

Sławomir Falkowicz, Renata Cicha-Szot
Instytut Nafty i Gazu Kraków

Nawadnianie mikrobiologiczne jako sposób zwiększenia stopnia sczerpania starych złóż ropy naftowej na przykładzie złoża Pławowice. Część I

Metody mikrobiologiczne w procesach wydobywania ropy naftowej

Od lat 70. dwudziestego wieku datuje się rozwój stosowania tzw. biopreparatów w przemyśle wydobywania, transportu i magazynowania ropy naftowej. Pod pojęciem biopreparatu rozumie się odpowiednio przygotowany do zastosowania układ mikroorganizmów o składzie gatunkowym i aktywnościach przystosowanych do prowadzenia określonego procesu w warunkach przemysłowych. Wykorzystywane w eksploatacji węglowodorów biopreparaty najczęściej posiadają formę zawiesiny w 3-procentowym roztworze NaCl. Warunkiem koniecznym, pozwalającym na skuteczne użycie technologii mikrobiologicznej, jest dobór biopreparatu zawierającego takie mikroorganizmy, które w danym środowisku znajdą optymalne warunki działania, a więc istotne jest, aby biopreparat zawierał rozmaite szczepy o działaniu synergicznym.

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

- stymulacji odwiertami produktywnymi złóż rop, tzw. *microbial stimulation*,
- usuwania osadów parafinowych w kolumnach eksploatacyjnych na kopalniach ropy naftowej, tzw. *well bore clean up*,
- szeroko rozumianej gospodarki odpadami węglowodorowymi,
- intensyfikacji eksploatacji złóż ropy naftowej z wykorzystaniem mikrobiologicznych metod wspomagających (tzw. MEOR – *Microbial Enhanced Oil Recovery*).

Według najbardziej popularnej definicji [7, 10, 11, 12, 13], MEOR jest to technologia mikrobiologiczna, której celem jest zwiększenie stopnia sczerpania złoża

ropy naftowej w dążeniu do osiągnięcia korzyści ekonomicznych. MEOR jest zaliczany do tzw. metod trzecich eksploatacji złóż ropy. Jedną z najbardziej efektywnych odmian szeroko rozumianej technologii MEOR jest technologia Mikrobiologicznego Nawadniania Złoża (MNZ). Technologia MNZ polega na tym, że do złoża odwiertem iniekcyjnym jednorazowo zatłacza się specjalnie dobrany biopreparat, a następnie do wody zatłaczanej do złoża ropy w trakcie jego nawadniania dodaje się pożywkę, którą jest melasa buraczana, oraz suplementy mineralne zawierające fosfor. Pozytywny z technologicznego punktu widzenia mechanizm technologii MNZ nie jest do końca jasny [1, 5, 7, 10, 11]. Najczęściej przyjmuje się, że w złożu zachodzą procesy beztlenowej fermentacji, której produktami są:

- gaz, np.: CO₂, H₂ i inne, co obniża lepkość ropy i podnosi ciśnienie złożowe,
- kwasy organiczne, powodujące zwiększenie przepuszczalności niektórych skał zbiornikowych,
- środki powierzchniowo czynne (SPC) i alkohole, powodujące zmiany zwilżalności, obniżenie napięcia międzyfazowego (IFT) ropa–woda, zmiany ciśnień kapilarnych itp.

Mikroorganizmy wytwarzają również biopolimery. Po pewnym czasie, biopolimery poprzez fizyczną kolmatację będą powodowały obniżenie przepuszczalności tych miejsc złoża, gdzie po zatłoczeniu znajdują się w pierwszej kolejności. Są to objęte drenażem miejsca w złożu o lokalnie zwiększonej przepuszczalności, czyli tzw. ścieżki preferencyjne. W złożu spowoduje to zmianę miejsc przepływu zatłaczanej wody. Woda będzie przepływać przez

partie złoża, przez które wcześniej nie przepływała (lub przepływała w niewielkim stopniu), uwalniając dodatkowe ilości pozostającej jeszcze w złożu ropy. Jest to zjawisko bardzo korzystne z ekonomicznego punktu widzenia. Dodatkowo, procesy fermentacyjne są procesami egzotermicznymi, co jest bardzo istotne w przypadku złóż płytkich. Wszystkie opisane powyżej procesy mogą zachodzić synergicznie, co czyni technologię wyjątkowo wydajną. Wielką zaletą tej technologii jest to, że jednorazowo zatłoczone do złoża prawidłowo dobrane mikroorganizmy są skuteczne stosunkowo długo, tzn. od sześciu do osiemnastu miesięcy, a często dłużej. Wszystko to powoduje zwiększenie tzw. współczynnika szczypania złoża, do którego uzasadnionej ekonomicznie maksymalizacji dąży się na każdym etapie jego eksploatacji.

Trudno dokładnie ocenić ilość wdrożonych z sukcesem technologii, które można zaklasyfikować jako technologie MEOR; Lazar [7] ocenia ich ilość na kilkaset. Większość z nich miało miejsce w USA, Rosji, Argentynie [9], Indiach, Malezji oraz Rumunii i w latach 60. ub. w. w Polsce [6], gdzie zespół pod kierownictwem profesora Karaskiewicza z Instytutu Naftowego w Krakowie (obecnie INiG) z sukcesem wykonał szereg zabiegów, które z pewnymi ograniczeniami można zakwalifikować do zabiegów typu MNZ.

Inne stosowane metody intensyfikacyjne ukierunkowane są głównie na obniżenie lepkości ropy. Realizuje się to poprzez zatłaczanie rozpuszczalników organicznych lub stosowanie metod termicznych. W przypadku stosowania rozpuszczalników największą zaletą zabiegu jest względna

prostota, a co za tym idzie – niskie koszty wymaganego wyposażenia technicznego, wadą natomiast – stosunkowo duże ilości, a więc i znaczące koszty stosowanych rozpuszczalników oraz ich toksyczność. Metody termiczne, czyli podniesienie temperatury złoża, realizuje się na różne sposoby, jeżeli chodzi o możliwość dostarczenia energii cieplnej do złoża. W chwili obecnej najbardziej perspektywiczną metodą jest tzw. SAGD (od angielskiego *Steam Assisted Gravity Drainage*). W przypadku złóż szczypanych niska produkcja oraz wysokie ceny ropy powodują ekspansję konkurencyjnych ekonomicznie, mikrobiologicznych technologii stymulacji złóż ropy naftowej.

Technologiczne kryteria wyboru złóż do zastosowania metod mikrobiologicznych w eksploatacji węglowodorów ściśle wynikają z fizjologii mikroorganizmów i związane są ze środowiskiem, w którym będą one przebywać.

I tak:

- temperatura stosowalności mikroorganizmów zawiera się w przedziale $10\div 85^{\circ}\text{C}$; w stan przetrwalnikowy przechodzą w temperaturze $10\div 5^{\circ}\text{C}$,
- optymalna temperatura działalności mikroorganizmów zawiera się w przedziale $30\div 65^{\circ}\text{C}$; w tej temperaturze mikroorganizmy mogą się namnażać co $20\div 120$ minut,
- zasolenie wody złożowej musi być niższe od 15%; w zabiegach stosuje się 3-procentowe roztwory NaCl,
- pH środowiska musi być większe niż 3,
- zawartość H_2S w fazie wodnej musi być mniejsza niż 10 000 ppm.

Przesłanki do zastosowania technologii mikrobiologicznego nawadniania złóż ropy naftowej w Karpatach i na przedgórzu Karpat

Ropa naftowa w Karpatach występuje najczęściej w wąskich, stromych fałdach poprzecinanych podłużnymi i poprzecznymi dyslokacjami, tworząc bloki. Początkowo w wielu złożach wydobywanie było samoczynne, a źródłem energii był gaz rozpuszczony w ropie, czapa gazowa, a niekiedy woda okalająca.

Przyjmuje się, że stopień szczypania zasobów geologicznych metodami pierwszymi, a więc bez wspomagania dla tego typu złóż, jest niewielki i wynosi od 10 do 25%. Dla dalszego wzrostu wydobywania należy zastosować metody wspomagające. W Karpatach od lat 30. ubiegłego wieku stosowano, często z bardzo dobrymi rezultatami, metody wtórne i trzecie wydobywania ropy. Obecnie eksploatację większości złóż prowadzi się przez pompowanie lub stosując nawadnianie wewnątrzkonturowe [8]. Podstawowym problemem jaki należy rozstrzygnąć proponując sposób

dalszej eksploatacji złóż w Karpatach jest ocena stopnia szczypania zasobów (tzw. *Recovery Factor* – RF), a więc i ocena wielkości zasobów pozostałych w złożach. Szacunkowej oceny tej wielkości można dokonać opierając się na dwu danych, tzn. ilości wydobytej ropy od początku eksploatacji lub teoretycznego stopnia szczypania tych złóż.

Przyjmuje się, że całkowite wydobywanie ropy ze złóż karpackich przekroczyło wartość 12 milionów ton [8]. W literaturze światowej podaje się, że w przypadku reżimu grawitacyjnego, przy długim okresie eksploatacji i stosowaniu metod wtórnych, można uzyskać wskaźnik stopnia szczypania na poziomie co najmniej 40%. Wychodząc z tych dwóch wartości można łatwo wyliczyć, że w złożach karpackich pozostało ok. 18 milionów ton ropy. Zwiększenie stopnia szczypania nawet o 5% dałoby ok. 1,5 miliona ton ropy. Zaprezentowane szacunki uśred-

niąją wszystkie złoża i nie uwzględniają ich specyfiki oraz historii eksploatacji.

Metodą bilansu materiałowego przeprowadzono ocenę stopnia szczypania dwóch złóż ropy naftowej: Osobnica i Węglówka [8]. Obydwa złoża charakteryzują się podobną budową geologiczną oraz zbliżonym systemem energetycznym gazu rozpuszczonego w ropie z występowaniem wody okalającej. Zasadniczą różnicą jest sposób ich eksploatacji. Stwierdzono, że dla złoża Węglówka wskaźnik szczypania wynosi 21% zasobów początkowych. Z kolei na złożu Osobnica, gdzie stosowano metody nawadniania i nagazowania, uzyskano stopień szczypania na poziomie 33% zasobów geologicznych.

Laboratoryjna weryfikacja efektywności technologicznej metody MNZ na wybranych złożach ropy naftowej

Jak wspomniano powyżej, Mikrobiologiczne Nawadnianie Złoża ropy naftowej polega na jednokrotnym załoczeniu do złoża odwiertem iniekcyjnym biopreparatu, a następnie wraz z zatłaczaną wodą w sposób ciągły pożywki dla mikroorganizmów zawartych w tym biopreparacie. Zatłaczaną pożywką jest melasa buraczana podawana do złoża w ilości od 2 do 4% wagowych zatłaczanej wody, wzbogacona o fosforanowy suplement mineralny di-fosforan amonu (DAP). W marcu 2010 roku na zlecenie PGNiG w Warszawie rozpoczęto, koordynowany przez Instytut Nafty i Gazu w Krakowie, program oceny metodą symulacji laboratoryjnej efektywności mikrobiologicznego nawadniania wybranych złóż ropy naftowej. Po wstępnej analizie do testów laboratoryjnych wybrano złoża: Osobnica, Harkłowa i Węglówka oraz złożo Pławowice. W oparciu o rozpoznanie literaturowe i opinie ekspertów zewnętrznych jako dostawcę biopreparatu wybrano firmę RAM Biochemicals z USA, a jako dostawcę melasy – cukrownię Ropczyce w województwie podkarpackim. W pierwszej kolejności, drogą testów mikrobiologicznych, w laboratorium firmy RAM Biochemicals potwierdzono przydatność melasy z cukrowni Ropczyce jako ewentualnej pożywki dla proponowanego przez firmę biopreparatu. W wyniku testów skomponowano biopreparat składający się z trzech szczepów mikroorganizmów, oznaczonych jako: NIPER1a, 6 i 7. Mikroorganizmy oznaczone jako NIPER1a są mikroorganizmami tlenowymi, które zdolne są przetrwać w warunkach beztlenowych, a pozostałe dwa szczepy są mikroorganizmami beztlenowymi. Produktami metabolizmu wymienionych szczepów są: CO₂, H₂, kwasy organiczne, lotne kwasy tłuszczowe (VFAs), środki powierzchniowo czynne, biopolimery i inne.

W konkluzji autorzy stwierdzają, że „w przypadku korzystniejszych warunków technicznych niż napotkano na złożu Osobnica, a przede wszystkim lepszej szczelności kolumn rur w odwiertach zatłaczających, możliwym jest w warunkach karpaccich uzyskanie wskaźnika 40% szczypania zasobów geologicznych”.

Przytoczone dane oraz wskaźniki szczypania zasobów pokazują sensowność wdrażania metod wtórnych i trzecich eksploatacji karpaccich złóż ropy naftowej. Metodą, która umożliwia osiągnięcie wskaźnika szczypania zasobów na poziomie 40%, a nawet kilka procent wyższym, jest relatywnie niskonakładowa metoda Mikrobiologicznego Nawadniania Złoża (MNZ).

Po potwierdzeniu przydatności melasy z cukrowni Ropczyce, w laboratorium Zakładu Inżynierii Naftowej INiG przeprowadzono serię testów przepływowych na rdzeniach, w celu weryfikacji zdolności wybranego biopreparatu do uzyskania nadwyżek ropy w procesie nawadniania mikrobiologicznego. W oparciu o otrzymane z firmy RAM Biochemicals zliofilizowane próbki mikroorganizmów, w Zakładzie Mikrobiologii INiG przygotowano biopreparat wykorzystywany następnie w testach na rdzeniach. Zgromadzono próbki ropy i wód złożowych z czterech wytypowanych złóż oraz próbki piaskowca o parametrach (przepuszczalność, porowatość) zbliżonych do piaskowców złożowych. Następnie przeprowadzono laboratoryjną symulację procesu nawadniania mikrobiologicznego. Eksperymenty prowadzono na stanowisku badawczym firmy TEMCO (obecnie Core Lab USA) w symulowanych termobarycznych warunkach złożowych. Warunki testów laboratoryjnych, takie jak: ciśnienie, temperatura, natężenie przepływu płynów w rdzeniu itp., ustalono w oparciu o dane złożowo-eksploatacyjne i dane otworowe tak, aby w sposób maksymalnie zbliżony do rzeczywistości symulować proces nawadniania złoża, następnie poszerzony o nawadnianie mikrobiologiczne [4].

Po określeniu podstawowych parametrów petrofizycznych próbek piaskowca nasycono je próżniowo 5-procentowym roztworem NaCl i sezonowano przez okres co najmniej siedmiu dni. Następnie metodą wypierania nasycono próbki ropą złożową, aż do osiągnięcia nieredukowalnego nasycenia solanką S_{wi} , co pozwoliło na oszacowanie nasycenia rdzenia ropą. Nawadnianie złoża symulowano, przetłaczając solankę przez tak przygotowane rdzenie, aż do zaniku wypływu z nich ropy. Uzyskane

ilości ropy były podstawą do oszacowania skuteczności zabiegu nawadniania (odropienia rdzenia) wyrażonego wskaźnikiem $RF_{w/f}$, który podaje, jaka część z całkowitej pierwotnej ilości ropy w rdzeniu została z niego na tym etapie eksperymentu usunięta. Następnie przygotowany biopreparat wtłoczono od rdzeni o numerach 1 i 2, w ilości ok. 50% ich objętości porowej (PV) i rdzenie inkubowano przez okres 3 dni. Rdzenie oznaczone dodatkowo literą C nie były inkubowane bakteriami i służyły jako próbki kontrolne. Po zakończeniu procesu inkubacji powtórzono proces wypierania ropy z rdzenia solanką, a uzyskana w każdym z eksperymentów dodatkowa ilość ropy posłużyła do oszacowania wskaźnika odropienia rdzenia (złoża) po zabiegu nawadniania mikrobiologicznego $RF_{m/w/f}$. Skuteczność zabiegu oznaczono symbolem $E_{m/w/f}$ i wyliczono według wzoru:

$$E_{m/w/f} = RF_{m/w/f} - RF_{w/f} \quad (1)$$

Dodatkowo dla wszystkich rop zmierzono napięcie międzyfazowe IFT ropa surowa–solanka i ropa obrobiona mikrobiologicznie–solanka. W każdym w przypadków zanotowano spadki wartości IFT , które oznaczono symbolem IFT_{ch} . Uzyskane dane zamieszczono w tablicy 1.

W międzyczasie podjęto decyzję, że na złożu Pławowice wdrożony zostanie program nawadniania mikrobiologicznego. U podstaw decyzji leżał fakt, iż na złożu aktualnie prowadzone było nawadnianie dwoma odwiertami oraz złoża znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie Krakowa, co marginalizowało problemy logistyczne, szczególnie istotne w trakcie prowadzenia planowanego na 18 miesięcy monitoringu wyników programu. W związku z powyższym, procedura badań laboratoryjnych została poszerzona o testy wielowariantowego sposobu dawkowania i inkubacji biopreparatu w rdzeniu. Poza tym, procedura – tak przygotowania rdzeni, jak i prowadzenia testów – nie uległa zmianie. Wyniki testów laboratoryjnej

Tablica 1. Wyniki laboratoryjnego procesu symulacji mikrobiologicznego nawadniania złóż ropy naftowej Osobnica, Harkłowa i Węglówka

Złoże	Rdzeń	Przepuszczalność absolutna [mD]	RF		$E_{m/w/f}$ [%]	Zmiana napięcia międzyfazowego IFT_{ch} [%]
			$RF_{w/f}$ [%]	$RF_{m/w/f}$ [%]		
Osobnica	O-1	272	54,2	59,9	5,7	-16,79
	O-2	238	31,2	39,8	8,6	
	O-3-C	244	37,6	39,0	1,4	
Harkłowa	H-1	56	43,7	46,6	2,9	-37,29
	H-2	37	34,3	40,0	5,7	
	H-3-C	83	40,0	40,0	0,0	
Węglówka	W-1	522	43,2	51,8	8,6	-30,77
	W-2	292	37,6	43,3	5,7	
	W-3-C	467	40,0	40,0	0,0	

Tablica 2. Wyniki laboratoryjnego procesu symulacji mikrobiologicznego nawadniania złoża ropy naftowej Pławowice

Rdzeń	$RF_{w/f}$ [%]	Ilość biopreparatu [PV]	Dodatkowa pożywka		Czas inkubacji rdzenia [dni]	$RF_{w/fm}$ [%]	$E_{m/w/f}$ [%]
			ilość [PV]	dzień zatłoczenia			
1 – kontrola	33,3	×	×	×	3	33,3	0,0
2	39,3	0,5	1	2	3	55,4	16,1
3	42,3	0,5	1	3	3	53,8	11,5
4	46,2	0,5	×	×	10	50,0	3,8
5	59,1	0,5	1	7	10	61,4	2,3
14	23,7	0,5	×	×	10	27,6	3,9
15	20,9	0,5	1	7	10	24,4	3,5

symulacji mikrobiologicznego nawadniania złoża Pławowice zostały przedstawione w tabelicy 2.

W przypadku symulacji nawadniania złoża Pławowice wielkość współczynnika szcerpania zasobów RF_{wrf} dla poszczególnych rdzeni uzyskano na poziomie od 20,9% – w przypadku rdzenia nr 15, aż do 59,1% – w przypadku rdzenia oznaczonego numerem 5. Średnia z sześciu pomiarów to 38,6% i tak uzyskana laboratoryjnie wielkość współczynnika szcerpania (RF) jest typowa dla wielkości uzyskiwanych w trakcie prowadzenia eksploatacji złóż ropy naftowej realizowanej w reżimie nawadniania złoża. W wyniku zastosowania biopreparatu (symulacja nawadniania mikrobiologicznego) uzyskano w każdym przypadku

dotatkowe ilości ropy, a tym samym, wzrost współczynnika szcerpania od 2,3% – w przypadku rdzenia oznaczonego numerem 5, aż do 16,1% – w przypadku rdzenia numer 2, co – uśredniając – daje wskaźnik $E_{mwf} = 6,9\%$. W oparciu o uzyskane wyniki, jak i dostępne dane złożowe określono podstawowe parametry technologiczne prowadzenia programu MNZ Pławowice.

Niepewność wyników laboratoryjnych dla poszczególnych parametrów oszacowano na podstawie klasy dokładności aparatury pomiarowej, która wynosiła dla: przepuszczalności 3,77%, współczynnika szcerpania RF 1,00%, skuteczności zabiegu Emwf 2,00% oraz napięcia międzyfazowego IFT 0,50%.

Program mikrobiologicznego nawadniania złoża ropy naftowej Pławowice

Złoże ropy naftowej Pławowice odkryto w 1963 roku odwiertem Pławowice-2. Skały zbiornikowe to wapienie górnej jury (rauraku) oraz piaskowce i zlepience kredowe (cenoman). Maksymalne wydobycie zanotowano w 1968 roku, wyniosło ono 76 765 ton ropy, tj. około 210 ton ropy dziennie z 69 odwiertów. Maksymalne wydobycie z jednego odwiertu Pł-3 wynosiło 21 ton/dobę. Najwięcej do chwili obecnej wyprodukował odwiert Pł-41, tzn. 38 600 ton, a łączne wydobycie ze złoża wynosi ponad 602 000 ton ropy. W latach 1978–1986 przeprowadzono nawadnianie złoża, polegające na zatłaczaniu do dwóch odwiertów wody słodkiej. Zaobserwowane oddziaływanie wtłaczanej wody na odwierty reagujące pozwoliło wyróżnić strefę o podwyższonej przepuszczalności (rejon odwiertów: 52, 53, 159). Fakt ten między innymi zadecydował o późniejszym wyborze odwiertu Pł-311 jako zasilającego w trzeciej metodzie eksploatacji złoża Pławowice. W związku z powyższym oraz ze względów ekonomicznych, przed rozpoczęciem programu na złożu nie przeprowadzono tzw. testów wskaźnikowych (znacznikowych), mających na celu ocenę efektywności oddziaływania odwiertów zatłaczających na odwierty produkcyjne, a w szczególności czasu przepływu wody złożowej pomiędzy odwiertami. Odwiert Pł-311 zlokalizowany jest w wierzchołku antykliny, a zatłaczana woda złożowa przemieszcza się po spągu złoża w kierunku odwiertów reagujących Pł-52 i Pł-159 oddalonych o około

400 m. Uwzględniając powyższe dane, w programie MNZ Pławowice jako odwierty zatłaczające wybrano odwierty Pł-311 i Pł-23, które oddziałują na odwierty Pł-52 i Pł-159 oraz odwierty Pł-41 i Pł-43. Podstawowe dane złożowo-eksploatacyjne (rok 2010) wybranych odwiertów produkcyjnych zamieszczono w tabelicy 3.

Tabela 3. Wybrane odwierty produkcyjne złoża Pławowice

Odwiert	Pławowice-41	Pławowice-43	Pławowice-52	Pławowice-159
Symbol	Pł-41	Pł-43	Pł-52	Pł-159
Temp. złożowa [°C]	23	23	24	24
Ciśnienie złożowe [MPa]	0,13	0,13	0,1	0,6
Wydobycie ropy [t/dobę]	4,4	0,6	2,3	1,8
Wydobycie wody [t/dobę]	0,3	0,4	0,05	0,2
Mięższość efektywna [m]	9	3,5	8,5	6

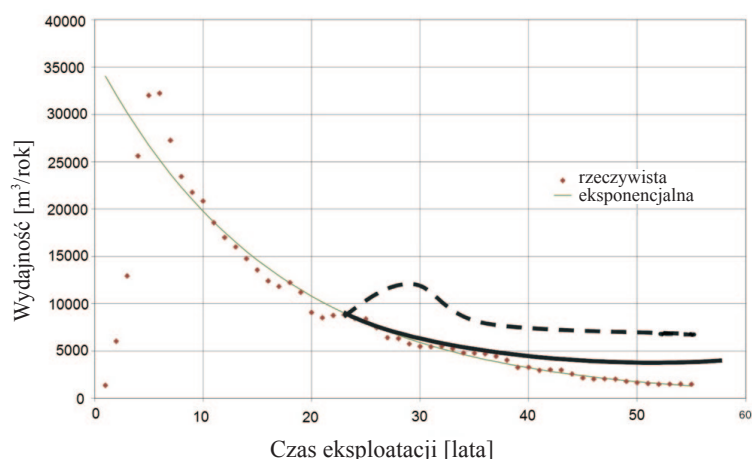
Wybrany biopreparat firmy RAM Biochemicals jest głównie stosowany w USA i jako produkt do bezpośredniego użycia ma ograniczony czas, w jakim musi zostać użyty. Dodatkowo, sprowadzenie z USA biopreparatu gotowego do użycia wiązałoby się ze znacznymi kosztami. Dlatego na potrzeby programu MNZ Pławowice przyjęto rozwiązanie alternatywne, które zostało zweryfikowane w skali laboratoryjnej. Do Krakowa mikroorganizmy zostały dostarczone w tzw. suchym lodzie w postaci zliofilizowanej w temperaturze ok. -20°C . Po potwierdzeniu gotowości przez kierownictwo kopalni Pławowice do przyjęcia koncentratu bakteryjnego rozpoczęto jego przygotowanie. Koncentrat przygotowano w laboratoriach INiG w przemysłowym reaktorze o pojemności 2 m^3 , dodatkowo zapewniającym beztlenowe, kontrolowane, termobaryczne warunki prowadzenia procesu.

Procedura przygotowania koncentratu bakteriynego polegała na:

- przygotowaniu 1600 litrów 3-procentowej solanki (NaCl) z dodatkiem melasy, bulionu sojowego i suplementu mineralnego,
- przeprowadzeniu sterylizacji tak przygotowanego roztworu w warunkach wysokotemperaturowych metodą tyndalizacji,
- dodaniu zliofilizowanych mikroorganizmów w ilości ok. 47 kg,
- prowadzeniu procesu namnażania mikroorganizmów przez ok. 24 godziny,
- załadunku koncentratu do wysterylizowanych paletopojemników i dostarczeniu na kopalnię Pławowice.

Kontrolowano podstawowe parametry, takie jak: pH, mętność i temperaturę koncentratu, w celu oceny prawidłowości przebiegu procesu namnażania mikroorganizmów. Po stwierdzeniu zgodności parametrów koncentratu bakteriynego (pH, temperatura) z założonymi, w dniu 21.09.2011 roku dostarczono koncentrat na kopalnię Pławowice. Na terenie kopalni, w oparciu o własne środki techniczne, przygotowano ciecz zabiegową w ilości ok. 16,5 m³. Polegało to na dodaniu uzyskanego koncentratu do ok. 15 m³ wodnego 3-procentowego roztworu NaCl z dodatkiem melasy w ilości 4% wagowych oraz suplementów mineralnych. Po dwóch dniach inkubacji i potwierdzeniu założonych parametrów technologicznych ciecz zabiegową zatłoczono na chłonność do złoża odwiertami Pł-311 i Pł-23.

Celem programu mikrobiologicznego nawadniania złoża ropy naftowej Pławowice jest zwiększenie stopnia jego szcerpania. Zakładając niezmienną chłonność odwiertów zatłaczających i oddziaływanie na odwierty produkcyjne, należy spodziewać się przyrostów w wielkości produkcji odwiertów. Bazując na danych literaturowych [2], założono przyrost produkcji ropy naftowej w przedziale od 10 do 35% w poszczególnych odwiertach, przez okres od kilku do kilkunastu miesięcy. Uzyskane nadwyżki ropy będą ewidentnym wskaźnikiem efektywności zastosowanej metody. Możliwy jest również scenariusz, że zostanie ograniczone naturalne tempo spadku produkcji w stosunku do przewidywanego, a tym samym – uzyskane zostaną nadwyżki ropy naftowej. Powyższe przypadki, celowo zniekształcając skalę, przedstawiono poglądowo na rysunku 1. Na tle krzywej produkcji jednego z karpaccich złóż ropy naftowej (aproxymacja eksponencjalną linią cienką) pokazano spodziewany przebieg produkcji po zabiegu nawadniania mikrobiologicznego. Linia gruba przerywana pokazuje przypadek pierwszy, natomiast linia gruba ciągła



Rys. 1. Krzywa spadku produkcji złoża ropy naftowej

– przypadek drugi. Obszar zawarty pomiędzy każdą z tych linii a krzywą aproksymacyjną to hipotetyczne nadwyżki ropy uzyskane w wyniku zastosowania mikrobiologicznego nawadniania złoża.

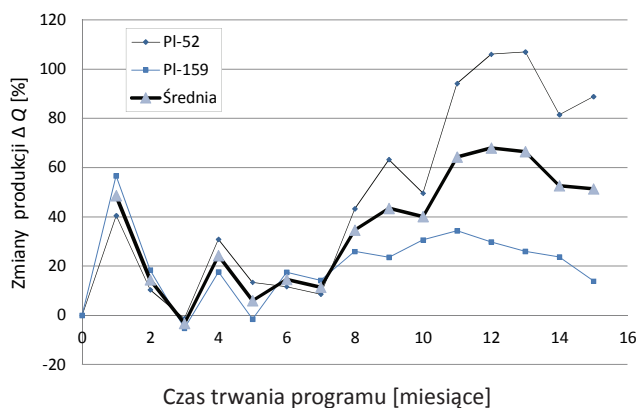
Po 30 dniach od zatłoczenia cieczy roboczej do złoża rozpoczęto pobór próbek wody złożowej i ropy w odwiertach Pł-52, 159 i 41. próbki wody złożowej pobierane były w celu wykonania analiz mikrobiologicznych wód oraz potwierdzenia/wykluczenia obecności cukrów. Na próbkach ropy prowadzono pomiary reologiczne. Pod koniec każdego miesiąca trwania programu przekazywane były również dane produkcyjne każdego z odwiertów. Dane te są niezbędne do oceny skuteczności programu i wprowadzania ewentualnych korekt technologicznych. Po ok. 40 dniach od dnia rozpoczęcia programu, z przyczyn technicznych, wyłączono z eksploatacji odwiert zatłaczający Pł-23. W związku z powyższym, przeprowadzona analiza technologicznej i ekonomicznej skuteczności programu dotyczyć będzie tylko odwiertów Pł-52 i Pł-159.

Z kopalni Pławowice raz w miesiącu otrzymywane są dane o wielkości produkcji Q_m odwiertów Pł-52 i Pł-159. Uzyskano średnią miesięczną Q_{sr} wielkość produkcji odwiertów Pł-52 i Pł-159 za okres dziewięciu miesięcy przed zatłoczeniem biopreparatu do złoża. Zmiany produkcji odwiertów ΔQ zostały wyliczone na podstawie wzoru:

$$\Delta Q = \left(\frac{Q_m - Q_{sr}}{Q_{sr}} \right) 100\% \quad (2)$$

Zmiany produkcji są podstawowym wskaźnikiem skuteczności technologicznej programu nawadniania mikrobiologicznego złoża Pławowice – zostały one pokazane w formie wykresu na rysunku 2.

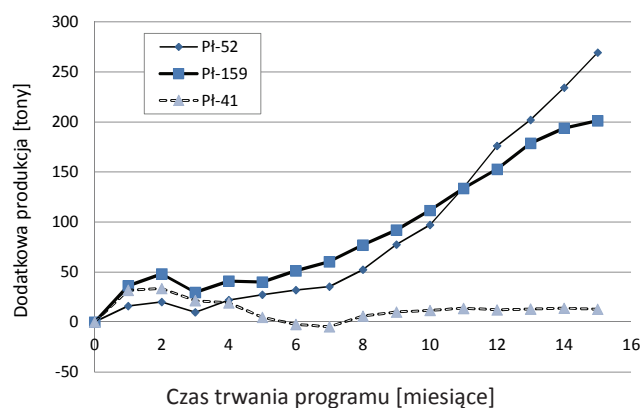
Pokazane zmiany (przyrosty) produkcji obydwu odwiertów od szóstego miesiąca trwania programu miały stabilną tendencję wzrostową i osiągnęły swoje maksima



Rys. 2. Zmiany produkcji odwiertów Pł-52 i Pł-159

ok. jedenastego i dwunastego miesiąca trwania programu. Szczególnie znaczący jest przyrost produkcji w przypadku odwiertu Pł-52, którego produkcja w trzynastym miesiącu programu wzrosła ponad 110%, w porównaniu do średniej dziewięciomiesięcznej Q_{sr} . W oparciu o powyższe dane wyliczony średni wskaźnik przyrostu produkcji w odwiertach Pł-52 i Pł-159 wynosi ponad 35%.

Celem każdego zabiegu stymulacji złoża ropy naftowej jest uzyskanie dodatkowych (w stosunku do produkcji przed rozpoczęciem programu) ilości ropy naftowej. Na rysunku 3 pokazano, uzyskane w ciągu piętnastu miesięcy



Rys. 3. Dodatkowa produkcja wybranych odwiertów złoża Pławowice

trwania programu, nadwyżki ropy naftowej. Analizując ten rysunek można zauważyć, że nadwyżki wynoszą ponad 200 ton ropy – w przypadku odwiertu Pł-159, oraz ponad 280 ton – w przypadku odwiertu Pł-52. Sumaryczne nadwyżki ropy naftowej uzyskane z analizowanych odwiertów po piętnastu miesiącach zbliżają się do 500 ton dodatkowego surowca. Na rysunku 3 pokazano też nadwyżki ropy uzyskiwane w odwiercie Pł-41. Od piątego miesiąca eksploatacji nadwyżki te praktycznie są pomijalne. Powodem tego stanu rzeczy, jak podano wcześniej, jest fakt wyłączenia z eksploatacji odwiertu iniekcyjnego Pł-23.

Podsumowanie

W artykule opisano obszary stosowania technologii mikrobiologicznych w przemyśle wydobywania ropy naftowej oraz podano wyniki pierwszych piętnastu miesięcy trwania programu MNZ Pławowice.

W dwóch objętych programem odwiertach produkcyjnych Pł-52 i Pł-159 uzyskano znaczące procentowe przyrosty produkcji (rysunek 2), a średnia piętnastomiesięczna wartość tych przyrostów wynosi odpowiednio: 49,9% i 21,8%. Całkowita dodatkowa produkcja osiągnęła wielkość ok. 500 ton ropy naftowej.

Do piętnastego miesiąca trwania programu do złoża zatłoczono ok. 70 ton melasy buraczanej, co daje wskaźnik ok. 0,14 tony na każdą tonę uzyskanych nadwyżek ropy naftowej. Średnia cena melasy wraz z transportem na kopalnię Pławowice wyniosła ok. 480 zł/tonę, tak więc w analizowanym okresie programu koszt melasy wynosi ok. 67 zł na każdą uzyskaną tonę dodatkowej ropy. Przewiduję się, że jeszcze przez okres kilku miesięcy uzyskiwane będą istotne technologiczne nadwyżki ropy, zatem wspomniana wielkość jednostkowych kosztów melasy powinna maleć. Dodatkowo, zauważono poprawę chłonności

odwiertu iniekcyjnego Pł-311, co objawia się skróceniem czasu zatłaczania tych samych objętości wody do złoża.

Raz w miesiącu pozyskiwane są i poddawane analizom próbki ropy i wody złożowej. W laboratoriach INiG wykonywane są pomiary lepkości dynamicznej ropy, pomiary wielkości napięć międzyfazowych ropa–woda złożowa oraz wykonuje się analizy na obecność w wodzie produkowanej przez odwierty 52 i 159 cukrów (melasa) i zatłoczonych do złoża mikroorganizmów, wykorzystując metody molekularne (metody FISH i CARD-FISH). Zauważono pewne lokalne zależności pomiędzy tymi wielkościami a wielkością produkcji czy zatłoczonej do złoża wody. Analiza tych zależności wykracza jednak poza ramy tego artykułu i zostanie przedstawiona w osobnej publikacji, podsumowującej program MNZ Pławowice.

Jak pokazują dane literaturowe [2, 9] oraz przykład złoża Pławowice, wdrożenie technologii MNZ nie wymaga zaangażowania znaczących, dodatkowych środków technicznych, a jedynym problemem może być sposób podawania melasy do zatłaczanej do złoża wody. Może stanowić to drobną komplikację techniczną w okresie zimowym, ze

względnie niskonakładowy sposób, przedłużyć sensowną ekonomicznie eksploatację wielu złóż, przesuwać w czasie wydatki związane z likwidacją odwiertów, jak i minimalizując niebagatelne kłopoty natury społecznej związane z redukcją personelu likwidowanych kopalń. Dodatkowo, technologia nawadniania mikrobiologicznego jest technologią niepowodującą praktycznie żadnych zagrożeń dla złoża, personelu kopalń czy środowiska naturalnego.

względnie niskonakładowy sposób, przedłużyć sensowną ekonomicznie eksploatację wielu złóż, przesuwać w czasie wydatki związane z likwidacją odwiertów, jak i minimalizując niebagatelne kłopoty natury społecznej związane z redukcją personelu likwidowanych kopalń. Dodatkowo, technologia nawadniania mikrobiologicznego jest technologią niepowodującą praktycznie żadnych zagrożeń dla złoża, personelu kopalń czy środowiska naturalnego.

względnie niskonakładowy sposób, przedłużyć sensowną ekonomicznie eksploatację wielu złóż, przesuwać w czasie wydatki związane z likwidacją odwiertów, jak i minimalizując niebagatelne kłopoty natury społecznej związane z redukcją personelu likwidowanych kopalń. Dodatkowo, technologia nawadniania mikrobiologicznego jest technologią niepowodującą praktycznie żadnych zagrożeń dla złoża, personelu kopalń czy środowiska naturalnego.

Autorzy artykułu rekomendują kontynuację programu MNZ Pławowice oraz objęcie programem nawadniania mikrobiologicznego innych nadających się do tego celu złóż ropy w Karpatach i na przedgórzu Karpat.

Autorzy artykułu pragną podziękować: Dyrekcji PGNiG SA za sfinansowanie i zgodę na publikację wyników programu mikrobiologicznego nawadniania złoża ropy naftowej Pławowice, kierownictwu i personelowi KRN Pławowice za efektywną współpracę w trakcie realizacji programu, a pracownikom Zakładu Mikrobiologii INiG w Krakowie za przygotowanie biopreparatów do badań laboratoryjnych oraz pomoc i konsultacje w zakresie technik mikrobiologicznych.

Literatura

- [1] Awan A. R., Teigland R., Kleppe J.: *A survey of North Sea enhanced-oil-recovery projects initiated during the years 1975 to 2005*. „SPE Reservoir Evaluation & Engineering” 2008, No. 11(3), p. 497–512.
- [2] Bryant R. S. et al.: *Microbial enhanced waterflooding field tests*. SPE 27751, Symposium SPE/DOE Improved oil recovery. Tulsa USA, April 1994.
- [3] Falkowicz S., Cicha-Szot R. i in.: *Zwiększanie stopnia szczypania złoża ropy naftowej Pławowice poprzez przeprowadzenie zabiegu mikrobiologicznego nawadniania*. Projekt badawczy wykonany na zlecenie PGNiG, marzec 2012. Praca niepublikowana.
- [4] Falkowicz S.: *Zmiany przepuszczalności piaskowców w warunkach otworopodobnych*. Prace IGNiG, październik 2000.
- [5] Fujiwara K. et al.: *Biotechnological approach for development of microbial enhanced oil recovery technique*. „Petroleum Biotechnology: Developments and Perspectives” 2004, vol. 151, p. 405–445.
- [6] Karaskiewicz J.: *Zastosowanie metod mikrobiologicznych w intensyfikacji eksploatacji karpaccich złóż ropy naftowej*. Prace Instytutu Naftowego. Wydawnictwo Śląsk 1974.
- [7] Lazar I., Petrisor I. G., Yen T. E.: *Microbial enhance recovery (MEOR)*. „Petroleum Science and Technology” 2007, No. 25(11–12), p. 1353–1366.
- [8] Lubaś J., Such J., Sobolewski J.: *Analiza wybranych przykładów dotychczasowego stopnia szczypania karpaccich złóż ropy naftowej i możliwości jego zwiększenia*. „Nafta-Gaz” 2008, nr 9, s. 565–572.
- [9] Maure M. A., Dietrich F. L., Diaz V. A., Argañaraz H.: *Microbial Enhanced Oil Recovery Pilot Test in Piedras Coloradas Field, Argentina*. SPE 53715 Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Caracas. Venezuela, 21–23 April 1999.
- [10] Ollivier B., Magot M.: eds. *Petroleum Microbiology*. 1st ed. 2005, ASM Press: Washington, DC. 365.
- [11] Sen R.: *Biotechnology in petroleum recovery*. „Progress in Energy and Combustion Science” 2008, No. 34(6), p. 714–724.
- [12] Turkiewicz A., Kapusta P., Brzeszcz J.: *Mikroorganizmy i procesy mikrobiologiczne w przemyśle naftowym*. „Nafta-Gaz” 2009, 65(10), 805–811.
- [13] Van Hamme J. D., Singh A., Ward O. P.: *Petroleum microbiology – Part 1: Underlying biochemistry and physiology*. „Chimica Oggi – Chemistry Today” 2006, No. 24(1), p. 52.

Dr inż. Sławomir FALKOWICZ – absolwent AGH w Krakowie. Obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Inżynierii Naftowej INiG w Krakowie. Autor i współautor wielu publikacji krajowych i zagranicznych, opracowań przemysłowych, patentów oraz wdrożeń. Obecnie specjalizuje się w ocenie niektórych właściwości skał zbiornikowych oraz w projektowaniu zabiegów mikrobiologicznej obróbki odwiertów i stymulacji złóż ropy naftowej.



Mgr inż. Renata CICHA-SZOT – absolwentka Wydziału Wiertnictwa Nafty i Gazu oraz Wydziału Paliw i Energii AGH w Krakowie. Pracuje w Zakładzie Inżynierii Naftowej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Realizuje prace badawcze dotyczące modyfikacji przepuszczalności skał zbiornikowych oraz uszkodzenia strefy przyodwiertowej.