

Kazimierz Twardowski*, Jacek Traple*

PRZEPLYWY EMULSJI WODNO-ROPNYCH W OŚRODKACH POROWATYCH**

1. WSTĘP

W historii eksploatacji złoża ropy naftowej można wyróżnić okresy eksploatacji pierwotnej oraz wtórnej [12, 14, 16]. W okresie eksploatacji pierwotnej przepływ ropy ze złoża do odwiertu, a w przypadku eksploatacji samoczynnej także jej wydźwignięcie na powierzchnię odbywa się kosztem energii złożowej. W tej fazie eksploatacji możliwe jest osiągnięcie współczynnika odropienia (szczerpania) złoża w granicach od 0,1 do 0,5 (od 10% do 50%), zależnie od systemu energetycznego złoża.

Po okresie eksploatacji pierwotnej może nastąpić okres eksploatacji wtórnej, w czasie którego stosowane są tzw. wtórne metody eksploatacji złoża. Ich celem jest zwiększenie współczynnika odropienia złoża poprzez zwiększenie zasobów energii złożowej przez zatłaczanie do złoża medium wypełniającego, które wypełnia opróżnione z płynów złożowych pory skały zbiornikowej i powoduje regenerację ciśnienia złożowego lub dostarczenie energii cieplnej przez zatłaczanie do złoża nośnika ciepła lub przez spalanie części węglowodorów zawartych w porach skały zbiornikowej. Stosowanie wtórnych metod eksploatacji może zwiększyć całkowity współczynnik szczerpania złoża nawet o dwadzieścia do trzydziestu procent w stosunku do stanu osiągniętego w wyniku eksploatacji pierwotnej.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat udoskonalono technologie metod wtórnych, nazywając je metodami trzecimi (EOR – *Enhanced Oil Recovery*). Szczególnie w ostatnich latach, w związku z rosnącą ceną ropy naftowej, metody te nabierają coraz większego znaczenia. Wiąże się to z możliwością istotnego zwiększania produkcji z istniejących, czasem przez wiele lat eksploatowanych starych złóż. Pozyskiwane w ten sposób dodatkowe zasoby mogą zwiększać zasoby wydobywalne szybciej niż poszukiwanie i udostępnianie nowych złóż.

W warunkach krajowych typową metodą wydobywania ropy naftowej ze złóż jest wypieranie jej za pomocą wody [12, 14, 16]. Konsekwencją stosowania tej metody jest duża ilość emulsji wodno-ropnej, zalegającej w złożach ropy. Siły kapilarne powstające na gra-

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr N524 021 32/2564

nicy faz ropy i wody mają ważne znaczenie w procesie wypierania ropy naftowej z jej złóż. Jeżeli jednak woda kontaktuje się z już nawodnioną częścią złoża, w której istnieje emulsja wodno-ropna, to emulsja ta nie będzie przemieszczała się pod wpływem sił kapilarnych. Szczególnie niekorzystne warunki wypierania ropy naftowej są wtedy, gdy znajduje się ona w postaci emulsji w porach ślepych. Podobne zjawiska występują w przypadku tworzenia się stożków wodnych w odwiertach eksploatacyjnych na złożach naftowych z podścielającą wodą złożową [21].

Jeśli więc do wypierania ropy naftowej z jej złóż stosuje się wodę, w złożach pozostaje znaczna ilość ropy w postaci błonek na skałach roponośnych i w postaci emulsji wodnej. Jak już wcześniej wspomniano, ropa pozostająca w złożach według wiarygodnych ocen stanowi ponad 50% jej początkowych zasobów. Z tego powodu dużą uwagę poświęca się poszukiwaniu metod podwyższania stopnia wydobycia ropy, przede wszystkim z uwodnionych złóż. Dotychczas najbardziej popularne do tego celu jest stosowanie związków powierzchniowo czynnych (ZPCz), wody nasyconej dwutlenkiem węgla, rozpuszczalników i roztworów micelarnych – stężonych roztworów ZPCz o małym napięciu powierzchniowym.

2. WŁAŚCIWOŚCI EMULSJI WODNO-ROPNYCH

W praktyce układy dwufazowe to mieszaniny różniących się między sobą składem chemicznym i właściwościami fizycznymi substancji, w których „fazy” rozumie się jako jednolitą fizycznie część układu, oddzieloną od pozostałych jego części wyraźną granicą (powierzchnią międzyfazową) [3, 7, 17].

Najbardziej złożony charakter wykazywać może układ typu ciecz-ciecz, który stanowi specyficzną substancję tworzoną przez cieczce wzajemnie nierozpuszczalne, czyli niemieszające się ze sobą na poziomie molekularnym. W praktyce układy tego rodzaju są typowe np. dla ekstrakcji.

Brak wzajemnej rozpuszczalności faz ciekłych (pomimo ich identycznego stanu skupienia) wynika stąd, że charakteryzują się one odmiennymi właściwościami polarnymi. Jedna z cieczy wykazuje cechy polarnej substancji hydrofilowej, druga zaś – cechy niepolarniej substancji hydrofobowej. Najbardziej typowym przykładem cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych jest woda i olej. Z tego względu w literaturze przedmiotu przyjęło się określać odpowiednie fazy układów ciecz-ciecz mianem „wody” lub „oleju”, niezależnie od ich rzeczywistego składu chemicznego. Jednak w warunkach rzeczywistych fazę wodną stanowić może dowolna ciecz o właściwościach hydrofilowych, natomiast fazę olejową – dowolna ciecz o właściwościach hydrofobowych.

Ciekłe układy dwufazowe, powstające w trakcie przepływu, charakteryzują się zwykle niestabilnością kształtu i rozmiarów form tworzonych przez fazę rozproszoną. Są to często układy nietrwałe, istniejące jedynie w warunkach przepływu. Tymczasem w trakcie przepływu tego rodzaju mieszanin mogą ujawniać się pewne osobliwe zjawiska, a w szczególności:

- inwersja faz w przepływie;
- ciągłe i zachodzące dwukierunkowo zmiany stopnia rozproszenia cieczy;
- zmiany lepkości układu, wynikające ze zmian jego budowy wewnętrznej;

- wyraźny poślizg międzyfazowy;
- efekty redukcji oporów przepływu;
- zmiany wielkości powierzchni międzyfazowej.

Zdecydowana większość dotychczasowych prac odnośnie sposobów i warunków wytwarzania oraz właściwości ciekłych układów rozproszonych dotyczy emulsji trwałych.

Grupa ciekłych mieszanin dwóch cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych to układy dwufazowe, tworzone przez ciecz o odmiennych właściwościach polarnych. Ich wymieszanie się na poziomie pojedynczych molekuł jest niemożliwe, stąd też każda z cieczy stanowić będzie odrębną fazę o indywidualnych cechach fizycznych i chemicznych. Tym samym ciekły układ dwufazowy charakteryzuje się brakiem jednorodnych właściwości w całej swej objętości. Dodatkowo, jeżeli każda z tworzących go cieczy wykazuje ciąłość, układ taki traktować należy jako rozdzielony. Jeżeli natomiast w jednej z cieczy występują odosobnione formy cieczy drugiej (zwykle są to krople), wówczas układ ten należy uważać za rozproszony. Z układem rozproszonym mamy również do czynienia wtedy, gdy rozproszeniu ulega jedynie część z całkowitej objętości jednej z cieczy, natomiast pozostała jej część wykazuje ciąłość.

Ocena charakteru i formy występowania fazy rozproszonej w dwufazowych układach ciecz-ciecz umożliwiła podanie ich systematyki. Przyjęto w niej kryteria podziału układów rozproszonych [7]:

- **rodzaj cieczy rozproszonej** – z tego względu należy wyróżniać dwa podstawowe typy układów: układ typu „woda w oleju” (W/O) oraz układ „olej w wodzie” (O/W);
- **trwałość układów rozproszonych** – pod tym względem również można je podzielić na dwie grupy: emulsje, czyli układy o dużej trwałości, oraz dyspersje – układy nietrwałe, w których formy fazy rozproszonej ulegają łatwo odwracalnym procesom rozpadu i koalescencji; w praktyce układ dyspersyjny istnieje tylko wtedy, gdy wchodząca w jego skład faza ciągła jest w ruchu; ruch ten może być powodowany np. przepływem;
- **udział objętościowy** fazy rozproszonej w układzie ciecz-ciecz – ze względu na wielkość udziału fazy rozproszonej układy ciecz-ciecz należy podzielić na rozcieńczone i skoncentrowane; w układach rozcieńczonych udział ten nie przekracza 10%; w układach wysoko skoncentrowanych krople fazy rozproszonej są zawsze we wzajemnym kontakcie;
- **różnice pomiędzy rozmiarami kropeł w danej ich populacji** – niejednorodne, w których wymiar części kropeł różni się znacznie od tzw. średnicy Sautera całej ich populacji, oraz jednorodne, w których wymiar wszystkich kropeł jest zbliżony do średnicy Sautera całej ich populacji.

Jednakowy stan skupienia faz tworzących ciekłe układy rozproszone sprawia, że stanowią one substancje o cechach szczególnych, niespotykanych w przypadku innych układów dwufazowych. Ich specyfika wynika z faktu, że obie fazy tworzące układ są cieczami, a zatem każda z nich może wykazywać ciąłość i stanowić środowisko rozpraszające dla fazy drugiej. W ciekłych układach dyspersyjnych będących w przepływie ciągłym zmianom ulega zazwyczaj wielkość i kształt form rozproszonych. Zmiany te mają najczęściej charakter odwracalny. Tymczasem np. zmiana typu układu lub stopnia rozproszenia jednej

z faz ma istotny wpływ na właściwości całej strugi dwufazowej. Jest to często powodem występowania zjawisk osobliwych, zaburzających przebieg zachodzących w tej strudze procesów.

Pomimo identycznego stanu skupienia substancji tworzących ciekłe układy dwufazowe ich właściwości fizyczne są odmienne. W opisie hydrodynamiki przepływu układu ciecz-ciecz szczególnie znaczenie ma gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe faz.

Ciągły wzrost udziału kropeł fazy rozproszonej w układzie o stałej objętości musi w konsekwencji doprowadzić do ich zupełnej koalescencji. W jej efekcie dotychczasowa faza rozproszona staje się ciągłą. Jeżeli równocześnie spełnione zostaną odpowiednie warunki, to w fazie tej dojdzie do rozproszenia cieczy stanowiącej uprzednio fazę ciągłą. Efekt ten nosi nazwę „zjawiska inwersji faz”, a w jego wyniku ulega zmianie typ ciekłego układu rozproszonego. Moment przejścia fazy rozproszonej w ciągłą określane jest mianem „punktu inwersji” i definiowany jako krytyczny udział danej cieczy, powyżej którego jej rozproszone formy ulegają koalescencji.

Można przyjąć, że zjawisko inwersji może zajść przy jednoczesnym przepływie kanałem dwóch cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych, czyli w przepływach ciecz-ciecz, ale też gaz-ciecz-ciecz. Szczególne znaczenie inwersji faz w przepływie wynika ze zmiany lepkości mieszaniny cieczy. W zależności od tego, która z cieczy staje się fazą ciągłą, inwersja faz powoduje wzrost lub spadek oporów przepływu.

O inwersji faz można mówić zarówno w przypadku przepływu mieszanin zdyspergowanych, jak i przepływów, w których ciecze tworzą większe wyodrębnione skupiska, a nawet płyną w postaci rozwarstwionej. Określenie „faza dominująca” oznacza ciecz, która determinuje rodzaj kształtujących się struktur przepływu oraz decyduje o właściwościach mieszaniny.

Inwersja faz niejako z definicji powoduje zmiany struktur przepływu. Opracowane dotychczas systematyki oraz mapy przepływu umożliwiają poprawne prognozowanie rodzaju struktur kształtujących się w danych warunkach przepływu jedynie po wcześniejszym ustaleniu, która ciecz stanowi fazę dominującą.

Według danych literaturowych zmiana fazy dominującej może wystąpić zarówno wtedy, gdy mieszanina cieczy zawiera większą ilość cieczy o mniejszej, jak i w wypadku cieczy o większej lepkości.

Badania przepływu mieszaniny wodno-olejowej w poziomych rurach wykazały kształtowanie się różnych rodzajów struktur, m.in. dyspersyjnej, korkowej oraz kropłowej [5, 20].

Przebieg inwersji faz może mieć dwojaki charakter. Z tego względu należy wyraźnie rozdzielić od siebie dwa przypadki:

- 1) Zjawisko inwersji zachodzi w pewnym przedziale udziału faz (w obszarze inwersji) i wywołane jest głównie siłami napięcia międzyfazowego.
- 2) Inwersja następuje przy jednoznacznej wartości udziału (w punkcie inwersji) i związana jest głównie z hydrodynamiką zjawisk zachodzących w fazie ciągłej.

W literaturze przedmiotu pierwszy przypadek określane jest mianem „inwersji przejściowej” (*transitional inversion*), natomiast przypadek drugi – mianem „inwersji gwałtownej” (*catastrophic inversion*). Ich nazewnictwo jest ściśle związane ze zmianami struktury wewnętrznej układu ciecz-ciecz.

Inwersja przejściowa zachodzi w określonym zakresie udziałów faz. W związku z tym krytyczny udział objętościowy wody, przy którym w układzie zanikają jej wyraźne krople, nie musi być tożsamy z takim udziałem krytycznym, przy którym zanikają w nim krople oleju i odwrotnie.

Warunki tworzenia przez dwie cieczce układu rozproszonego charakteryzuje liczba Webera, definiowana ogólnie jako [7]

$$We = \frac{w_{fc}^2 \cdot d_z \cdot \rho_{fc}}{\sigma_{c-c}} \quad (1)$$

gdzie:

- w_{fc} – prędkość przepływu fazy ciągłej,
- d_z – średnica zastępcza,
- ρ_{fc} – gęstość fazy ciągłej,
- σ_{c-c} – napięcie powierzchniowe układu ciecz-ciecz.

Określenie prędkości oraz średnicy zastępczej w równaniu (1) jest często umowne i wynika z warunków przebiegu konkretnego procesu.

3. CHARAKTERYSTYKA PRZEPLÝWÓW EMULSJI WODNO-ROPNYCH

Z punktu widzenia jakościowo-ilościowej charakterystyki przepływów dwufazowych zarówno w przewodach rurowych i kanałach, jak i w przepuszczalnych ośrodkach porowatych, istotną kwestią jest struktura przepływu. Przez pojęcie struktury przepływu dwufazowego rozumie się rozkład faz w obszarze przepływu mieszaniny dwufazowej zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Tradycyjne i powszechnie akceptowane podejście do badań przepływu mieszaniny dwufazowej wskazuje na potrzebę określenia rodzaju struktur przepływu oraz zakresu ich występowania. Natomiast praktyczne wykorzystanie tego typu badań jest możliwe tylko wtedy, gdy ich wyniki będzie można opisać ilościowo. Do niedawna identyfikacja struktury dwufazowej określana była wyłącznie na podstawie subiektywnych obserwacji wizualnych, co spowodowało powstanie licznych technik pomiarowych. Zalicza się do nich m.in. metody optyczne, wysoko cenione z uwagi na nieinwazyjny charakter pomiaru oraz rodzaj wyniku w postaci obrazu.

Ogromny postęp w tym zakresie wiąże się z dziedzina wiedzy zwaną stereologią, która zajmuje się zagadnieniem tego, do jakiego stopnia możliwe jest odczytanie cech przestrzennych obserwowanych obiektów na podstawie analizy ich płaskich obrazów. Nauka ta, łącząca wiedzę z zakresu stereometrii, rachunku prawdopodobieństwa oraz statystyki matematycznej, doprowadziła do powstania nowego działu zwanego geometrią stochastyczną, a jego rozwój spowodował powstanie nowych metod stereologii, które upowszechniły się w ostatniej dekadzie XX w. Generalnie prawidłowa ocena struktury przepływu dwufazowego jest obecnie przedmiotem intensywnych prac badawczych [15].

Przykładem rozwiązania problemu tego typu była klasyfikacja struktur dla różnych przypadków występowania przepływu dwufazowego gaz-ciecz w kanałach pionowych

oraz współprądowego wznoszącego przepływu obu faz. W ramach tej klasyfikacji wyodrębniono m.in. przepływy pęcherzykowe, korkowe i dyspersyjne [18].

Przepływ cieczy wielofazowych w ośrodkach porowatych jest procesem znacznie bardziej złożonym od przepływu cieczy w rurach [19]. W układzie rozproszonym (w pianie, emulsji czy zawiesinie) przepływającym w ośrodku porowatym zachodzą zmiany składu i właściwości. Zmiany te wynikają m.in. z oddziaływania na siebie układu rozproszonego i ośrodka oraz z naruszania stabilności układu rozproszonego wskutek adsorpcji jego składników w porowatym ośrodku.

Szczególnie silny spadek prędkości cieczy obserwuje się, gdy wielkość elementów fazy rozproszonej (cieczy lub gazu) jest tego samego rzędu co średnica kapilar. W tym przypadku ciecz dwufazowa przemieszcza się w kapilarach w postaci oddzielnych słupków (paciorków, koralików) fazy ciągłej i rozproszonej. Taki charakter przepływu emulsji i pian w kapilarach nazywa się koralikowym lub paciorkowym [1,13].

Podczas przepływu w kapilarach słupków (koralików) cieczy dopływająca ciecz gorzej zwilża ścianki kapilar niż ciecz odpływająca. Zjawisko to nazywa się histerezą zwilżania, a spowodowane przez to zmniejszenie przepuszczalności kapilar – efektem Jamaina [1, 3, 13]. Skutkiem histerezy zwilżania jest nierówność spadków ciśnień kapilarnych w miejscu dopływu i odpływu cieczy. Aby oderwać kroplę od zwilżanej przez nią ścianki kapilary, ciśnienie w kapilarze nie może być mniejsze od

$$\Delta p_1 \approx \frac{2\sigma}{R} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (2)$$

Ciśnienie całkowite p_l potrzebne do pokonania histerezy zwilżania (przyczyny efektu Jamaina) w kapilarze wypełnionej emulsją można obliczyć z przybliżonej zależności

$$p_h \cong \frac{\sigma RIC}{r^3} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (3)$$

gdzie:

- σ – napięcie powierzchniowe między fazami emulsji,
- l – długość wypełnionej części kapilary,
- C – stężenie objętościowe fazy rozproszonej,
- r – promień kropeł emulsji,
- θ_1, θ_2 – kąty zwilżania w miejscu dopływu i odpływu,
- R – promień kapilary.

Równanie (3) należy stosować dla $R < r < l$, tzn. wtedy, gdy krople fazy rozproszonej zamykają cały przekrój kapilary i ich liczba jest znaczna. W przeciwnym bowiem przypadku, tzn. gdy $r < R$, efekt Jamaina nie istnieje. Można to uwzględnić w zapisie równania (3), wprowadzając funkcję Heaviside'a $H(r-R)$ [13]

$$p_h \cong \frac{\sigma RIC}{r^3} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) H(r-R) \quad (4)$$

gdzie

$$H(r-R) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \frac{r}{R} > 1 \\ 0 & \text{dla } \frac{r}{R} < 1 \end{cases} \quad (5)$$

Ze wzrostem prędkości przepływu emulsji wodno-ropnych w hydrofilowych kapilarach kąt zwilżania po stronie odpływu nie zmienia się, natomiast po stronie dopływu zwilżalność maleje niemalże do zera, tzn. $\theta_1 \rightarrow 180^\circ$. Można więc przyjąć, że maksymalna wartość ciśnienia potrzebnego na pokonanie histerezy zwilżania przy dużych prędkościach przepływu emulsji wynosi

$$p_h = \frac{2\sigma l C}{r^3} H(r-R) \quad (6)$$

4. MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA DYFUZJOFOREZY W EKSPLOATACJI ROPY

Jak już wcześniej wspomniano, typową metodą wydobywania ropy naftowej ze złóż jest wypieranie jej za pomocą wody. Konsekwencją stosowania tej metody jest zaleganie w złożach dużej ilości emulsji, którą tworzy ropa naftowa z wodą. Dlatego też poszukuje się metod zwiększających wydobycie ropy, głównie z uwodnionych złóż. Jedną z nich, należąca do tzw. metod nietłokowych wydobywania ropy naftowej, jest metoda oparta na zjawisku dyfuzjoforezy [1, 2, 13]. Metoda polega na przemieszczaniu kropeł emulsji wzdłuż gradientu stężenia substancji powierzchniowo czynnej [4].

Zgodnie z równaniem Dieriągina–Duchina szybkość dyfuzjoforezy

$$u_{df} = \frac{r \left| \frac{d\sigma}{dC} \right|}{2\eta + 3\eta' + \frac{C}{RTD} \left(\frac{d\sigma}{dC} \right)^2} \text{grad } C \quad (7)$$

gdzie: η, η' – dynamiczny współczynnik lepkości wody i ropy.

Przyczyny tego specyficznego zjawiska opisane są w pracy [4]. Z równania (7) wynika, że do przemieszczenia kropli emulsji wskutek dyfuzjoforezy potrzebny jest gradient stężenia substancji powierzchniowo czynnej, przy czym stężenie tej substancji musi być mniejsze od stężenia granicznego, gdyż wtedy $|d\sigma/dC| \neq 0$. Pod wpływem dyfuzjoforezy krople emulsji będą przemieszczały się w stronę dużych stężeń substancji powierzchniowo czynnej, aż wzrastające stężenie spowoduje zmiany napięcia powierzchniowego σ . Szybkość przemieszczania się zależy od aktywności powierzchniowej substancji powierzchniowo czynnej. Czas τ_0 , po którym z kapilary o długości l będą wydobyte wszystkie krople

emulsji ($\tau_0 = l/u_{opt}$), osiąga wartość minimalną, gdy aktywność powierzchniowa substancji powierzchniowo czynnej jest optymalna

$$\left| \frac{d\sigma}{dC} \right|_{opt} = \sqrt{\frac{2\eta + 3\eta'}{C_0}} RTD \quad (8)$$

Szybkość dyfuzjoforezy dla optymalnej aktywności powierzchniowej

$$u_{opt} = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{RTD}{C_0(2\eta + 3\eta')}} \text{ grad } C \quad (9)$$

Jeżeli uwzględnimy przybliżoną zależność $\text{grad } C \approx 2C_0/l$, to otrzymamy

$$u_{opt} \approx \frac{r}{l} \sqrt{\frac{RTDC_0}{2\eta + 3\eta'}} \quad (10)$$

Czas pełnego wydobycia kropli emulsji

$$\tau_0 \approx \frac{l}{r \sqrt{\frac{RTDC_0}{2\eta + 3\eta'}}} \quad (11)$$

Warto zaznaczyć, że $\left| \frac{d\sigma}{dC} \right|_{opt} \approx 10^{-4} - 10^{-5} \text{ Nm}^2/\text{mol}$ i wartość ta jest o 2–3 rzędy mniejsza od aktywności powierzchniowej tradycyjnych substancji powierzchniowo czynnych. Jest to istotne stwierdzenie, ponieważ oznacza, że do realizacji dyfuzjoforezy można wykorzystywać substancje powierzchniowo czynne o niskiej aktywności powierzchniowej, a w tym także odpady zakładów produkujących te substancje (np. ze skróconymi rodnikami hydrofobowymi). W złożach ropy naftowej $l \approx 1 \text{ m}$, co przy $d\sigma/dC \approx 10^{-4} \text{ Nm}^2/\text{mol}$ umożliwi pełne wyekstrahowanie ropy w czasie $\tau_0 \approx 10^7 \text{ s}$, czyli w czasie kilku miesięcy. Czas ten w przemyśle wydobywczym ropy naftowej należy ocenić jako krótki.

Metoda dyfuzjoforezy może być szczególnie przydatna do wydobycia ropy ze złóż, w których pory mają kształt szczelin. Najlepszym modelem takiego złoża jest ciało o podwójnej porowatości, składające się z porowatych skał (bloków) o małej przepuszczalności, zawierających ropę, i z zespołu szczelin rozdzielających te bloki o dużej przepuszczalności [1, 3, 6]. Ponieważ objętość szczelin jest mała w stosunku do przestrzeni porowatej bloków, bloki skalne stanowią swoiste zbiorniki ropy, a szczeliny – drogi transportu.

Na podstawie powyższych stwierdzeń można określić najkorzystniejsze warunki do prowadzenia dyfuzjoforezy. Są to: możliwie długotrwałe utrzymywanie stałego gradientu stężeń w kierunku prostopadłym do odwiertu i stały odbiór kropli ropy naftowej wydostających się z bloków skalnych. Zdaniem autorów warunki takie można stworzyć, torpedując hydraulicznie odwiert w eksploatowanej części złoża (wzdłuż stropu pokładu i wzdłuż spągu). Następnie do szczelin znajdujących się na jednym poziomie należy wprowadzić roztwór substancji powierzchniowo czynnej, natomiast do szczelin na innym poziomie – wodę. Umożliwi to utrzymywanie gradientu stężenia substancji powierzchniowo czynnej na minimalnym poziomie, niezbędnym do całkowitego wyekstrahowania ropy naftowej.

5. PODSUMOWANIE

Analiza stosownej literatury wskazuje, że przepływy emulsji typu woda-ropa (lub ropa-woda) w rurociągach lub innych instalacjach przepływowych są aktualnie dobrze poznane [7, 8, 10, 11]. Mimo to występują niejednokrotnie poważne trudności związane z ich pełną charakterystyką jakościowo-ilościową, która umożliwiłaby ich efektywne badania modelowe i symulacyjne.

Znacznie gorzej sytuacja w tym zakresie przedstawia się w odniesieniu do przepływów emulsji w ośrodkach porowatych. Niektórzy autorzy są zdania, że emulsje ropne tworzą się dopiero w odwiercie i w instalacjach przemysłowych napowierzchniowych [9]. Najpoważniejszym argumentem przemawiającym za tą hipotezą jest generalnie wysoka lepkość tych emulsji – wielokrotnie większa od lepkości ropy (do 200 razy), nie wspominając o wodzie.

W literaturze dominuje jednak pogląd, poparty licznymi badaniami eksperymentalnymi z wykorzystaniem zarówno sztucznych, jak i naturalnych ośrodków porowatych, że w złożach naftowych eksploatowanych tradycyjną metodą wypierania ropy naftowej przez wodę niewydobyte pozostają bardzo duże ilości ropy tworzącej z wodą emulsje. Szacunki wskazują na to, że są to ilości porównywalne z ilością ropy naftowej wyeksploatowanej.

W związku z tym problem wydobywania ropy wydaje się nader aktualny. Świadczą o tym zresztą doświadczenia i prace w tym zakresie, prowadzone w wielu czołowych krajach naftowych na świecie. Można sądzić, że perspektywiczne mogą okazać się przede wszystkim tzw. nietłokowe metody eksploatacji ropy, do których zaliczana jest m.in. opisana powyżej metoda dyfuzjoforetyczna.

LITERATURA

- [1] Aksielrud G.A., Altszuler M.A.: *Ruch masy w ciałach porowatych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987
- [2] Altšuler M.A., Derjagin B.V., Duchin S.S., Sisin V.D.: *O roli diffuzjoforeza v processach izvlečenija nefti iz poristych sred*. Doklady AN SSSR, t. 210, No. 2, 1973
- [3] Babaljan G.A.: *Fiziko-chimičeskie processy v dobyče nefti*. Izd. „Nedra”, Moskwa 1974
- [4] Duchin S.S., Derjagin B.V.: *Primenenie termodinamiki neobratimych processov k teorii kapilljarnogo osmosa i diffuzjoforeza*. Doklady AN SSSR, t. 159, No. 2, 1964
- [5] Dya R., Pendyk B., Troniewski L., Witczak S.: *Opory i stopień zapełnienia w przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz*. Studia i Monografie Politechniki Opolskiej, z. 150, 2003
- [6] Gimatudinov Š.K.: *Fizika neftjanogo plasta*. Izd. „Gostoptechizdat”, Moskwa 1963
- [7] Hapanowicz J.: *Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych*. Studia i Monografie Politechniki Opolskiej, z. 2004. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2007

- [8] Janocha A., Bęben D.: *Zastosowanie nowej generacji środków chemicznych do rozdziału zemulgowanych układów ropa naftowa-woda*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 24, z. 2, 2007
- [9] Jewulski J.: *Napowierzchniowe zagospodarowanie złóż kopalin ciekłych*. UWND AGH, Kraków 2003
- [10] Jewulski J.: *Metody intensyfikacji wydobycia płynów złożowych*. UWND AGH, Kraków 2007
- [11] Jewulski J., Zagrajczuk D.: *Badania laboratoryjne demulgacji rop naftowych metodą termochemiczną*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 24, z. 1, 2007
- [12] Jewulski J., Wojnarowski P.: *Wybrane zagadnienia doskonalenia technologii wtórnych metod eksploatacji złóż ropy naftowej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 24, z. 2, 2007
- [13] Kowalski S.J.: *Inżynieria materiałów porowatych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004
- [14] Liszka K., Rychlicki S.: *Wtórne metody eksploatacji złóż ropy (wybrane zagadnienia)*. Mat. St. Podypl. „Eksploatacja i ochrona złóż węglowodorów”, WVNIG AGH, Kraków 2002 (materiały niepublikowane)
- [15] Masiukiewicz M., Ulbrich R.: *Metody stereologiczne w identyfikacji struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz*. Studia i Monografie Politechniki Opolskiej, z 199. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2007
- [16] Rychlicki S., Stopa J., Wojnarowski P.: *Możliwości rewitalizacji złóż ropy naftowej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 25, z. 1, 2008
- [17] Tal-Figiel B., Kosmala-Szczurek B.: *Metody wyznaczania powierzchni międzyfazowej w układach ciecz-ciecz*. Inżynieria Chemiczna Procesowa, t. 18, 1997
- [18] Ulbrich R.: *Identyfikacja struktur przepływu dwufazowego gaz-ciecz*. Wyd. WSI w Opolu, Studia i Monografie, z. 32, Opole 1989
- [19] Waclawik J.: *Mechanika płynów i termodynamika*. UWND AGH, Kraków 1993
- [20] Witczak S., Troniewski L., Dyga R., Pendyk B.: *Inwersja faz ciekłych w przepływach trójfazowych gaz-ciecz-ciecz*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa, t. 25, 2004
- [21] Wojtanowicz A.K., Hernandez J.: *Un-recovered Oil by Vertical Wells with Water Coning – Assessment, Prediction and Remediation*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 25, z. 1, 2008