą, czyli z dodatkiem polimerów organicznych i blokatora w postaci CaCO_3 lub zwymiarowanej soli ziarnistej (Uliasz i Chudoba, 2000; Uliasz et al., 2000, 2014; Herman i Uliasz, 2006, 2007). Natomiast do złóż szcerpanych o obniżonym gradiencie ciśnienia złożowego wykorzystano związek syntetyczny pełniący rolę oleju – estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (RME), które wraz z odpowiednio dobranymi emulgatorami stanowiły fazę olejową emulsyjnej cieczy roboczej. Fazą wodną był roztwór CaCl_2 z dodatkiem skrobiowego koloidu ochronnego (Jasiński, 2012; Uliasz, 2020).

Ciecz o gęstości $1,03 \text{ kg/dm}^3$ do $1,21 \text{ kg/dm}^3$ sporządzono wykorzystując głównie NaCl i KCl jako inhibitory jonowe. Przy użyciu tych soli regulowano również gęstość i właściwości inhibujące zastosowanych do badań wód złożowych. Do uzyskania powyższych wartości gęstości oraz zapewnienia odpowiednich właściwości inhibujących mogą być także stosowane sole organiczne – HCOOK , HCOONa , CH_3COOK , co potwierdziły badania laboratoryjne oraz próba przemysłowa mrówczanowej cieczy roboczej zastosowanej w piaskowcowo-lupkowych złożach miocenu. Sole organiczne preferowane są głównie do opracowywania cieczy wiertniczych i eksploatacyjnych o wysokiej gęstości, tj. od $1,25 \text{ kg/dm}^3$ do około $2,0 \text{ kg/dm}^3$ (Uliasz i Chudoba, 1999; Uliasz et al., 2016).

Ciecze robocze stosowane jako solanki bez fazy stałej wymagają specjalnej technologii przygotowania. Celem tych działań jest usunięcie z nich niepożądanego fazy stałej, czyli zanieczyszczeń mechanicznych oraz chemicznych stanowiących potencjalne zagrożenie uszkodzenia przepuszczalności skał strefy przyodwiertowej. Każda zatłaczana do odwiertu solanka bez fazy stałej powinna charakteryzować się odpowiednim stopniem czystości – klarownością, której wartość nie powinna przekraczać 20 NTU (ang. *nephelometric turbidity units*). Problem czystości nie dotyczy cieczy roboczych charakteryzujących się właściwościami technologicznymi, które świadczą o ich zdolności do zawieszania zanieczyszczeń i zapobiegania ich migracji wraz z filtratem do przestrzeni porowej skały zbiornikowej. Są to ciecze zawierające w składach wielkocząsteczkowe polimery organiczne do kontroli i regulacji parametrów reologiczno-strukturalnych i filtracji (Uliasz, 2008).

Obróbka solanek polimerami organicznymi powoduje jednak pogorszenie przepuszczalności skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej. Częsteczki zdyspergowanego polimeru infiltrują z filtratem w szczeliny i pory głęboko poza strefę przyodwiertową, pokrywając ich ścianki, zanim na ścianie odwiertu wytworzony zostanie osad, film polimerowy. W celu przeciwdziałania uszkodzeniu przepuszczalności skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej, w składach cieczy należy stosować fazę stałą – mieszaninę blokatorów o wielkości cząstek dobieranej do rozmiaru porów i mikroszczelin skały zbiornikowej. Ich dodatek jako materiału mostkującego umożliwi okresowe uszczelnienie przestrzeni porowej skały strefy przyodwiertowej i utworzenie na ścianie odwiertu tymczasowego osadu ograniczającego inwazję filtratu z cieczy w pory skał zbiornikowych (rys. 1).

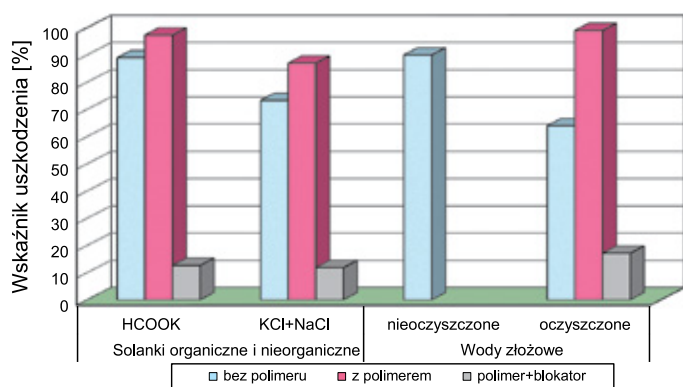
Podstawowe składki cieczy roboczych, opracowane na drodze wieloletnich badań laboratoryjnych zmian przepuszczalności różnych skał zbiornikowych, poddawano modyfikacji na podstawie wyników testów złożowych poprzez:

- poprawę ich właściwości inhibitujących, regulując ilość i rodzaj soli, a w szczególności jonu K^+ ;
- poprawę ich aktywności powierzchniowej dodatkami SPCz;
- zapobieganie biologicznemu rozkładowi polimerów oraz korozyjnemu działaniu cieczy na osprzęt, dobierając odpowiednie biocydy i inhibitory korozji.

Podstawowym celem tych zabiegów była ochrona skał zbiornikowych strefy przyodwiertowej dla zachowania produktywności odwiertów.

Pomimo że opracowane ciecze robocze wykazują podobieństwo do płuczek do dowiercania, przede wszystkim w zakresie zapobiegania skutkom zjawisk fizykochemicznych w strefie przyodwiertowej i ich ograniczania, pełnią różne funkcje w procesie pozyskiwania węglowodorów, stąd też różne są

kryteria oceny ich właściwości chemicznych i fizycznych. Płuczki do dowiercania powinny charakteryzować się takimi właściwościami reologiczno-strukturalnymi i inhibitującymi, które na bieżąco kontrolowane pozwolą na utrzymywanie ich w granicach wyznaczonych wymaganiami technologii wiercenia i oczyszczania otworu oraz zabezpieczania stateczności jego ściany. Natomiast wymagania wobec cieczy roboczych, stosowanych w pracach poprawiających i przywracających sprawność techniczno-eksploatacyjną odwiertów, odnoszą się do utrzymywania przeciwcisnienia na złożu, niepowodującego jego uszkodzenia i niedopuszczającego do przyływu mediów złożowych do odwiertu, oraz do ułatwienia zapuszczania narzędzi. Ciecze te również w większym stopniu niż płuczki wiertnicze powinny wyróżniać się odpowiednią czystością i zapobiegać interakcji z płynami złożowymi, a zwłaszcza z wodą złożową.



Rys. 1. Wpływ wybranych składów cieczy roboczych na wartości wskaźnika uszkodzenia przepuszczalności piaskowca wzorcowego

Fig. 1. Influence of selected working fluid compositions on the values of the permeability damage index for benchmark sandstone

Ciecze przemywające i czyszczące

W procesach oczyszczania strefy przyodwiertowej podczas prac przygotowujących otwór do opróbowania, a także mycia powierzchni rur zanieczyszczonych osadem utworzonym przez płuczkę wiertniczą oraz smarem używanym do skręcania rur stosowane są ciecze przemywające i czyszczące.

Ciecze stosowane w procesach oczyszczania strefy przyodwiertowej to roztwory soli, których stężenie powinno być uzależnione od gradientu ciśnienia złożowego i zawartości minerałów ilastych w formacjach złożowych. W przypadku braku analizy mineralogicznej przewiercanej formacji najczęściej używana solanka o odpowiedniej gęstości zawiera 3–7% KCl, spełniającego rolę inhibitora jonowego. Natomiast inhibitor polimerowy można stosować tylko w uzasadnionych przypadkach, np. gdy spodziewana jest znaczna dyspersja minerałów ilastych, ponieważ może on spowodować pogorszenie przepuszczalności skały zbiornikowej, wynikające z jego właściwości chemicznych. Gęstość cieczy przemywającej

powinna wytworzyć w odwiercie ciśnienie hydrostatyczne przekraczające ciśnienie złożowe minimum o 1,5 MPa, a w przypadku występowania łupków reaktywnych – pokonać wielkość ich wyłężenia wynikającą ze zmiany naprężeń w górotworze (Leosz, 2006).

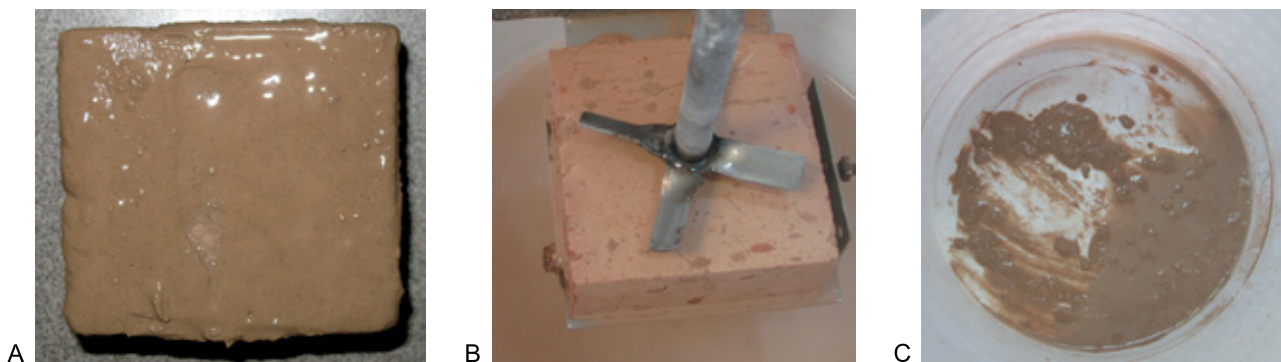
W składach tych cieczy mogą być stosowane również środki degradujące polimery stanowiące składniki płuczki do dowiercania, jak środki utleniające lub enzymatyczne. Zastosowane środki powinny być kompatybilne z polimerami zawartymi w składzie płuczki, a efektywność ich działania jest zależna od temperatury, pH i zasolenia.

W przypadku użycia enzymów efektywność rozkładu koloidów ochronnych (środki skrobiowe i celulozowe) występujących w osadzie filtracyjnym ulega obniżeniu w środowisku pH powyżej 7 i przy podwyższonej zawartości soli. Również wzrost temperatury (powyżej 60°C) ma wpływ na obniżenie aktywności niektórych środków enzymatycznych. Regulowanie wartości tych czynników oraz stężenia danego enzymu przyczynia się do zmiany struktury wytworzonego osadu, ułatwiając jego usuwanie i tym samym zwiększając efektywność procesu oczyszczania ściany odwiertu (Zima, 2011; Biały, 2016).

Najczęściej do usuwania osadów filtracyjnych wytworzonych przez płuczki zawierające polimery organiczne stosowane są środki o działaniu utleniającym. Ich działanie, jako związków o dużej elektrojemności, polega na stopniowym oddziaływaniu na główne łańcuchy polimeru, co powoduje ich rozrywanie na mniejsze fragmenty i w konsekwencji obniżanie masy molekularnej polimeru. Zawarte w osadzie polimery ulegają degradacji i sprzyjają jego łatwiejszemu usuwaniu (rys. 2). Środki te mogą być stosowane w środowisku o pH od 3 do 14 oraz w podwyższonej temperaturze, która zwiększa efektywność działania środka utleniającego. Przeprowadzone w INiG – PIB badania laboratoryjne wykazały, że wysoką skuteczność działania w usuwaniu osadów z płuczek o różnym zasoleniu miały nadmocznik i 35-procentowy podchloryn wapnia.

Jak wskazują doświadczenia przemysłowe, odwierty, w których zastosowano odpowiednią ciecz przemywającą, charakteryzowały się wysoką produktywnością i nie wymagały wykonywania zabiegów stymulacyjnych. Wskaźnikiem właściwego oczyszczenia strefy przyodwiertowej jest czystość cieczy wypływającej z odwiertu, która powinna być mniejsza niż 20 NTU. Zakłada się, że dla osiągnięcia takiej wartości do odwiertu należy zatłoczyć ciecz o czystości około 5 NTU. Taką czystość cieczy można uzyskać, stosując wyciszony system urządzeń do jej sporządzania i zatłaczania.

Innym rodzajem cieczy przemywających są ciecze o właściwościach myjących powierzchnie rur stosowane w procesie wymiany płuczki wiertniczej na ciecz nadpakerową. Zadaniem



Rys. 2. Usuwanie osadu z płuczki otworowej po działaniu cieczy przemywającej zawierającej podchloryn wapnia: A – utworzony osad, B – powierzchnia kostki po usunięciu osadu, C – wymyty osad na dnie naczynia

Fig. 2. Removal of sediment from drilling mud after treatment with a washing fluid containing calcium hypochlorite: (A) sediment, (B) surface of the cube after the sediment was removed and (C) sediment washed out at the bottom of the vessel

tej cieczy, która jest zatłaczana w celu zwiększenia stopnia czystości cieczy nadpakerowej pomiędzy bufor usuwający z odwiertu płuczkę wiertniczą a bufor stosowany przed zatłoczeniem cieczy nadpakerowej, jest wymycie wewnętrznych powierzchni rur okładzinowych i zewnętrznych powierzchni rur wydobywczych, zanieczyszczonych mieszaniną płuczki ze smarem używanym do skręcania rur.

Do sporządzania tego rodzaju cieczy przemywającej jako podstawowe jej składniki można wykorzystać środki powierzchniowo czynne, posiadające m.in. właściwości czyszczące, odtłuszczające i zwilżające powierzchnie stalowe oraz obniżające napięcie powierzchniowe. W celu zwiększenia efektywności działania najczęściej stosowana jest kompozycja środków powierzchniowo czynnych o różnych właściwościach i dobrej rozpuszczalności w wodzie.

Przy doborze tych środków należy uwzględniać ich charakter jonowy ze względu na kompatybilność z zatłaczanymi i znajdującymi się w odwiercie cieczami wiertniczymi oraz ograniczoną zdolność do pienienia podczas rozpuszczania w wodzie. W celu uniknięcia niekorzystnych reakcji ze składnikami cieczy wiertniczych środki te powinny być elektrycznie obojętne – niejonowe. Czynnikiem wspomagającym efekt zmywania zanieczyszczeń przez ciecz stanowiącą wodny roztwór tych środków jest także jej wartość pH, która powinna wynosić powyżej 9,0. Na podstawie przeprowadzonych w INiG – PIB badań laboratoryjnych opracowane zostały składy cieczy przemywających powierzchnie rur i zestawu wyposażenia wgłębnego z zanieczyszczeń utworzonych przez płuczki otworowe. Charakteryzują się one wysoką skutecznością wymywania zanieczyszczeń w warunkach temperatury do około 100°C (Uliasz et al., 2008).

Bufory do operacji linowych i oczyszczania rur

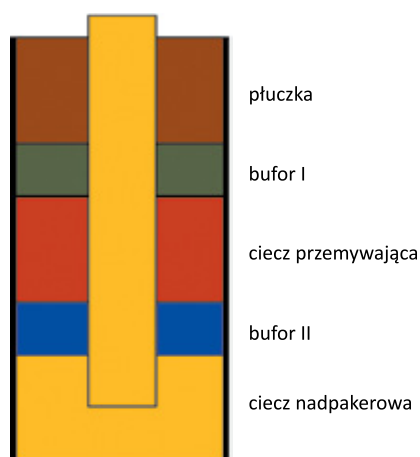
W operacjach linowych oraz w procesie wymiany płuczki na ciecz nadpakerową stosowane są ciecze, tzw. bufory, będące

wysokolepkimi zawiesinami koloidalnymi. Bufory do operacji linowych zatłacza się w strefę pakera w celu niedopuszczenia do osadzania się fazy stałej na korku zapiętym w łączniku posadowym oraz na tulei cyrkulacyjnej. Bufory te szczególnie pomocne są w przypadkach zbrojenia i opróbowania odwiertów wielohoryzontowych, gdy korek może być zapięty w łączniku posadowym nawet przez kilka tygodni.

Bufory, które stosowane są w procesach wymiany płuczki, działają jak „tłoki hydrauliczne”. Wypierając płuczkę wiertniczą z odwiertu, zabezpieczają przed jej opadaniem. Ich stosowanie jest konieczne w normalnej cyrkulacji, kiedy wypierana płuczka jest cięższa od solanki, oraz w otworach o kącie nachylenia większym niż 60°, niezależnie od sposobu cyrkulacji. Bufor powinien mieć gęstość zbliżoną do wypieranej płuczki i granicę płynięcia 1,5–2,0 razy większą niż płuczka, a jego wysokość w przestrzeni pierścieniowej nie powinna być mniejsza niż 90 m (Leosz, 2006). Do sporządzania tego rodzaju buforów stosowane są wysokolepkie środki celulozowe lub biopolimer.

Skuteczne wyparcie płuczki wiertniczej z odwiertu i oczyszczenie przestrzeni międzyrurowej jest jednym z czynników mających bezpośredni wpływ na stopień czystości zatłaczanej cieczy nadpakerowej, co pozwala na zachowanie w długim okresie odpowiednich jej właściwości. Dlatego w zabiegach tych wskazane jest stosowanie dwóch rodzajów cieczy buforowych oraz cieczy przemywającej w celu usunięcia resztek płuczki i innych zanieczyszczeń z rur. Bufor I, sporządzany na wodzie słodkiej, zatłaczany jest pomiędzy płuczkę wiertniczą, a ciecz przemywającą, natomiast bufor II, zasolony – pomiędzy ciecz przemywającą a ciecz nadpakerową (rys. 3).

Przeprowadzone w INiG – PIB badania laboratoryjne wykazały, że efektywność tego zabiegu w dużym stopniu zależy od właściwości technologicznych cieczy biorących w nim udział i od prędkości ich przetłaczania. Szczególnie ważne jest to, aby stosowane ciecze buforowe charakteryzowały się odpowiednimi właściwościami reologiczno-strukturalnymi i gęstością,



Rys. 3. Schemat wypełnienia odwiertu cieczami podczas zatłaczania cieczy nadpakerowej

Fig. 3. Diagram of a wellbore filling with fluids during the injection of packer fluid

zależnymi od właściwości wypieranej płuczki wiertniczej i zatłaczanej cieczy nadpakerowej, oraz kompatybilnością z wypieranymi i zatłaczanymi cieczami (Uliasz et al., 2008).

Przepływ buforów, spełniających rolę „łtek hydraulicznych”, w przestrzeni pierścieniowej powinien być turbulentny w celu zwiększenia efektywności wyparcia płuczki i zmniejszenia objętości zmieszanych cieczy. Jak wykazały badania, wypieraniu cieczy o dużej lepkości i wytrzymałości strukturalnej przez ciecz o niższych wartościach tych parametrów w przepływie laminarnym towarzyszyć będzie powstawanie dużych objętości zmieszanych cieczy i pozostawianie grubej przyściennej jej warstwy na ściankach rur, trudnej do usunięcia nawet przez ciecz przemywającą. Przepływ tych buforów najczęściej zależy jednak od wartości parametrów reologicznych cieczy, kierunku przepływu (prawy lub lewy obieg) oraz wielkości dopuszczalnego ciśnienia na zagłowiczeniu zestawu wydobywczego.

Zadaniem buforu II jest zwiększenie czystości cieczy nadpakerowej. Oddziela on dwie ciecze nieposiadające właściwości strukturalnych o różnych gęstościach, tj. ciecz przemywającą, o gęstości najczęściej $1,0 \text{ kg/dm}^3$, od cieczy nadpakerowej, roztworu soli o gęstości zależnej od warunków złożowych. W związku z tym bufor II powinien być kompatybilny z cieczą przemywającą i nadpakerową, mieć gęstość równoważną cieczy nadpakerowej i parametry reologiczno-strukturalne zabezpieczające przed zmieszaniem się cieczy nadpakerowej z cieczą przemywającą, a także pozwalające na usunięcie resztek zatłoczonych wcześniej cieczy.

Ciecz nadpakerowa

Przestrzeń pierścieniową pomiędzy rurami okładzinowymi a rurami wydobywczymi nad horyzontem produktywnym wypełnia ciecz nadpakerowa, o gęstości zależnej od gradientu

ciśnienia złożowego. Podstawowym jej zadaniem jest utrzymywanie szczelności pakera i ciśnienia hydrostatycznego wewnątrz rur okładzinowych w celu zapobiegania powstawaniu niebezpiecznego ciśnienia na kolumnę tych rur oraz dla ich ochrony przed korozją. Ponieważ ciecz nadpakerową pozostawia się w odwiercie nawet na kilka lat, powinna ona:

- charakteryzować się odpowiednimi właściwościami strukturalnymi, zapobiegającymi sedymentacji fazy stałej na paker;
- zawierać w swoim składzie środki, które nie będą powodować gęstnienia po długim czasie pod wpływem temperatury, ciśnienia lub dopływu solanek złożowych, uniemożliwiającego jej wytłoczenie;
- być kompatybilna z płynami złożowymi ze względu na możliwość powstawania osadów związków w wyniku reakcji chemicznych;
- sama w wystarczającym stopniu zapobiegać korozji rur, a także zabezpieczać je przed korozyjnym działaniem płynów złożowych w przypadku przedostawania się ich do przestrzeni pierścieniowej;
- przy prowadzeniu prac remontowych w odwiercie nie wywierać szkodliwego wpływu na skały produktywne w przypadku przedostania się do otworów perforacyjnych.

W roli cieczy nadpakerowej często pozostawiana jest płuczka wiertnicza stosowana podczas wiercenia otworu. Jednak zachowanie wymaganych jej właściwości, a szczególnie długoterminowej stabilności, w warunkach złożowych często może kończyć się niepowodzeniem. Termoutleniający rozkład polimerów zawartych w składzie płuczki prowadzi do obniżenia parametrów reologiczno-strukturalnych, powodując sedymentację fazy stałej na paker, jak i do obniżenia pH, a tym samym przyspieszenia procesów korozyjnych, będących przyczyną powstawania szczelin w rurach. Skutki działania korozyjnego zwiększają możliwość dopływu mediów złożowych (gazy kwaśne, solanki złożowe), powodujących dalsze obniżanie pH oraz interakcję ze składnikami płuczki i powstawanie dodatkowych ilości fazy stałej. Hamowanie przebiegu tych procesów w czasie jest możliwe tylko w określonym stopniu, jeżeli płuczka stosowana w charakterze cieczy nadpakerowej zostanie wcześniej poddana dodatkowej obróbce środkami regulującymi pH, ograniczającymi jej korozyjność i aktywność bakteryjną.

Mniejszego zakresu zabiegów technologicznych przed zatłoczeniem w przestrzeń międzyrurową wymagają ciecze nadpakerowe sporządzone jako czyste roztwory soli o różnych gęstościach, zależnych od rodzaju zastosowanej soli. Dobór rodzaju soli w celu otrzymania cieczy nadpakerowej o wymaganej gęstości należy przeprowadzić, biorąc pod uwagę występujące w odwiercie warunki geologiczno-złożowe, jak wielkość gradientu ciśnienia złożowego, występowanie gazów kwaśnych oraz stopień zmineralizowania solanek złożowych. Możliwość regulowania gęstości za pomocą ilości odpowiedniej

soli pozwala na sporządzanie cieczy nadpakerowej bez dodatkowego udziału materiałów obciążających i polimerów ułatwiających ich zawieszanie. Do najczęściej używanych soli do sporządzania cieczy nadpakerowej w warunkach przemysłowych należy NaCl. W niektórych przypadkach cieczą nadpakerową mogą być również roztwory K_2CO_3 . Maksymalna gęstość cieczy nadpakerowych sporządzonych przy użyciu tych soli mieści się w zakresie 1,2–1,58 kg/dm^3 . Taki zakres gęstości cieczy nadpakerowej można również uzyskać, stosując sól organiczną, jak HCOOK (Uliasz i Dycha, 2006).

Jednym z ważnych problemów występujących przy stosowaniu roztworów soli jako cieczy nadpakerowej jest ich korozyjność. Zależy ona od gęstości roztworu soli i jej rodzaju, wartości pH oraz produktów rozkładu termicznego danej soli, natomiast szybkość korozji – od temperatury, obecności gazów kwaśnych i od gatunku stali użytej do produkcji rur. Przy braku dostępu tlenu procesy korozji rur w roztworach soli można ograniczyć poprzez podwyższenie ich wartości pH do około 12 i obróbkę inhibitorem korozji przed zatłoczeniem do przestrzeni międzyrurowej. Nie można jednak wykluczyć lokalnego obniżenia pH cieczy nadpakerowej w miejscach zanieczyszczonych resztkami płuczki. Są to źródła powstawania m.in. jonów siarczanowych, będących silnymi utleniaczami, które korozyjnie oddziałują na rury wydobywcze. Ich działanie powoduje, że rury wydobywcze w środowisku cieczy o niższym pH stają się obszarami anodowymi i ulegają korozji wżerowej (Kośmider, 2016).

Innym ważnym problemem związanym ze stosowaniem tego rodzaju cieczy nadpakerowej jest kompatybilność z płynami złożowymi. Zatłoczona ciecz nadpakerowa nie powinna kontaktować się z płynami złożowymi, niemniej jednak przy występujących często nieszczelnościach w obrębie pakera eksploatacyjnego lub tulei cyrkulacyjnej należy brać pod uwagę dopływ tych płynów do przestrzeni międzyrurowej. Płyny te będą powodować przede wszystkim obniżenie pH cieczy nadpakerowej, bez względu na rodzaj soli użytej do jej sporządzania, oraz wytrącanie osadów związków chemicznych, głównie w przypadku użycia nieodpowiedniego rodzaju soli. Możliwość wystąpienia tych komplikacji wykazały badania laboratoryjne wykonane w INiG – PIB, w których wykorzystano roztwory K_2CO_3 i HCOOK o gęstości od 1,45 kg/dm^3 do 1,5 kg/dm^3 oraz roztwór NaCl o gęstości 1,2 kg/dm^3 . Sporządzone roztwory poddawano nasycaniu H_2S przez 60 min, co powodowało zmiany parametrów każdego z nich, opisane poniżej.

Roztwór K_2CO_3 :

- posiadał wysoką zdolność absorbowania H_2S (ok. 140 g/dm^3) z równoczesnym obniżaniem pH z 13,7 do 10,8;
- w obecności H_2S wytrącały się znaczne ilości osadu K_2S , które pod koniec badania wypełniły dużą objętość nasyconego roztworu;

- jego gęstość uległa obniżeniu z 1,48 kg/dm^3 do 1,27 kg/dm^3 (gęstość roztworu znad osadu).

Roztwór HCOOK:

- wraz ze wzrostem jego gęstości absorbowana ilość H_2S ulegała podwyższeniu od 6,25 g/dm^3 do 14,1 g/dm^3 , a wartość pH – obniżeniu z 12,4 do 8,1;
- gęstość jego roztworów uległa obniżeniu tylko o około 0,02 kg/dm^3 ;
- nasycenie H_2S praktycznie nie powodowało wytrącania osadu (minimalna ilość drobinek zawieszonych w roztworze).

Roztwór NaCl:

- zaabsorbował około 5,4 g/dm^3 H_2S w czasie 60 min;
- wartość pH podczas jego nasycania ulegała obniżeniu z 12,1 do 6,6;
- jego gęstość uległa obniżeniu z 1,2 kg/dm^3 do 1,19 kg/dm^3 ;
- nasycenie H_2S spowodowało powstawanie niewielkiej ilości osadu wytrącanego na dno naczynia.

Kolejne badania laboratoryjne przeprowadzone w warunkach otworopodobnych wykazały, że w przypadku dopływu wysokozmineralizowanych wód złożowych do odwiertu zatłoczonego roztworem K_2CO_3 w obecności H_2S będzie występowało wytrącanie dużych ilości osadów związków chemicznych sedymentujących na paker. Natomiast korzystniejszym pod tym względem działaniem charakteryzowały się roztwory HCOOK, których kompatybilne działanie zarówno z H_2S , jak i z wodami złożowymi o różnej mineralizacji nie powodowało, w temperaturze około 100°C, powstawania osadów związków chemicznych (Uliasz i Dycha, 2006).

Przeciwdziałanie zjawiskom korozyjnym w odwiertach powinno polegać przede wszystkim na utrzymaniu ciśnienia w dolnych częściach przestrzeni nadpakerowych na takim poziomie, aby niemożliwy był dopływ do nich jakiegokolwiek ilości płynów złożowych przez ewentualną nieszczelność w obrębie pakera eksploatacyjnego lub tulei cyrkulacyjnej. Cel ten tym łatwiej osiągnąć, im większa jest gęstość stosowanej cieczy nadpakerowej. Ograniczenie tego zjawiska można również uzyskać poprzez zwiększenie czystości zatłoczonej cieczy nadpakerowej, co zmniejszy prawdopodobieństwo powstania ogniwa stężeniowego.

Ciecze do perforacji

Ciecze stosowane do perforacji rur okładzinowych muszą być całkowicie oczyszczone i przefiltrowane w celu usunięcia nierozpuszczalnej fazy stałej i innych zanieczyszczeń, które mogą przenikać w kanały perforacyjne i zmniejszać efektywność ich działania. Jest to szczególnie ważne, kiedy zbrojenie odwiertu odbywa się przy małym ciśnieniu różnicowym pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym a złożowym.

Podstawową cieczą perforacyjną jest solanka, roztwór soli o gęstości zależnej od gradientu ciśnienia złożowego

i o odpowiednim stopniu czystości. Perforacje mogą być wykonywane również przy użyciu płuczki stosowanej w końcowej fazie wiercenia, lecz warunkiem dopuszczającym ją do wykorzystania jest dokładne usunięcie z niej fazy stałej. Natomiast w złożach o niskim ciśnieniu lub tam, gdzie koszty czasu urządzenia wiertniczego lub tłokowania są bardzo wysokie i konieczne jest uniknięcie skażenia strefy przyodwiertowej, rolę cieczy perforacyjnej może pełnić azot.

Podsumowanie

W celu zapobiegania problemom podczas prac związanych z udostępnieniem i serwisowaniem złóż węglowodorów konieczne jest stosowanie odpowiedniego rodzaju cieczy specjalnej. Właściwości technologiczne danej cieczy zależą od roli, jaką pełni w określonym zabiegu, oraz warunków geologiczno-technicznych występujących w odwiercie. Dobór składu wytypowanej cieczy do danego procesu technologicznego jest kluczowym czynnikiem przyczyniającym się do odpowiedniego przygotowania odwiertu do eksploatacji złoża i do ograniczenia uszkodzenia przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej.

Literatura

- Biały E., 2016. Wykorzystanie enzymów do udraźniania strefy przyodwiertowej po dowierceniach. *Nafta-Gaz*, 11: 926–933. DOI: 10.18668/NG.2016.11.05.
- Herman Z., Uliasz M., 2006. Ciecze robocze w rekonstrukcjach odwiertów. *Nafta-Gaz*, 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.
- Jasiński B., 2012. Badania nad zastosowaniem emulsji olejowo-wodnych jako cieczy roboczych o obniżonej gęstości. *Nafta-Gaz*, 12: 1155–1164.
- Kośmider J., 2016. Korozja rur w odwiertach naftowych. *Naftach, Zielona Góra*.
- Leosz A., 2006. Ciecze specjalne stosowane w procesie zbrojenia węgelnego odwiertów. *Konferencja Międzynarodowa pt. „Ciecze robocze i zabiegowe do prac serwisowych w odwiertach naftowych”*. Bóbrka, 27–28 kwietnia. *Materiały konferencyjne*.
- Uliasz M., 2008. Metody eliminacji zanieczyszczeń solanek złożowych stosowanych jako ciecze robocze przy rekonstrukcji odwiertów. *Nafta-Gaz*, 10: 710–720.
- Uliasz M., 2020. Ciecz robocza do rekonstrukcji odwiertów o obniżonym ciśnieniu złożowym. *Nafta-Gaz*, 7: 457–465. DOI: 10.18668/NG.2020.07.04.
- Uliasz M., Błaż S., Jasiński B., 2014. Właściwości technologiczne cieczy roboczych do rekonstrukcji odwiertów o podwyższonym i obniżonym ciśnieniu złożowym. *XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Problematyka udostępniania, rekonstrukcji i serwisowania złóż węglowodorów w Karpatach i na Niżu Polskim”*. Bóbrka, 3–5 września.
- Uliasz M., Chudoba J., 1999. Sole organiczne w zastosowaniu do cieczy wiertniczych. *X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna*. Kraków, 24–25 czerwca. *Wyd. AGH*.
- Uliasz M., Chudoba J., 2000. Beziłowa płuczka wiertnicza z blokatorom rozpuszczalnym w wodzie. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 8: 11–14.
- Uliasz M., Chudoba J., Herman Z., 2000. Ciecze do rekonstrukcji odwiertów. *I Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Problemy rekonstrukcji i likwidacji odwiertów ropnych i gazowych w Karpatach i na Przedgórzu”*. Bóbrka, 11–13 października.
- Uliasz M., Dycha J., 2006. Badania cieczy nadpakerowych dla odwiertów Niżu Polskiego w aspekcie ich kompatybilności z płynami złożowymi. *Nafta-Gaz*, 10: 515–521.
- Uliasz M., Herman Z., 2007. Wymagania i właściwości cieczy roboczych. *Konferencja z okazji 20-lecia Instytutu Problemów Nafty i Gazu Rosyjskiej Akademii Nauk*. Moskwa, 24–26 kwietnia. *Materiały konferencyjne*.
- Uliasz M., Nowotarski I., Błaż S., Zima G., 2008. Wymiana płuczki wiertniczej na ciecz nadpakerową w zastosowaniu cieczy buforowych i przemywających. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 150: 715–720. *Wydanie konferencyjne*.
- Uliasz M., Zima G., Błaż S., Jasiński B., 2016. Roztwory mrówczanów jako składniki płuczek wiertniczych. *Przemysł Chemiczny*, 95(2): 297–302.
- Zima G., 2011. Rozkład koloidów ochronnych płuczek wiertniczych środkami enzymatycznymi. *Nafta-Gaz*, 2011, 4: 249–253.



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