

Piotr Kasza*

ZASTOSOWANIE BIOPREPARATÓW DO ZWIĘKSZANIA EFEKTYWNOŚCI HYDRAULICZNEGO SZCZELINOWANIA SKAŁ

W ostatnich latach coraz szersze zastosowanie w wielu dziedzinach gospodarki znajdują tzw. biopreparaty. Przez pojęcie „biopreparat” rozumie się odpowiednio przygotowany i zdefiniowany układ mikroorganizmów o składzie gatunkowym i aktywnościach przystosowanych do prowadzenia określonego procesu w warunkach przemysłowych.

Biopreparaty tworzy się na bazie starannie dobranych szczepów mikroorganizmów (generalnie bakterii, choć w niektórych przypadkach również grzybów) izolowanych wcześniej z naturalnych środowisk. Szczepy zawarte w biopreparatach mogą być przechowywane w formie liofilizatów, zamrażane, lub też umieszczane w specjalnej zawieszynie. Warunkiem koniecznym pozwalającym na skuteczne użycie technologii mikrobiologicznej jest dobór biopreparatu zawierającego takie mikroorganizmy, które w danym środowisku znajdą optymalne warunki działania, tzn. posiadają cechy umożliwiające ich adaptację i rozwój.

Przewaga biopreparatów nad innymi metodami stosowanymi w górnictwie naftowym polega na tym, że zawarte w nich mikroorganizmy potrafią samodzielnie przemieszczać się w złożu (a więc docierać tam, gdzie nie jest to możliwe dla związków chemicznych), jak również zachowywać pełną zdolność działania dopóki ilość właściwego substratu (np. polimeru) jest wystarczająca. Nie bez znaczenia jest też możliwość namnażania się mikroorganizmów w sprzyjających warunkach złożowych, co przedłuża działanie biopreparatu i obniża koszt stosowania technologii [2].

Praktyka dowiodła, że największe korzyści dla przemysłu naftowego można uzyskać, stosując biopreparaty do:

- wtórnego odzysku ropy naftowej tzw. MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*),
- likwidacji uszkodzeń strefy przyodwiertowej i szczelin,
- szeroko rozumianej gospodarki odpadami.

* Instytut Nafty i Gazu, Krosno

Na świecie pierwsze znaczące sukcesy w skali przemysłowej uzyskano dopiero na początku lat 90. XX w. [1], jednak od tego momentu nastąpił ogromny wzrost zainteresowania tą technologią. Powstało kilka wyspecjalizowanych firm zajmujących się komercyjną działalnością na tym polu i uzyskujących doskonałe efekty na rozmaitych złożach między innymi w Argentynie [7], Chinach [3], Kanadzie, USA [1] i Wenezueli.

Działanie mikroorganizmów przy usuwaniu uszkodzenia przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyodwiertowej, spowodowanego związkami polimerów, polega na degradacji długich łańcuchów polimerów do prostych oligomerów i monomerów (np. glukozy i jej pochodnych), które są wykorzystywane przez mikroorganizmy jako substancje odżywcze. Usunięcie ze skały zbiornikowej polimeru, ułatwia również usuwanie zaadsorbowanych cząsteczek mineralnych i w konsekwencji następuje przywrócenie przepuszczalności skały zbiornikowej [2]. Sprawę komplikuje jednak mnogość stosowanych związków polimerowych – mikroorganizmy skuteczne w działaniu na polimery skrobiowe i celulozowe zawodziły w przypadku uszkodzeń spowodowanych przez gumę guarową [5].

W chwili obecnej znaczna część zabiegów hydraulicznego szczelinowania skał wykonywana jest za pomocą cieczy zabiegowych sporządzanych na bazie liniowych polimerów naturalnych, następnie usieciowanych odpowiednio dobranymi substancjami chemicznymi w celu stworzenia struktury przestrzennej i zwiększenia lepkości. Do najczęściej stosowanych polimerów naturalnych zaliczyć należy hydroksypropylguar (HPG) karboksymetylhydroksypropylguar (CMHPG). Polimery te też powodują uszkodzenie przepuszczalności szczelin. Jest ono wynikiem niekompletnego rozkładu polimeru po zabiegu. Fragmenty polimeru pozostają w przestrzeni porowej podsadzki wypełniającej szczelinę bądź na powierzchni ścian szczeliny. Nie jest to jednak błędem technologicznym w przygotowaniu szczelinowania. Idea tego zabiegu opiera się na utrzymywaniu odpowiedniej lepkości cieczy szczelinującej przez ściśle określony czas. To z kolei powoduje ograniczenia w ilości dodawanych substancji łamiących lepkość (upłynniających). Niejako ich niedobór powoduje, że lepkość polimeru po zabiegu nie zostaje w pełni złamana. Jego pewna część pozostaje w szczelinie, powodując uszkodzenie jej przepuszczalności. Obecnie specjalistyczne firmy zajmujące się produkcją biopreparatów dysponują produktami umożliwiającymi minimalizację uszkodzenia przepuszczalności szczeliny poprzez degradację zalegających w niej resztek polimeru pozabiegowego. Tymi preparatami są: Bio 1 i Bio 2. Te biopreparaty były przedmiotem przeprowadzonych laboratoryjnych prac badawczych.

Podstawową własnością mikroorganizmów przeznaczonych do stosowania w środowisku złożowym jest ruchliwość. Cecha ta pozwala na przemieszczanie się mikroorganizmów w złożu i w związku z tym docieranie biopreparatu do stref nieosiągalnych dla środków chemicznych. Badane komercyjne biopreparaty zawierają mikroorganizmy ruchliwe, a więc zdolne do samodzielnej i niezależnej penetracji przestrzeni porowej skały zbiornikowej. Przedstawiono to w tabeli 1.

Inną cechą jest warunkująca skuteczne działanie mikroorganizmów w środowisku złożowym zdolność do aktywnego wzrostu i działania zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych. Jest to warunek konieczny, ponieważ aktywacja biopreparatu i przygotowanie go do użycia następują na powierzchni przy pełnym dostępie tlenu, podczas gdy bezpośrednie działanie mikroorganizmów odbywa się w warunkach ściśle beztlenowych. Wszystkie biopreparaty zawierają bakterie zdolne do wzrostu i działania w warunkach tlenowych i beztlenowych, tzw. fakultatywne anaeroby (tab. 1).

Tabela 1

Cechy mikroorganizmów wchodzących w skład wybranych biopreparatów Bio 1 i Bio 2

Biopreparat	Ruchliwość	Wzrost tlenowy	Wzrost beztlenowy
Bio 1	+	+	+
Bio 2	+	+	+

+ oznacza efekt pozytywny

Kolejnym etapem było zbadanie zdolności mikroorganizmów do wzrostu w szerokim zakresie temperatur. Skuteczne działanie biopreparatów w warunkach złożowych wymaga, aby zawarte w nich mikroorganizmy należały do tzw. organizmów mezofilnych (optymalny wzrost w zakresie temperatur 25÷40°C) i termofilnych (optymalny wzrost 40÷60°C). Optymalne warunki wzrostu pozwalają na osiągnięcie pełnej aktywności, a więc uzyskanie najwyższej efektywności działania biopreparatu. Warunki temperaturowe inne niż optymalne również nie wykluczają możliwości stosowania biopreparatu (mikroorganizmy zachowują aktywność metaboliczną w przedziale temperatur znacznie szerszym niż ich optimum), ale jego działanie może wtedy dawać słabszy efekt końcowy. Wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Cechy mikroorganizmów wchodzących w skład biopreparatów Bio 1 i Bio 2

Biopreparat	30°C	40°C	50°C	60°C	1% NaCl	10% NaCl
Bio 1	+	+	-	-	+	+
Bio 2	+	+	-	-	+	+

+ oznacza efekt pozytywny

- oznacza efekt negatywny

Spśród testowanych biopreparatów przeznaczonych do rozkładu związków polimerowych w strefie przyodwiertowej, Bio 1 i Bio 2 zawierają bakterie mezofilne, a więc temperatura 40°C stanowi górną granicę ich optymalnego wzrostu (tab. 2). Dlatego należy oczekiwać, że w złożach, w których panuje temperatura wyższa niż 40°C, efekt uzyskiwany przez te biopreparaty może być niższy od maksymalnego. Biopreparaty te jednocześnie charakteryzują się bardzo dobrą tolerancją wysokiego stężenia NaCl (1÷10%), co jest korzystne, jeżeli założymy ich działanie w warunkach złożowych.

Określenie warunków środowiskowych, w jakich biopreparaty mogą być stosowane, gwarantując jednocześnie optymalne działanie, jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o ich zastosowaniu i wyborze technologii mikrobiologicznej do wykonania określonych zadań w środowisku złożowym. Następnym niezmiernie istotnym czynnikiem jest bezpieczeństwo ich stosowania i ewentualne zagrożenia dla ludzi. W tej materii obowiązuje system uzyskiwania odpowiednich certyfikatów dopuszczających dany środek (w tym przypadku biopreparat) do stosowania w górnictwie naftowym. Oba biopreparaty posiadają niezbędne certyfikaty umożliwiające ich stosowanie w przemyśle.

Zasadniczym etapem prac badawczych nad biopreparatami Bio 1 i Bio 2 było sprawdzenie ich przydatności do usuwania uszkodzenia szczeliny po wykonanych zabiegach hydraulicznego szczelinowania skał. Podczas takiego zabiegu, materiał podsadzkowy tłoczony jest do szczeliny za pomocą cieczy szczelinującej. Jest ona sporządzana przeważnie na bazie guarowych polimerów naturalnych lub jego pochodnych. Ciecz ta charakteryzuje się wysokimi lepkościami w trakcie prowadzenia zabiegu, co umożliwia bezpieczne umieszczenie podsadzki w szczelinie. Po zabiegu uaktywniają się środki chemiczne powodujące łamanie lepkości. Polimer ulega degradacji i jest usuwany w trakcie eksploatacji złoża. Niestety jego degradacja nigdy nie jest kompletna. W związku z czym część użytego polimeru zostaje w szczelinie, powodując jej uszkodzenie i ograniczenie przepuszczalności [4, 6].

W chwili obecnej najczęściej stosowanym w naszym kraju polimerem jest hydroksypropylguar (HPG). W związku z tym w badaniach nad oczyszczaniem szczelin po zabiegach szczelinowania skoncentrowano się nad wykorzystaniem preparatu Bio 2, który przeznaczony jest do destrukcji guaru i jego pochodnych.

W celu określenia efektywności działania tego biopreparatu w szczelinie zaplanowano wykonanie następujących serii badań:

- określenia hydraulicznej przewodności podsadzki nieuszkodzonej polimerem,
- określenia hydraulicznej przewodności podsadzki uszkodzonej polimerem bez biopreparatu,
- określenia hydraulicznej przewodności podsadzki uszkodzonej polimerem z biopreparatem.

W pierwszej kolejności zdefiniowano parametry pomiaru hydraulicznej przewodności materiału podsadzkowego:

- temperatura pomiaru: 40°C, 50°C i 60°C,
- piasek BM 16/30,
- koncentracja podsadzki 0,976 g/cm² (2 lb/ft²),
- pomiar pomiędzy kształtkami standardowymi piaskowca OHIO,
- naprężenie netto 27,58 MPa (4000 psi).

W przedstawionym planie założono pomiary w zakresie temperatur od 40°C do 60°C.

Badania wykonane zostały na stanowisku Proppant Conductivity przedstawionym na rysunku 1 w zmodyfikowanej komorze pomiarowej API przedstawionej na rysunku 2.



Rys. 1. Stanowisko badawcze Proppant Conductivity



Rys. 2. Komora pomiarowa

Procedura pomiaru przewodności była następująca. W komorze osadzono, z zachowaniem równoległości, kształtki piaskowca OHIO pozostawiając między nimi szczelinę ok. 8 mm. Komorę umieszczono w prasie i połączono ze stanowiskiem do przygotowania i tłoczenia cieczy szczelinujących. W zasobnikach tego stanowiska sporządzono ok. 80 litrów cieczy szczelinującej o składzie podanym w tabeli 3.

Tabela 3
Skład cieczy szczelinującej

Składnik	40°C	50°C	60°C
Woda [ml]	1000	1000	1000
HPG [g]	4,8	4,8	4,8
SPCz [ml]	1,2	1,2	1,2
Inhibitor ilów [ml]	1,2	1,2	1,2
Środek sieciujący [ml]	2,0	2,0	2,0
Aktywator [ml]	1,0	0,0	0,0
Łamacz [g]	0,5	0,5	0,1

W pierwszej kolejności tłoczono przez komorę 2% roztwór KCl przez 15 minut przy przeciwności 1,38 MPa (200 psi), odbierając jednocześnie filtrat przechodzący przez rdzenie OHIO. Następnie zwiększono przeciwności do 6,89 MPa (1000 psi), zamknięto zawory manifoldu na komorze API i rozpoczęto tłoczenie płynu szczelinującego podgrzanego do temperatury badania (40°C, 50°C i 60°C); przez pierwsze 20 minut bez filtracji przez rdzenie OHIO. Kolejno otwierano manifold komory, odbierając filtrat przez rdzenie i tłocząc płyn przez kolejne 40 minut. Następnie przez kilka minut płukano szczelinę 2% roztworem KCl, rozsuwano nieznacznie rdzenie i umieszczano pomiędzy nimi odpowied-

nią porcję podsadzki BM (63,1 g) umieszczoną w 30 ml płynu szczelinującego. Zamykano komorę i wszystkie zawory. Odpowiednio zwiększano temperaturę (40°C, 50°C i 60°C) i naprężenie netto do 3,48 MPa (500 psi) w celu przeprowadzenia statycznej filtracji cieczy szczelinującej [8]. Do tego momentu wszystkie testy podsadzek z uszkodzoną przepuszczalnością były identyczne. W przypadku podsadzki uszkodzonej polimerem (bez biopreparatu) następował 7-dniowy okres wygrzewania komory w temperaturze pomiarowej. Po tym czasie wykonywano 6-godzinny pomiar przewodności hydraulicznej i przepuszczalności materiału podsadzkowego przy naprężeniu ściskającym netto równym 27,58 MPa (4000 psi), przepływie 2% roztworu KCl równym 2 ml/min i założonej temperaturze badania. W czasie pomiaru mierzono przewodność warstwy podsadzki co 30 minut. W przypadku pomiaru podsadzki z uszkodzoną przepuszczalnością z zastosowaniem biopreparatu po wykonaniu filtracji statycznej następowało zatłoczenie biopreparatu do komory. Przy niewielkim przeciwciśnieniu włączano do komory 30 ml 10% roztworu Bio 2. Następnie zamykano wszystkie zawory i porty komory i wygrzewano ją przez 7 dni w temperaturze badania. Następnie podobnie jak w poprzednich testach następował 6-godzinny pomiar hydraulicznej przewodności przy zachowaniu identycznych warunków testu (naprężenie ściskające netto i wydatek przepływu).

Tabela 4
Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 40°C

Naprężenie [MPa]	Godzina testu [h]	Czysty piasek BM	BM uszkodzony płynem	BM uszkodzony płynem + Bio 2 (po 7 dniach)
		Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]
27,58	0	6553	1146	2063
27,58	1,0	5687	1012	1934
27,58	1,5	5221	934	1849
27,58	2,0	4906	893	1732
27,58	2,5	4725	871	1716
27,58	3,0	4543	842	1676
27,58	3,5	4418	826	1588
27,58	4,0	4298	807	1552
27,58	4,5	4209	802	1541
27,58	5,0	4142	795	1527
27,58	5,5	4110	792	1522
27,58	6,0	4095	792	1523

Wyniki wykonanych badań zestawiono kolejno w tabeli 4 – pomiar w temperaturze 40°C, tabeli 5 – pomiar w temperaturze 50°C i w tabeli 6 – pomiar w temperaturze 60°C.

Tabela 5

Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 50°C

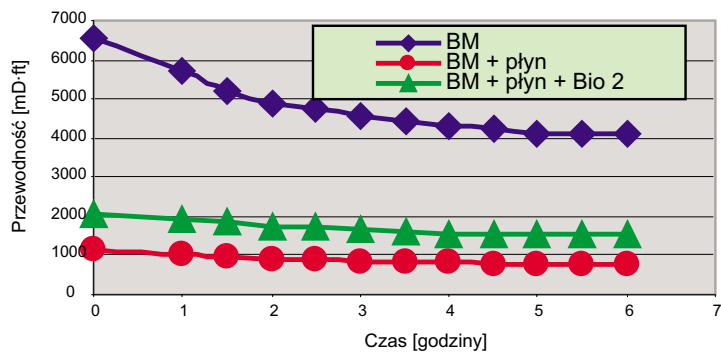
Napężenie [MPa]	Godzina testu [h]	Czysty piasek BM	BM uszkodzony płynem	BM uszkodzony płynem + Bio 2 (po 7 dniach)
		Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]
27,58	0	6408	1131	1596
27,58	1,0	5436	985	1394
27,58	1,5	4899	906	1287
27,58	2,0	4662	872	1230
27,58	2,5	4300	834	1201
27,58	3,0	4116	799	1119
27,58	3,5	3967	773	1090
27,58	4,0	3852	755	1049
27,58	4,5	3798	744	960
27,58	5,0	3704	739	961
27,58	5,5	3669	737	921
27,58	6,0	3625	737	884

Tabela 6

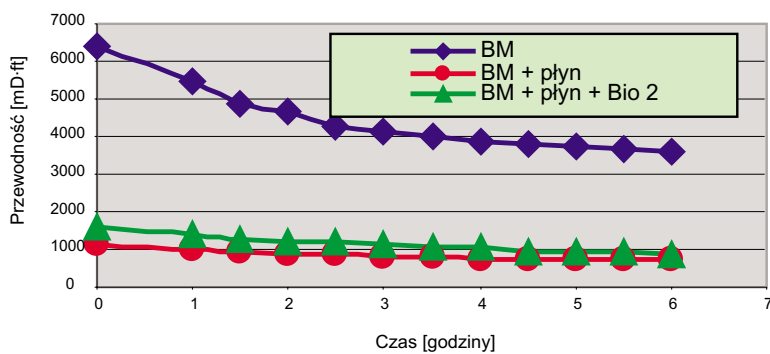
Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 60°C

Napężenie [MPa]	Godzina testu [h]	Czysty piasek BM	BM uszkodzony płynem	BM uszkodzony płynem + Bio 2 (po 7 dniach)
		Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]	Przewodność [mD·ft]
27,58	0	6233	1128	1241
27,58	1,0	5296	976	1171
27,58	1,5	4622	881	969
27,58	2,0	4403	863	906
27,58	2,5	4076	829	912
27,58	3,0	3920	797	797
27,58	3,5	3779	760	836
27,58	4,0	3686	741	852
27,58	4,5	3534	731	819
27,58	5,0	3493	722	765
27,58	5,5	3418	720	792
27,58	6,0	3398	719	791

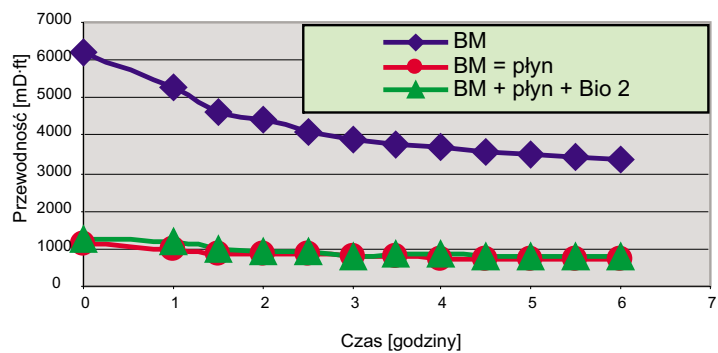
W tabelach 4, 5 i 6 zamieszczono wyniki pomiarów przewodności standardowego materiału podsadzkowego – piasku kwarcowego BM. Zmiany hydraulicznej przewodności pokazano na wykresach (rys. 3, 4 i 5).



Rys. 3. Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 40°C



Rys. 4. Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 50°C

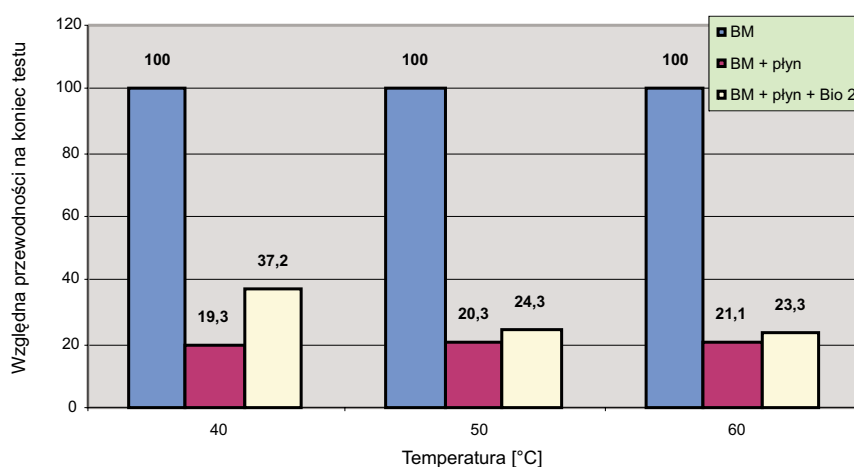


Rys. 5. Przewodność podsadzki BM 16/30 w temperaturze 60°C

Z zaprezentowanych wyników przeprowadzonych badań wynika, że płyn szczelinujący pozostający po zabiegu w szczelinie jest przyczyną znacznej utraty przewodności. Obecność biopreparatu Bio 2 wpływa na poprawę warunków przepływu, poprzez wzrost przewodności. W temperaturze 40°C wzrost ten jest największy. Zwiększenie temperatury badania powoduje zmniejszenie aktywności biopreparatu. Dla 50°C pozytywny efekt jest jeszcze zauważalny, natomiast dla 60°C jest minimalny. Potwierdzałoby to wcześniejsze badania świadczące o aktywności mikroorganizmów w różnych temperaturach (tab. 2). Pomiar potwierdzają, że są to mikroorganizmy mezofilne, dla których optymalną temperaturą działania jest 40°C. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że pomiary wykonywane były po 7-dniowym okresie działania mikroorganizmów na polimer. Nie wykluczone jest, że wyższe temperatury wymagają dłuższego czasu kontaktu tego biopreparatu z polimerem. Nie zostało też wyjaśnione zagadnienie wpływu długości pomiaru na wyniki. Nie można wykluczyć, że dla pomiarów dłuższych (dłuższego czasu eksploatacji złoża) ilość polimeru będzie ulegać zmniejszeniu, a co za tym idzie uszkodzenie szczeliny będzie coraz mniejsze.

Jednak autorytatywne zajęcie stanowiska w powyższych kwestiach wymaga dalszych badań.

Na rysunku 6 pokazano skuteczność działania biopreparatów w wykonanych testach. Podstawą było założenie, że czysty piasek kwarcowy BM posiada maksymalną z możliwych przewodność. Założono, że wynosi ona 100%. Następnie porównano przewodność szczeliny uszkodzonej płynem szczelinującym oraz uszkodzonej płynem z dodatkiem biopreparatu Bio 2. Podstawą obliczeń były wartości uzyskane na koniec testu, tj. po szóstej godzinie pomiaru.



Rys. 6. Względna przewodności na koniec testu

Jak widać z rysunku 6, płyn szczelinujący, w zależności od temperatury, powoduje utratę przewodności w granicach od 78,9% do 80,7%. Ze wzrostem temperatury utrata ta jest coraz mniejsza, jednak różnice te są niewielkie. Wprowadzenie do tego układu biopreparatu Bio 2 powoduje oczyszczanie się szczeliny i odzyskanie przepuszczalności. Najlepszy rezultat uzyskano dla temperatury 40°C.

Z przedstawionej analizy wynika, że największą efektywność z zastosowania biopreparatu można uzyskać, stosując go do szczelin utworzonych w złożach, których temperatura nie przekracza 40°C. Zastosowanie Bio 2 do wyższych temperatur wymaga dalszych badań, w których należałoby uwzględnić większe stężenia biopreparatu lub/i dłuższe jego oddziaływanie na polimer w szczelinie.

Nawiązując do technicznej strony wykonania zabiegu, należy tu zwrócić uwagę na dość istotny aspekt. Przeważnie w składzie płynu szczelinującego znajduje się biocyd, który zabezpiecza polimer przed jego przedwczesnym rozkładem bakteriologicznym w trakcie jego przygotowania na powierzchni. Stosując biopreparat, należy zrezygnować ze stosowania biocydu. Czystość i sterylność zbiorników należy uzyskać przez dokładne ich wyczyszczenie i wyparowanie.

WNIOSKI

- Skuteczność działania biopreparatu Bio 2 badana była po siedmiu dobach od jego zatłoczenia do szczeliny.
- Pozostawanie nieusuniętej cieczy zabiegowej w szczelinie powoduje znaczne uszkodzenie hydraulicznej przewodności szczeliny.
- Działanie biopreparatu Bio 2 powoduje poprawę hydraulicznej przewodności szczeliny.
- Najbardziej efektywnie Bio 2 działa w temperaturze 40°C. Ze wzrostem temperatury skuteczność jego działania maleje.
- Zwiększenie stężenia i wydłużenie czasu pomiaru może mieć wpływ na końcowy efekt skuteczności działania biopreparatu. Dlatego wydaje się uzasadniona konieczność kontynuowania badań.

LITERATURA

- [1] Brown F.G.: *Microbes: The practical and environmental safe solution to production problems, enhanced production, and enhanced oil recovery*. 1992 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, 18–20 March 1992, 251–259
- [2] Caira R., Miquilenna B., Carrero Y., Bermudez F., Spencer D., Pianango A.: *Microbial Reversal for Frac Wells*. EXITEP 98. International Petroleum Technology Exhibition Proceedings, 225–229
- [3] Deng D., Li C., Ju Q., Wu P., Dietrich F.L., Zhou Z.H.: *Systematic extensive laboratory studies of Microbial EOR mechanisms and Microbial EOR application results in Changqing Oilfield*. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 20–22 April 1999
- [4] Economides M.J., Nolte K.G.: *Reservoir stimulation*. Houston, Texas 1989
- [5] Falkowicz S., Kapusta P.: *Biological control of formation damage*. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control held in Lafayette, Louisiana, 20–21 February 2002

- [6] Gidley J.L., Holditch S.A., Nierode D.E., Veatch Jr R.W.: *Recent advances in hydraulic fracturing*. SPE Monograph volume, No. 12, Richardson, Texas, 1989
- [7] Maure M.A., Dietrich F.L., Diaz V.A., Arganaraz H.: *Microbial Enhanced Oil Recovery pilot test in Piedras Coloradas Field, Argentina*. 1999 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, 21–23 April, 1999
- [8] Ott W.K.: *Well stimulation: acidizing and hydraulic fracturing*. Training manual IHRDC, Houston, Texas 1985
- [9] ZoBell C.E.: *Recovery of hydrocarbons*. U.S. Patent 2, 641, 566, 1953