

**Małgorzata Uliasz\*, Zdzisław Herman\***

## **WYMAGANE PARAMETRY CIECZY ROBOCZYCH DLA OCHRONY PIERWOTNYCH WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ ZBIORNIKOWYCH**

### **1. WPROWADZENIE**

Prace w odwiertach naftowych związane m.in. z udostępnianiem złoża, przeprowadzeniem zabiegów stymulacyjnych oraz remontem wyposażenia wglębnego, mogą być prowadzone po zatłoczeniu odwiertu specjalną cieczą, tzw. cieczą roboczą. Winna ona zapewniać wytworzenie przeciwcisnienia na złożu, niedopuszczając do dopływu płynów złożowych do odwiertu, a równocześnie ułatwiać zapuszczanie narzędzi wiertniczych. Podstawowym jednak zadaniem cieczy roboczych jest jak najmniejsze uszkodzenie przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyodwiertowej. Ciecze te ze względu na spełnianą funkcję w odwiercie zostały wyodrębnione są w oddzielną grupę, do której zaliczane są wody złożowe (solanki), roztwory wodne jednego elektrolitu, dwóch, a nawet trzech elektrolitów oraz solanki z dodatkiem środków chemicznych, np. polimerów i blokatorów. Właściwości fizykochemiczne tych cieczy powinny odpowiadać określonym warunkom geologiczno-złożowym odniesionym do danego poziomu skał zbiornikowych. W związku z tym, że w większości piaskowcowych skał zbiornikowych występują minerały ilaste (m.in. kaolinity, illity, smektyty, chloryty, minerały mieszanopakietowe illit-smektyt), cieczą roboczą nie może być woda słodka, ponieważ spowodowałaby ona hydratację, pęcznienie, a nawet dyspersję substancji ilastej.

Najczęściej odwierty o „normalnych” ciśnieniach złożowych (0,01÷0,012 MPa/m) zatłaczane są cieczami roboczymi o gęstościach od 1020 do 1200÷1400 kg/m<sup>3</sup>, które sporządza się na podstawie soli nieorganicznych (NaCl, KCl), a w uzasadnionych przypadkach CaCl<sub>2</sub>. Natomiast dla zrównoważenia wyższych gradientów ciśnień złożowych (>0,012 MPa/m) stosowane są solanki ciężkie o gęstości do 2300 kg/m<sup>3</sup>. Najczęściej stosowanymi w przeszłości solankami ciężkimi były roztwory soli bromkowych (NaBr, KBr, CaBr<sub>2</sub> i ZnBr<sub>2</sub>). Ze względu na ich bardzo wysoki stopień toksyczności zaniechano ich sto-

---

\* Instytut Nafty i Gazu, Kraków

sowania w warunkach przemysłowych. Podjęte natomiast zostały, w tym także w INiG, szerokie badania w kierunku opracowania cieczy roboczych o alternatywnych zakresach gęstości do gęstości cieczy roboczych na osnowie soli bromkowych. Do sporządzania tych cieczy wykorzystano sole organiczne, tj. mrówczan potasu – HCOOK, mrówczan cezu – HCOOCs-H<sub>2</sub>O, mrówczan sodu – HCOONa oraz octan potasu – CH<sub>3</sub>COOK. Cechą szczególną soli organicznych jest ich dobra rozpuszczalność w wodzie, co pozwala na otrzymywanie roztworów tych soli o gęstościach od 1030 do 2300 kg/m<sup>3</sup> oraz nietoksyczność i biodegradowalność ograniczające szkodliwość ich oddziaływania na środowisko w okresie dowiercania, opróbowania i rekonstrukcji.

## 2. ZADANIA I WŁAŚCIWOŚCI CIECZY ROBOCZYCH

Ciecz robocza wypełniająca odwiert powinna spełniać nałożone na nią funkcje tak, aby prowadzone prace zakończone zostały pozytywnym efektem techniczno-ekonomicznym, przy jak najmniejszym uszkodzeniu przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyodwiertowej.

O wielkości uszkodzenia przewodności hydraulicznej skał zbiornikowych decyduje rodzaj oraz właściwości chemiczne 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 z powodu braku głównie materiału rdzeniowego. Na podstawie kompleksowych badań laboratoryjnych, prowadzonych w INiG oraz prób przemysłowych [5–7, 11, 13] ustalono podstawowe kryteria doboru składu i właściwości cieczy roboczej, która powinna:

- charakteryzować się właściwym stopniem czystości;
- posiadać odpowiednią gęstość, właściwości reologiczne, filtrację i pH;
- charakteryzować się właściwościami inhibitującymi;
- zapobiegać korozji osprzętu;
- zmniejszać napięcie powierzchniowe na granicy rozdziału faz;
- zapobiegać interakcji z płynami złożowymi, a zwłaszcza z wodą złożową.

Zapewnienie takich właściwości stosowanej cieczy w dużym stopniu winno przyczynić się do ograniczenia jej szkodliwego oddziaływania na strefę przyodwiertową, zapobiegając:

- zmniejszaniu średnicy kanałów porowych przez cząstki stałe unoszone wraz z przepływającą solanką;
- tworzeniu korków iłowych w kanałach porowych powstających na skutek pęcznienia substancji ilastej obecnej w skale zbiornikowej;
- odkładaniu się w kanałach porowych osadów trudnorozpuszczalnych powstałych w wyniku wymiany jonowej pomiędzy użytą cieczą roboczą, a solanką złożową lub rozpuszczenia materiału cementującego szkielet skały;
- powstawaniu blokad wodnych lub emulsyjnych w kanałach porowych oraz zmianie zwilżalności skały zbiornikowej w wyniku wzajemnego oddziaływania cieczy roboczych z płynami złożowymi.

Istotnym czynnikiem, mającym duży wpływ na wielkość uszkodzenia skały zbiornikowej, jest czystość solanek. Wtłaczane do odwiertu solanki mogą zawierać zanieczyszczenia mechaniczne, których źródłem może być woda, sól, cząstki ilaste, krzemionka, a także niedokładnie wyczyszczone systemy urządzeń do ich sporządzania i zatłaczania. Zabiegi te wiążą się z ryzykiem kolmatacji przestrzeni porowej skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej. Nawet niewielka zawartość tych zanieczyszczeń (powyżej  $0,1 \text{ g/dm}^3$  o wymiarach większych od  $2 \mu\text{m}$ ) 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. W przypadku skał zbiornikowych o małej i bardzo małej przepuszczalności faza stała zostaje odfiltrowana na powierzchni ściany otworu i nie wywiera na ogół większego wpływu na przepuszczalność.

Niebezpieczne dla strefy przyodwiertowej są również zanieczyszczenia o charakterze chemicznym, występujące głównie w solankach złożowych, w postaci wytrącających się osadów różnych związków chemicznych. Z solanek złożowych, przechowywanych w zbiornikach naziemnych, ulatniają się gazy, wytrącają się węglany i siarczany, a przede wszystkim ulegają one nasyceniu tlenem, co przyspiesza reakcje powstawania brunatnych osadów wodorotlenku żelaza.

W celu zapobieżenia zjawisku kolmatowania strefy przyodwiertowej należy usuwać zanieczyszczenia mechaniczne i chemiczne poprzez filtrowanie solanek złożowych. Filtrowania będą wymagały również solanki stanowiące wodne roztwory soli, jeżeli do ich sporządzania użyta zostanie zanieczyszczona woda i sól techniczna, a także zbiorniki. Często skład chemiczny solanki złożowej nie odpowiada danym warunkom geologiczno-złożowym i w związku z tym po usunięciu zanieczyszczeń mechanicznych konieczna jest jej obróbka chemiczna poprzez dodatek NaOH i soli, które spowodować mogą dalsze wytrącanie się osadów związków chemicznych niekorzystnie oddziałujących na skały zbiornikowe. Powstałe wtórne osady chemiczne takie, jak związki żelaza lub wapnia wymagają usunięcia ich na drodze ponownego filtrowania solanki już zmodyfikowanej. W związku z tym na czystość solanki składają się nie tylko zanieczyszczenia towarzyszące jej sporządzaniu, odbieraniu i magazynowaniu, lecz również zanieczyszczenia powstałe w trakcie niezbędnej modyfikacji składu chemicznego solanki złożowej. Przed zatłoczeniem solanki do otworu należy oznaczyć jej stopień czystości zgodnie z normą API RP 13J za pomocą turbidimetru. Pomimo oczyszczenia, przefiltrowania solanki, istnieje zagrożenie ponownego jej zanieczyszczenia w przewodach tłoczących i rurkach pompowych podczas tłoczenia do odwiertu jak również w samym odwiercie. Dlatego przed zatłoczeniem solanki należy również zwracać uwagę na czystość stosowanego osprzętu i przepłukanie odwiertu.

Dla wytworzenia przeciwcisnienia na złożo wymaga się, aby zatłoczona ciecz posiadała odpowiednią gęstość, która nie powinna być większa niż to potrzebne do kontroli ciśnienia złożowego. W celu zapewnienia najmniejszego uszkodzenia przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej, prace w odwiercie winny być prowadzone przy małych różnicach ciśnień, a ciśnienie hydrostatyczne wytworzone przez słup cieczy roboczej powinno mieścić się w zakresie ok.  $0,1 \div 0,2 \text{ MPa}$  ponad wartość ciśnienia złożowego. Przy doborze wymaganej gęstości solanki dla określonych warunków złożowych należy uwzględniać obniżanie się jej gęstości, spowodowane wzrostem temperatury. Ma to istotne znaczenie, zwłaszcza dla solanek ciężkich stosowanych w odwiertach głębokich o wysokim ciśnieniu

złożowym i dobrej przepuszczalności skał zbiornikowych, gdzie utrzymywana jest niewielka różnica ciśnień. Zgodnie z normą API RP 13J gęstość solanek oznacza się za pomocą wagi płuczkowej lub aerometru.

Przy sporządzaniu solanek ciężkich o określonej gęstości, stanowiących głównie roztwory wielosolne, należy również zwracać uwagę na temperaturę krystalizacji, którą można regulować poprzez zmianę stężenia zastosowanych soli, mając na celu zapobieżenie wytrącaniu się kryształków najmniej rozpuszczalnej soli. Pomiar temperatury krystalizacji wykonywany jest przy użyciu specjalnej aparatury (Crystalization Brine Kit) zgodnie z normą API RP 13J w trzech punktach pomiarowych określając temperaturę pojawienia się pierwszego kryształku (FCTA), rzeczywistą temperaturę krystalizacji, przy której solanka krystalizuje (TCT) i temperaturę zaniku ostatniego kryształku (LCTD).

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 wypłukiwanego zasypu, cząstek przewierczanych skał lub frezowanego osprzętu węgłnego, wymagane są wyższe jej parametry reologiczne, które reguluje się dodatkami zagęstnika (XCD) lub koloidów ochronnych (preferowane są środki skrobiowe ze względu na łatwiejszy, w porównaniu do środków celulozowych, rozkład biologiczny i degradację pod wpływem cieczy kwasującej). Obróbka solanki tymi środkami wpłynie równocześnie na podwyższenie właściwości reologicznych i ograniczenie infiltrowania w pory skały dużych jej objętości.

Testy laboratoryjne, wykonane w symulowanych warunkach otworowych przy użyciu zestawu aparatury do badań przepuszczalności absolutnej i względnej dla ropy i gazu, wskazują jednak, że stosowanie polimerów będzie powodować znaczne, niekiedy trwałe, pogorszenie przepuszczalności skały w strefie przyodwiertowej. Powodowane jest to tym, że zanim powstanie na ścianie odwiertu osad filtracyjny, część solanki wraz z polimerem będzie głęboko wnikać do złoża, a w szczególności w pory skał zbiornikowych o średniej i dużej przepuszczalności. Ograniczenie uszkodzenia przepuszczalności warstwy produktywnej w strefie przyodwiertowej potwierdzają wyniki kolejnych testów laboratoryjnych, w których zastosowano solanki z dodatkiem polimeru i blokatora o wymiarach cząstek dobranych do wymiarów por w skale, jako tzw. składnik mostkujący dla cieczy.

Zastosowanie blokatora o różnej wielkości ziarn pozwala na utworzenie w przypowierzchniowych porach skały zbiornikowej bariery, osnowy dla osadu filtracyjnego powstającego na ścianie otworu wiertniczego, 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, którego ilość należy uwzględnić przy doborze gęstości cieczy roboczej.

Najczęściej w składach cieczy roboczych stosowane są blokatory węglanowe ze względu na ich łatwą rozpuszczalność w kwasie solnym i małe pozostałości poreakcyjne. W roli blokatora można również stosować sól kamienną ziarnistą (NaCl), która jest jednym z podstawowych składników płuczki solno-polimerowej opracowanej w INiG. Płuczka ta może być stosowana do dowiercania złóż otworami poziomymi oraz jako ciecz robocza do zatłaczania odwiertów. Zastosowanie w składzie płuczki soli ziarnistej o wymiarach dopa-

sowanych do wymiarów por przewiercanej skały, w kombinacji z polimerami powoduje, że powstały na ścianie otworu solno-polimerowy osad filtracyjny można łatwo usunąć przez przepłukanie roztworem niskozmineralizowanej solanki [10].

Zatłaczana do odwiertu ciecz robocza oprócz właściwych parametrów reologicznych i filtracji musi posiadać także odpowiednią wartość pH. Na podstawie różnych badań laboratoryjnych stwierdzono, że wysoka wartość pH (powyżej 10) cieczy roboczej powoduje w skałach piaskowcowych rozpuszczenie krzemionki amorficznej uwalniając drobniejsze cząstki skały, które migrując z tą cieczą w głąb skały mogą blokować przewężenia kanałów porowych. Natomiast w skałach zawierających frakcję ilastą nasilają się zjawiska związane z hydratacją i dyspersją minerałów ilastych, ponieważ filtrat zawierający jony  $\text{OH}^-$  odznacza się dużą ruchliwością i łatwiej wnika pomiędzy pakiety minerałów ilastych aniżeli woda.

Zbyt niska wartość pH (poniżej 7) cieczy roboczej jest przyczyną powstawania korozji osprzętu wiertniczego. W związku z tym zaleca się, aby wartości pH solanek i cieczy roboczych mieściły się w zakresie 8,5÷9,5.

Przy projektowaniu składu cieczy roboczej należy również zwrócić uwagę na środki chemiczne mające pośredni wpływ na właściwości cieczy roboczych, a mianowicie inhibitor korozji oraz biocyd. Jak wykazały badania, bez względu na rodzaj soli nieorganicznej użytej do sporządzania cieczy roboczej należy stosować inhibitory wiążące tlen i zmniejszające korozję. Natomiast podczas stosowania cieczy o niskim stopniu mineralizacji niezbędne jest dodawanie biocydu celem ograniczenia biodegradacji koloidu ochronnego i środka strukturotwórczego na czas wykonywania zabiegu.

Jednym z ważnych kryteriów doboru składu cieczy roboczych do danych warunków geologiczno-złożowych są jej właściwości zapobiegające hydratacji minerałów ilastych. Większość piaskowcowych skał zbiornikowych zwiera 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  $\text{KCl}$  lub  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , pełniącymi rolę inhibitorów jonowych.

Ograniczenie hydratacji minerałów ilastych za pomocą elektrolitów związane jest [8]:

- ze zmniejszeniem hydratacji powierzchniowej na skutek zastąpienia jonów zawartych w kompleksie wymiennym  $\text{H}_2\text{O}$  jonami o mniejszej liczbie hydratacji,
- z regulowaniem procesów hydratacji osmotycznej poprzez utrzymywanie większego stężenia elektrolitu w cieczy aniżeli w skale,
- z przeobrażaniem minerałów ilastych, którego wynikiem jest ich dehydratacja oraz hydrofobizacji powierzchni tych minerałów.

Dotychczas sądzono, że solanki złożowe odebrane z tego samego lub sąsiedniego złoża, to najbardziej odpowiedni rodzaj cieczy roboczych. Takie przeświadczenie jest jednak błędne, ponieważ jak wykazano wyżej, skład chemiczny każdej odebranej wody złożowej (solanki) na powierzchni różni się od składu solanki w warunkach złożowych. Kryteria decydujące o ponownym zatłoczeniu solanki do odwiertu, to głównie jej właściwości inhibitoryjne, gęstość, wartość pH. W większości przypadków, naturalne wody złożowe nie spełniają założonych kryteriów. W związku z tym, właściwości tych wód złożowych (solanek) wymagają

modyfikacji poprzez obróbkę odpowiednimi środkami chemicznymi i solami, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zawartość inhibitora jonowego, szczególnie kationu  $K^+$ .

Wymagane stężenie KCl w solance celem zabezpieczenia skały przed hydratacją można ustalić na podstawie pomiarów czasu kapilarnej nasiąkliwości ( $t_{CST}$ ) wykonanych za pomocą miernika Capillary Suction Timer. Natomiast właściwości inhibitacyjne zastosowanej solanki określa się na podstawie ilości odzyskiwanej próbki skały dyspergowanej w środowisku badanej solanki przy użyciu pieca obrotowego typu *rollen oven*.

Oprócz inhibitorów jonowych, których mechanizm inhibitującego działania polega na hydrofobizacji powierzchni minerałów ilastych, wyrażającej się zmniejszeniem zwilżalności skały przez filtrat, w składzie cieczy roboczych można stosować także środki powierzchniowo czynne (SPCz). Podstawowym zadaniem SPCz jest obniżanie napięcia powierzchniowego na granicy faz, zmniejszanie sił molekularnego oddziaływania filtratu z cieczą z powierzchnią kanałów porowych, zdolność do modyfikacji powierzchni tych kanałów poprzez inhibitowanie minerałów ilastych oraz działanie deemulgujące. Filtrat z cieczy charakteryzujący się obniżonym napięciem powierzchniowym, wnikając do porów skały zbiornikowej będzie ulegał dyspersji do drobnych kropelek, co ułatwi jego wypieranie przez płyn złożowy ze strefy przyodwiertowej dzięki obniżeniu ciśnienia kapilarnego. Zastosowany w składzie cieczy SPCz będzie także zapobiegał zjawisku dyspergowania i emulgowania wody w ropie i ropy w wodzie i tym samym powstawaniu blokad emulsyjnych w kanałach porowych skał w strefie przyodwiertowej. Aktywność powierzchniową danego SPCz i jego stężenie w cieczy roboczej można określić prowadząc pomiary napięcia powierzchniowego na granicy filtrat – gaz, filtrat – ropa przy użyciu tensjometru.

Projektując skład cieczy roboczej, a szczególnie sporządzanej na osnowie solanki stanowiącej roztwór jednej lub kilku soli, należy uwzględnić nie tylko jej wpływ na właściwości skały zbiornikowej i wielkość wywieranego ciśnienia na złożo, ale także interakcje z wodami złożowymi. Niewłaściwy dobór składu takiej cieczy do występujących wód złożowych będzie także powodował pogorszenie przepuszczalności skał strefy przyodwiertowej. Związane jest to z reakcjami chemicznymi solanki ze składnikami wody złożowej, w wyniku których może następować strącanie nierozpuszczalnych związków chemicznych blokujących przestrzeń porową skały. Dotyczy to głównie solanek sporządzonych przy użyciu chlorku wapnia. W wyniku zetknięcia się roztworu tej soli z wodą złożową zawierającą aniony m.in. wodorowęglanowe  $HCO_3^-$  czy węglanowe  $CO_3^{2-}$  będzie wytrącać się osad węglanu wapnia. Także obecność jonów żelaza ( $Fe^{2+}$  i  $Fe^{3+}$ ) w wodach złożowych oraz w solankach, do sporządzania których użyto wody i soli technicznych zawierających jego związki, powoduje powstawanie w obecności jonów  $OH^-$ , pochodzących z wodorotlenków używanych do regulowania wartości pH tych solanek, wodorotlenku żelazowego lub żelazowego w postaci brunatnych płatków tworzących w osad [1].

### **3. RODZAJE CIECZY ROBOCZYCH I ICH WPŁYW NA PRZEPUSZCZALNOŚĆ SKAŁ ZBIORNIKOWYCH**

Rola cieczy roboczych stosowanych do różnych zabiegów technologicznych prowadzonych w odwiercie wymusza na ich wykonawcach, aby właściwości cieczy były dobierane zarówno do rodzaju wykonywanego zabiegu jak i występujących warunków geologicz-

no-złożowych. Kierując się ochroną złoża, wykonawca prac po analizie czynników (geologicznych, złożowych i technologicznych) stwarzających zagrożenie pogorszenia przepuszczalności skał zbiornikowych, powinien na etapie projektowania danego zabiegu określić kryteria dotyczące doboru składu i właściwości cieczy roboczych, uzasadniając je wynikami wcześniej przeprowadzonych badań laboratoryjnych zmian przepuszczalności skał dla rozpatrywanego poziomu zbiornikowego po oddziaływaniu proponowanej cieczy.

Badania laboratoryjne rdzeni wiertniczych potwierdzają, że każdy kolektor wymaga indywidualnego doboru cieczy roboczych. Prawdłowo dobrana ciecz robocza pozwala zachować 70÷80% pierwotnej przepuszczalności bez stosowania dodatkowych zabiegów, natomiast zastosowanie nieodpowiedniej cieczy może doprowadzić nawet do całkowitej utraty przepuszczalności.

Stosowane w warunkach przemysłowych ciecze robocze sporządzane są na osnowie solanki i mogą to być:

- solanki bez fazy stałej, czyli:
  - roztwory soli sporządzane, w zależności od wymaganej gęstości, z pojedynczych soli nieorganicznych ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ) lub organicznych ( $\text{HCOOK}$ ,  $\text{HCOONa}$ ,  $\text{HCOOCs} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOK}$ ) oraz mieszanek kilku różnych soli, tzw roztwory wielosolne, 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 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.

### **Ciecze robocze jako solanki bez fazy stałej**

Do sporządzania solanek bez fazy stałej stanowiących wodne roztwory soli o gęstości do  $1200 \text{ kg/m}^3$  najczęściej stosowany jest  $\text{NaCl}$  i  $\text{KCl}$  oraz mieszaniny tych soli. Do sporządzania solanek w takim zakresie gęstości można również stosować  $\text{HCOONa}$ , gdyż max. gęstość nasyconego roztworu tej soli wynosi  $1290 \text{ kg/m}^3$ . Natomiast, gdy zachodzi potrzeba użycia solanki o gęstości powyżej  $1200 \text{ kg/m}^3$  do  $1400 \text{ kg/m}^3$ , możliwe jest w uzasadnionych przypadkach stosowanie  $\text{CaCl}_2$  lub mieszaniny np.  $\text{CaCl}_2$  z  $\text{KCl}$ . 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 powstawania osadów z wytrąconych związków chemicznych korzystniej jest stosować sole organiczne, np.  $\text{HCOONa}$  oraz  $\text{CH}_3\text{COOK}$  lub  $\text{HCOOK}$ , które charakteryzują się kompatybilnością z wodami złożowymi zawierającymi, m.in.  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Proponowane do zastosowania przemysłowego sole organiczne zastąpiły niebezpieczne dla środowiska sole bromkowe, które zostały wycofane z użycia w warunkach otworowych. Sole organiczne charakteryzujące się dobrą rozpuszczalnością w wodzie, wykorzystywane są głównie do sporządzania solanek ciężkich, ponieważ gęstości roztworów wodnych przy pełnym zasoleniu wynoszą dla:  $\text{CH}_3\text{COOK}$  –  $1330 \text{ kg/m}^3$ ,  $\text{HCOOK}$  –  $1560 \text{ kg/m}^3$ ,  $\text{HCOOCs-H}_2\text{O}$  –  $2010 \text{ kg/m}^3$ . Przedstawione wartości gęstości tych silnie higroskopijnych soli otrzymywano podczas badań laboratoryjnych prowadzonych w INiG, rozpuszczając w  $1 \text{ dm}^3$  wody odważone ilości chemicznie czystych soli. Przeprowadzone badania wykazały również, że istnieje możliwość sporządzenia roztworu stanowiącego mieszaninę soli organicznych o gęstości  $1520 \text{ kg/m}^3$  przy zastosowaniu  $\text{HCOONa}$  do pełnego nasycenia oraz ustalonej doświadczalnie ilości  $\text{HCOOK}$  [12]. Ze względu na właściwości chemiczne soli organicznych sporządzanie solanek w warunkach polowych jest niemożliwe, dlatego przed zabiegiem dostarczane są w pojemnikach jako gotowe roztwory o wymaganej gęstości.

Proponując te ciecze do stosowania przemysłowego, należy jednak liczyć się z kosztami ich sporządzenia w związku z wyższą ceną tych soli w porównaniu do soli chlorkowych. Uwzględniając koszty ekonomiczne sporządzenia cieczy powinny one znaleźć wielokrotne zastosowanie. Może to jednak nastąpić po uprzednim ich oczyszczeniu z zanieczyszczeń mechanicznych oraz regeneracji właściwości i gęstości. Oczyszczone solanki należy przechowywać w czystych zamkniętych zbiornikach.

Kolejnym rodzajem solanek bez fazy stałej są solanki (wody) złożowe, które przed zatłoczeniem do odwiertu, wymagają licznych zabiegów przygotowawczych obejmujących:

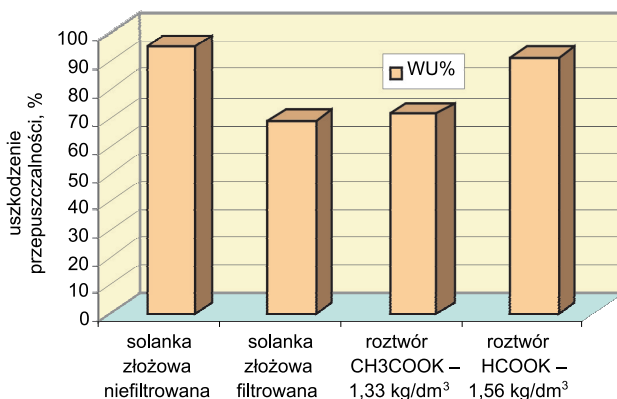
- usunięcie z niej zanieczyszczeń mechanicznych przez filtrowanie,
- zmodyfikowanie składu chemicznego wody złożowej celem podwyższenia jej gęstości i tym samym właściwości inhibitacyjnych oraz wartości pH,
- ponowne filtrowanie zmodyfikowanej solanki celem usunięcia zanieczyszczeń chemicznych dla uzyskania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

Przeprowadzenie tych zabiegów jest koniecznością ze względu na zawartość w solankach złożowych różnych zanieczyszczeń oraz nieodpowiedni ich skład chemiczny, ograniczając tym samym intensywności zjawisk powodujących pogorszenie przepuszczalności skały zbiornikowej jak pęcznienie, dyspergowanie czy kolmatowanie strefy przyodwiertowej.

Stosowanie solanek bez fazy stałej pomimo zapewnienia im odpowiednich właściwości będzie charakteryzowało dużą infiltracją do złoża, powodując uszkodzenie przepuszczalności skał w strefie przyodwiertowej (rys. 1). Jeżeli takie objętości solanki przefiltrują przez niewielką powierzchnię ściany otworu w interwale złożowym lub przez otworki perforacyjne to nawet przy minimalnym jej zanieczyszczeniu nastąpi zakolmatowanie strefy przyodwiertowej. Zbyt duże ubytki solanki spowodowane jej ucieczką do złoża mogą być przyczyną erupcji płynu złożowego ze względu na spadek przeciwcisnienia na złożo. Natomiast brak ubytków solanki wskazuje na zakolmatowanie strefy przyodwiertowej zanieczyszczeniami. Na skutek infiltrowania solanki w złożo już częściowo szcerpane, gdzie istnieje duża różnica ciśnień między ciśnieniem hydrostatycznym solanki a ciśnieniem złożowym, uszkodzenie przepuszczalności może spowodować także jej prędkość przepływu w przestrzeni porowej. Dowiedziona została, że istnieje pewien krytyczny wydatek mikroprzepływu solanki przez skałę porowatą, powyżej którego zachodzi obniżenie przepusz-



czalności. Powodują je zrywane cząstki iłu lub innych materiałów z powierzchni porów i unoszone z dużą prędkością przez przepływającą ciecz tworzą usieciowaną strukturę blokującą przewodzenia w przestrzeni porowej [4].



**Rys. 1.** Wpływ oddziaływania niefiltrowanych i filtrowanych wód złożowych oraz roztworów soli na zmiany przewodności hydraulicznej piaskowca „wzorcowego”

### Ciecze robocze jako solanki zawierające fazę stałą

Solanki charakteryzujące się właściwościami reologiczno-strukturalnymi oraz obniżoną filtracją to ciecze, których podstawowym składnikiem jest roztwór soli z dodatkiem koloidów ochronnych lub zagęstników oraz blokatora. Ten rodzaj cieczy roboczej do prac rekonstrukcyjnych został opracowany w oparciu o wyniki wieloletnich badań przepuszczalności skał zbiornikowych częściowo eliminując czyste solanki powszechnie stosowane na początku lat 70.

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 por w skale, którymi mogą być: węglan wapnia lub zwymiarowany chlorek sodu.

Zastosowanie w składzie cieczy roboczej układu polimer – blokator przede wszystkim zapobiega uszkodzeniu przepuszczalności poziomów produktywnych w wyniku utworzenia na ścianie otworu efektywnej bariery ograniczającej migrację filtratu do złoża, a także korzystnie wpływa na właściwości inhibitacyjne sporządzonej cieczy, co potwierdzają kompleksowe badania laboratoryjne prowadzone w INiG (rys. 2, 3).

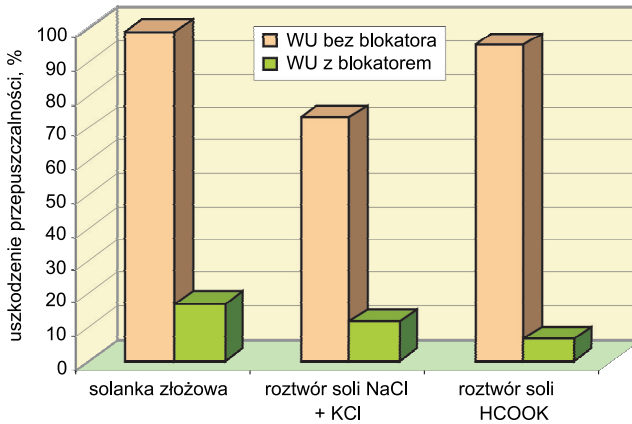
Przy opracowywaniu receptury cieczy roboczej sporządzanej zarówno na wodzie złożowej, jak i na wodnych roztworach soli należy uwzględnić kolejność wykonywania zabiegów i dodawania poszczególnych składników w celu uzyskania jednorodnej suspensji. Je-

żeli w składzie cieczy roboczej na osnowie wody złożowej przewiduje się stosowanie poli-  
meru i blokatora, należy:

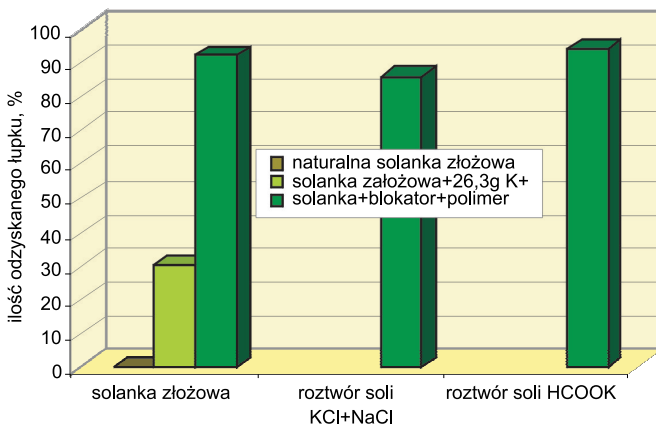
- usunąć zanieczyszczenia mechaniczne;
- podwyższyć wartość pH > 8,0 i zdyspergować koloid ochronny, a następnie wprowadzić ustalone doświadczalnie ilości soli i blokatora.

Natomiast stosując wodne roztwory soli jako cieczy robocze, należy:

- w czystej wodzie zdyspergować koloid ochronny,
- wprowadzić ustalone doświadczalnie ilości soli oraz blokatora i w razie konieczności podwyższyć wartość pH.



**Rys. 2.** Zmiany przewodności hydraulicznej piaskowca „wzorcowego” pod wpływem oddziaływania cieczy roboczych bez i z dodatkiem blokatora



**Rys. 3.** Ilości odzyskiwanego łupku miocenińskiego dyspergowanego w solankach bez fazy stałej oraz zawierającej fazę stałą

#### 4. PODSUMOWANIE

Podstawowym zadaniem cieczy roboczych, zatłaczanych do odwiertu jest zapewnienie wytworzenia przeciwcisnienia na złożu, nie dopuszczenie do przepływu płynów złożowych do odwiertu oraz ułatwienie zapuszczania narzędzi wiertniczych. Celem nadrzędnym tej cieczy jest jak najmniejsze uszkodzenie przepuszczalności skały zbiornikowej w strefie przyodwiertowej. Przeprowadzone badania pod kątem zmian przepuszczalności skał zbiornikowych po oddziaływaniu cieczy roboczych sporządzonych na podstawie wód złożowych (solanek) i wodnych roztworów soli wykazały, że:

- zatłoczona do odwiertu ciecz powinna posiadać odpowiedni stopień czystości (poniżej 20NTU);
- w składzie cieczy należy stosować polimer i blokator;
- w zależności od warunków geologiczno-złożowych, a przede wszystkim składu mineralogicznego skał zbiornikowych ze względu na zawartość minerałów ilastych, należy dokonać doboru ilości i rodzaju środków chemicznych w składzie cieczy zatłaczanej do odwiertu.

W związku z tym, że podstawowym celem prac w odwiercie eksploatacyjnym jest zwiększenie wydajności poziomów produktywnych, wszystkie czynniki powodujące wzrost pogorszenia przepuszczalności skał zbiornikowych, a szczególnie te, które wykonawca prac rekonstrukcyjnych może wyeliminować już na etapie ich projektu, należy przeanalizować w połączeniu z rachunkiem ekonomicznym całego przedsięwzięcia.

#### LITERATURA

- [1] Ali S.A., Shelby D.C., Foxenberg W.E., Freeman M.: *Guidelines for rig-site removal of iron contamination from completion brines*. Petroleum Engineer International. February, 1999
- [2] Choł B.E.: *Židkosti dla remontnych rabot w skważinach. Część 1*. Chemiczeskije swojstwa powierzchnostno-aktywnych wieszczestw. Nieft', gaz i nieftiechimia za rubieżom, nr 5, 1986
- [3] Formation Damage: *SPE Reprint Series no.29. Richardson 1990*
- [4] Gray R.G., Darley H.C.H.: *Composition and properties of oil well drilling fluids*. 1980
- [5] Herman Z., Uliasz M., Chudoba J.: *Wpływ cieczy zasolonych na zmiany przepuszczalności skał porowatych w świetle badań laboratoryjnych*. I Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy rekonstrukcji i likwidacji odwiertów ropnych i gazowych w Karpatach i na Przedgórzu”, Bóbrka 11–13 październik 2000
- [6] Herman Z., Uliasz M.: *Zmiany przepuszczalności skał porowatych pod wpływem oddziaływania cieczy zasolonych*. Wiadomości Naftowe i Gazownicze 2001, nr 9, 12–20, bibliogr. 18 poz.
- [7] Herman Z., Uliasz M.: *Rola cieczy roboczych w rekonstrukcji odwiertów*. Nafta–Gaz 2002, nr 2, 95–106, bibliogr. 6 poz.
- [8] Raczkowski J., Pólchłopek T.: *Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych*. Prace INiG nr 95, Kraków, 1998

- [9] Suman G., Ellis R., Snyder R.: *Sprawocznik po kontroli i borbie s pieskoprojawnieniami w skważinach*. Moskwa, Nedra 1986 (tłum. z jęz. ang.)
- [10] Uliasz M., Chudoba J.: *Bezilowa płuczka wiertnicza z blokatorom rozpuszczalnym w wodzie*. Wiadomości Naftowe i Gazownicze 2000, nr 8, 11–14, bibliogr. 6 poz.
- [11] Uliasz M., Herman Z., Chudoba J.: *Ciecze do rekonstrukcji odwiertów*. I Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Rekonstrukcji i Likwidacji Odwiertów Ropnych i Gazowych w Karpatach i na Przedgórzu”, Bóbrka 11–13 październik 2000
- [12.] Uliasz M., Herman Z.: *Nowe rodzaje cieczy roboczych bezpieczne dla środowiska*. WUG Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, nr 9(109)/2003, 7–10, bibliogr. 6 poz.
- [13] Uliasz M., Herman Z.: *Wpływ solanek złożowych i cieczy roboczych na przepuszczalność skał zbiornikowych w złożach gazowych miocenu*. Konferencja Międzynarodowa „Ciecze robocze i zabiegowe do prac serwisowych w odwiertach naftowych”, Bóbrka, 27–28 kwietnia 2006, materiały konferencyjne
- [14] Yan J., Jiang G., Wang F., Fan W., Su Ch.: *Characterization and Prevention of Formation Damage During Horizontal Drilling*. SPE Drilling & Completion, December 1998