

Łukasz Habera  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Model termodynamiczny do wyznaczania minimalnego ciśnienia mieszania MMP (*minimum miscibility pressure*) układu CO<sub>2</sub>–ropa naftowa

W minionej dekadzie w publikacjach krajowych traktujących o popularnym wówczas zagadnieniu sekwestracji CO<sub>2</sub> i procesach intensyfikacji wydobywania ropy naftowej (*enhanced oil recovery*, EOR) pojawiały się jedynie wzmianki o minimalnym ciśnieniu mieszania (MMP) i szerzej rozumianej problematyce mieszalności płynów. W całej złożoności procesu podziemnego zatłaczania CO<sub>2</sub> problematyka wyznaczania MMP nigdy nie była w Polsce przedmiotem gruntownych badań. Pierwsze publikacje prac dotyczących symulacji cyklicznego zatłaczania gazu do złóż węglowodorów, w ujęciu wielokrotnego kontaktu w teoretycznych komorach mieszania, zaczęły się pojawiać pod koniec lat 60. ubiegłego stulecia. Jedną z pierwszych istotnych prac przedstawili Alton B. Cook i C. J. Walker [2], zawierając w niej schemat i ogólną koncepcję prowadzenia symulacji metodą wielokrotnego kontaktu płynów w teoretycznych komorach mieszania, polegającą na transferze zrównoważonych faz układu z komórki do komórki (CTC, *cell to cell*). Zaproponowana przez Cooka [2] metoda służyła ocenie zjawiska odparowywania lekkich frakcji ropy naftowej w procesie cyklicznego zatłaczania gazu, a schemat ideowy obejmował swym zakresem zaledwie 20 komórek, ale ze znaczną wówczas liczbą iniekcji – 120. Cztery lata później Cook i Metcalfe [7] przedstawiają rezultaty symulacji zatłaczania gazu wzbogaconego w oparciu o prezentowany wcześniej model wielokrotnego kontaktu (*cell to cell*). Autorzy wprowadzają jednak rozluźnienie wcześniejszego warunku, co do liczby komórek i niezbędnej liczby iniekcji. Cook i Metcalfe [7] pierwszy raz zwracają uwagę na mnogość możliwych konfiguracji również w aspekcie ilościowym i jakościowym transferowanego medium. *De facto* praca Cooka i Metcalfe'a [7] otworzyła drogę do budowania układów bardziej złożonych,

o różnych konfiguracjach, rozszerzając zakres swego stosowania również o ocenę zjawisk mieszania płynów czy wreszcie wypierania węglowodorów. Współczesne prace dotyczące minimalnego ciśnienia mieszania (MMP) wyznaczanego na podstawie symulacji typu *cell to cell* w głównej mierze bazują na nowatorskiej pracy Cooka i Metcalfe'a [7]. W opublikowanych dotychczas pracach daje się zauważyć, że każdy model symulacyjny wielokrotnego kontaktu płynów w teoretycznych komorach mieszania musi zawierać zdefiniowane, spośród wielu innych, trzy zasadnicze elementy: 1) liczbę komórek, w których dochodzi do kontaktu płynów, 2) objętość zatłaczanego płynu (na ogół gazu, np. CO<sub>2</sub>), 3) charakter transferu płynu do następnych komórek po rozdziale faz, tzn. objętość i rodzaj transferowanej fazy. Tylko te trzy parametry zestawione w różnych konfiguracjach dają setki możliwych rozwiązań. Wliczając w budowę modelu symulacyjnego dobór równania stanu, wybór reguł mieszania składników układu oraz procedury obliczeń równowagowych rozdziału faz (*flash calculations*), możliwa jest do zbudowania nieskończona liczba modeli, ograniczona jedynie trafnością i wiarygodnością wyników. Autorzy najnowszych publikacji traktujących o MMP decydują się na bardzo oszczędne opisy swoich modeli, a przedstawiane przez nich schematy dość lakonicznie oddają przebieg cyklu tłoczenia i toku obliczeń. W nurt ten wpisują się prace zarówno uznanych, jak i młodych badaczy zjawiska mieszania płynów, takich jak: J. N. Jaubert [6], R. T. Johns [1] oraz Zhao [11].

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji laboratoryjnych i wykonanej symulacji numerycznej procesu wypierania ropy naftowej dwutlenkiem węgla (CO<sub>2</sub>) autor proponuje własny model analityczny badań multikontaktowych (CO<sub>2</sub>) i ropy naftowej.

## Nowy model analityczny

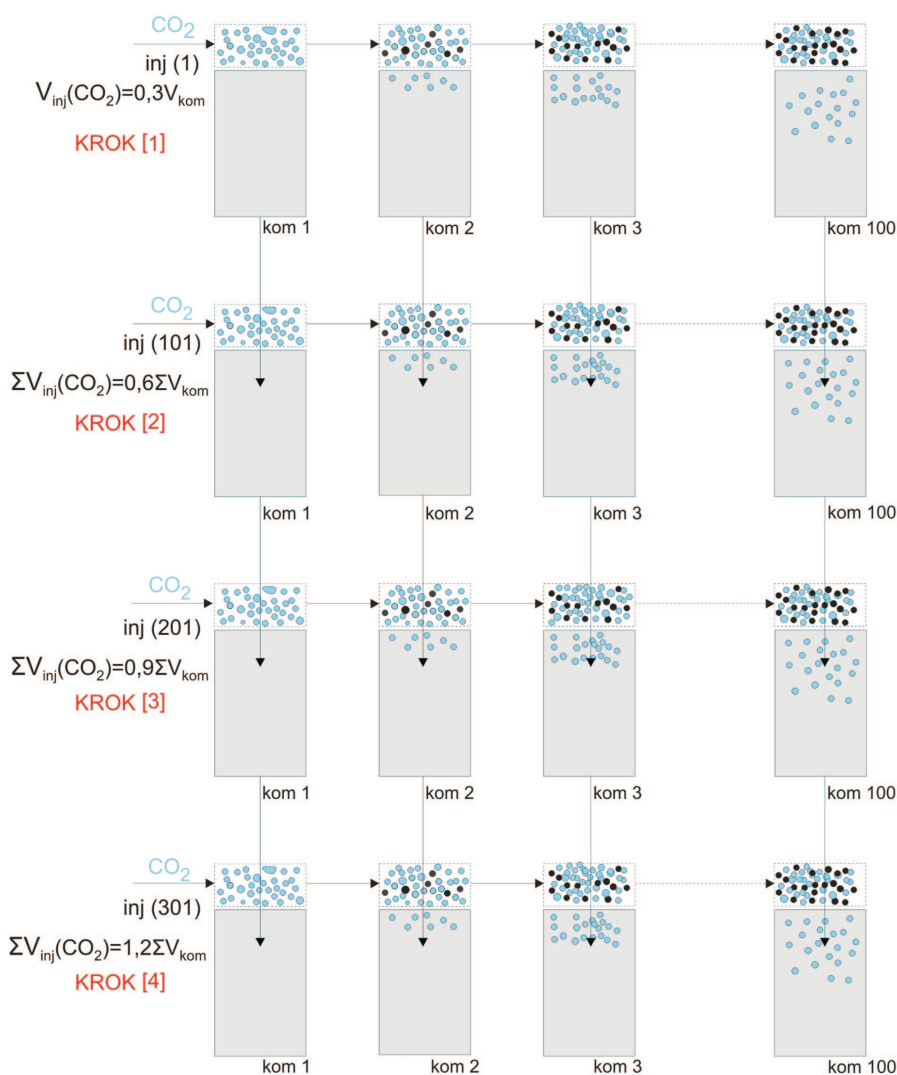
Proponowany model analityczny do wyznaczania minimalnego ciśnienia mieszania (MMP) oparty jest na metodzie wielokrotnego kontaktu płynów (zatłaczanego i wypieranego) w koncepcyjnych komorach mieszania, symulując przebieg testu laboratoryjnego frontального wypierania ropy naftowej dwutlenkiem węgla na fizycznym modelu złoża typu „cienka rurka” (*slim tube test*). Sercem

modelu jest moduł obliczeń termodynamicznej równowagi fazowej z wykorzystaniem równania stanu Soavego-Redlicha-Kwonga, SRK. Złoże węglowodorów, do którego zatłaczany jest dwutlenek węgla, reprezentowane jest przez sekwencję 100 kolejno zestawionych koncepcyjnych komórek, w których dochodzi do kontaktu zatłaczanego gazu i wypieranej ropy.

### Kluczowe założenia modelu

- Każda ze stu komórek początkowo zawiera oryginalny płyn złożowy.
- Temperatura i ciśnienie w każdej komórce jest stałe i odpowiada warunkom prowadzenia testu.
- Objętość każdej koncepcyjnej komory mieszania, tzw. komórki, jest stała (założono  $1 \text{ dm}^3$ ).
- Sumaryczna objętość zatłoczonego  $\text{CO}_2$  równa jest 1,2 sumy objętości wszystkich stu komórek stanowiących *slim tube*.
- $\text{CO}_2$  zatłaczany jest w porcjach równych 0,3 objętości komórki  $V_{kom}$ .
- Pomiedzy kontaktującymi się płynami ustala się równowaga termodynamiczna.
- Nadmiar objętości przekraczający  $V_{kom}$  transferowany jest do następnej (drugiej) komórki w serii, gdzie dochodzi do kolejnego kontaktu z oryginalnym płynem złożowym, ustala się stan równowagi, a nadmiar objętości  $\Delta V_{kom}$  przetłaczany jest do trzeciej komórki itd.
- Przepływ jest jednowymiarowy i nie zależy od czasu.
- Zachowanie fizyczne płynu, w tym osiągnięcie stanu mieszalności, opisane jest wyłącznie własnościami termodynamicznymi układu.

który początkowo służył autorom raczej do badania cyklicznego zatłaczania gazu niż do oceny zjawiska mieszalności płynów.



Rys. 1. Schemat logiczny toku symulacji testu *slim tube* (mieszalnego wypierania ropy naftowej dwutlenkiem węgla). Eksperyment polega na przetłoczeniu porcji  $\text{CO}_2$  przez serię stu komórek. Każdej iniekcji towarzyszą obliczenia równowagowe i bilansowe. Test prowadzony jest do momentu zatłoczenia objętości  $\text{CO}_2$  równej 1,2 sumy objętości wszystkich komórek

Schemat ideowy przebiegu symulacji odpowiada temu zaproponowanemu przez Cooka i Metcalfe'a [7],

### Moduł obliczeń termodynamicznej równowagi faz

Obliczenia równowagowe prowadzone są dla każdej komórki symulatora, dlatego ujęto je w jeden moduł, który jest każdorazowo wykorzystywany w kolejnych krokach symulacji. W tym celu zaadaptowano algorytm opisany przez takich autorów jak Danesh [3] oraz Warowny i Nagy [9]. Moduł realizuje podstawowe obliczenia termodynamiczne w oparciu o równanie stanu SRK, zwracając wszystkie niezbędne dane opisujące liczebność materii i stan skupienia mieszaniny CO<sub>2</sub>–węglowodory. Liczne pozycje literaturowe (np. [3, 5, 10]) podkreślają zalety i wskazują właściwe odwzorowanie zachowań fazowych węglowodorów przez równania stanu: Van der Waalsa, Redlicha-Kwonga, Soavego-Redlicha-Kwonga, Penga-Ro-

binsona, Dietericiego czy Patela-Teji, rekomendując je jako efektywne i sprawdzone narzędzie do obliczeń związanych z badaniami kontaktowymi, różnicowymi czy separacyjnymi oryginalnych płynów złożowych. Jednak w przypadku badanego układu CO<sub>2</sub>–ropa naftowa (nienaturalnego w ujęciu antropogenicznym) zastosowanie równania SRK w symulacjach typu mieszania multikontaktowego (*cell to cell*) nie było do tej pory szerzej badane ani tym bardziej udokumentowane, a publikowane materiały na ten temat są bardzo skromne. Dlatego do budowy modelu analitycznego autor implementował właśnie równanie stanu SRK, co stanowi element nowości w dotychczas publikowanych pracach z zakresu zastosowania CO<sub>2</sub> w procesach EOR.

### Wyznaczenie niezbędnej liczby iniekcji do *slim tube*

Na tym etapie obliczeń należy zdefiniować kluczowe parametry symulacji, które są ściśle związane z ilością wykonywanych obliczeń równowagowych. Należą do nich: liczba komórek symulacyjnych  $n_{kom}$ , skumulowana objętość CO<sub>2</sub> przeznaczona do zatłoczenia do *slim tube* wyrażona procentowo w odniesieniu do objętości komórki  $V_{kom}$  oraz stosunek objętości jednorazowo zatłoczonego CO<sub>2</sub> do objętości komórki, czyli wykładnik gazowy GOR (*gas oil ratio*). Te trzy parametry można dowolnie modyfikować, jednak założone raz, pozostają stałe w trakcie całego toku obliczeń. Gdy powyższe wartości są już wybrane, na ich podstawie można wyliczyć sumaryczną liczbę iniekcji do *slim tube* –  $L_{inj}$ , niezbędną do przeprowadzenia eksperymentu według wcześniej zdefiniowanych parametrów:

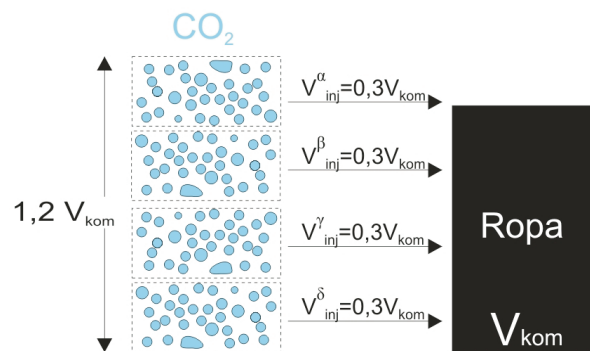
$$L_{inj} = n_{kom} \cdot 1,2 \cdot \frac{V_{kom}}{V_{inj}} \quad (1)$$

gdzie:  $n_{kom}$  to liczba wszystkich komórek reprezentujących *slim tube*, a stała 1,2 oznacza, iż objętość zatłoczonego czystego CO<sub>2</sub> równa jest 120% objętości komórki. Powyższe równanie (1) można zapisać również ze względu na

wykładnik gazowy (GOR) – taką formę równania znajdujemy w publikacjach [6, 11]:

$$L_{inj} = n_{kom} \cdot \frac{1,2}{GOR} \quad (2)$$

Poniżej prezentowany jest w formie graficznej (rysunek 2) wybór parametrów wyjściowych zastosowany w niniejszym modelu:

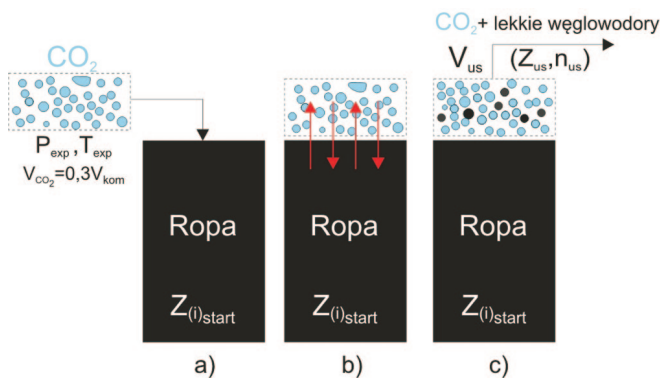


Rys. 2. Schemat toku iniekcji do jednej komórki dla GOR = 0,3 i skumulowanej objętości CO<sub>2</sub> przeznaczony do iniekcji, równej  $\Sigma V_{inj(CO_2)} = 1,2V_{kom}$

### Usuwanie nadmiaru objętości przekraczającej objętość komórki

Po iniekcji porcji gazu do komórki objętość mieszaniny  $V_{mix}$  mierzona w warunkach eksperymentu ( $P_{exp}$ ,  $T_{exp}$ ) przekracza objętość pojedynczej komórki  $V_{kom}$ . Przyjęta metoda polega na bilansowaniu obu objętości w warunkach ( $P_{exp}$ ,  $T_{exp}$ ) i przekazywaniu nadmiaru zatłoczonej mieszaniny do następnej komórki w serii. W pierwszej kolejności transferowana jest faza gazowa  $V_{mix(FG)}$ .

Model *slim tube* to seria 100 wirtualnych komórek obliczeniowych z mechanizmem transferowym płynów inspirowanym przebiegiem badań laboratoryjnych, w których w ujęciu ilościowym i jakościowym płyn (na ogół gaz) usunięty z komórki poprzedzającej jest tożsamy z płynem zatłaczanym do następnej komórki w serii. Innymi słowy, zrównoważona faza gazowa z komórki nr  $n$  jest



Rys. 3. a) obraz iniekcji CO<sub>2</sub> do wirtualnej komórki mieszania, b) transfer składników mieszaniny pomiędzy fazą gazową i ciekłą – osiągnięcie stanu równowagi termodynamicznej, c) usuwanie objętości przekraczającej objętość komórki – usunięta zostaje mieszanina dwutlenku węgla i lekkich węglowodorów, które odparowały z oryginalnego płynu złożowego

### Kryterium wyznaczania MMP – obliczanie współczynnika szczypania $RF$ (recovery factor) [%]

Przedstawiony model integruje rozwiązanie zaproponowane przez J. Jauberta [6] polegające na wyznaczeniu współczynnika szczypania złoża (*recovery factor*,  $RF$ ) oraz osiągnięcie zespołu badawczego Uniwersytetu Stanforda [8] dotyczące zmiany długości linii kompozycyjnych (*tie-lines*), które przybierają wartość zero wraz z osiągnięciem punktu krytycznego i osiągnięciem stanu zmieszania faz.

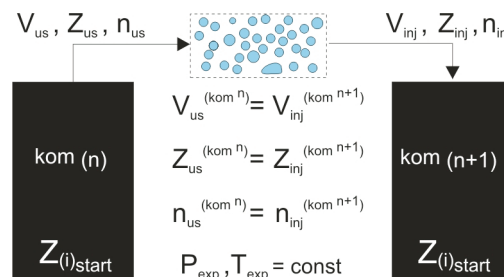
Ukończenie pełnego cyklu obliczeniowego, składającego się z czterech kroków iniekcji CO<sub>2</sub> do *slim tube*, dostarcza wszystkich niezbędnych danych do wyznaczenia współczynnika szczypania złoża  $RF$  [%]. W niniejszym modelu wprowadzono definicję współczynnika  $RF$  podaną uprzednio przez Jauberta [6] oraz Zhao, Adidharmę, Towlera i Radosza [11]. Zespoły badawcze Jauberta i Zhao w jednakowy sposób przedstawiają ten współczynnik.

W przypadku układu komórek, czyli serii o liczebności jak w niniejszym modelu  $n_{kom} = 100$ , współczynnik szczypania złoża  $RF_{1,2}^{(100)kom}$  obliczany jest z równania (3):

$$RF_{1,2}^{(100)kom} = \frac{\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}}{\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}^{start}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}$  to suma objętości fazy ciekłej wszystkich stu komórek pozostałej po przetłoczeniu CO<sub>2</sub> o objętości równej  $\Sigma V_{inj}^{CO_2} = 1,2 \Sigma V_{kom}$ . Obliczoną w warunkach eksperymentu sumę objętości fazy ciekłej  $\Sigma V_L$  przeliczamy na warunki standardowe, czyli  $\Sigma V_{L(P_{exp}, T_{exp})} \rightarrow \Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}$ .  $\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}^{start}$  to suma objętości fazy ciekłej oryginalnego płynu złożowego, którym wypełniona była seria stu komórek na początku symulacji, czyli przed iniekcją CO<sub>2</sub>.

transferowana do następnej komórki nr  $n + 1$ , gdzie po ustaleniu się stanu równowagi, zrównoważona faza gazowa jest transferowana do kolejnej komórki nr  $n + 2$  i tak dalej, aż do ostatniej komórki w serii nr  $n_c = 100$ . Nadmiar objętości usuwany z ostatniej komórki w serii jest bilansowany i nie bierze udziału w dalszych obliczeniach.



Rys. 4. Kluczowe założenia bilansowe w transferze substancji pomiędzy komórkami

Jak wynika z założeń modelu symulacyjnego, wszystkie komórki zawierają początkowo ten sam oryginalny płyn złożowy, dlatego wyrażenie z mianownika równania (3) możemy zapisać:

$$\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}^{start} = V_{L(P_{std}, T_{std})}^{start} \cdot n_{kom} \quad (4)$$

gdzie liczba komórek wynosi  $n_{kom} = 100$ , a ostateczna postać równania na współczynnik szczypania złoża w modelu symulacyjnym *slim tube* przedstawia się następująco:

$$RF_{1,2}^{(100)kom} = \frac{\Sigma V_{L(P_{std}, T_{std})}}{V_{L(P_{std}, T_{std})}^{start} \cdot n_{kom}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem liczby komórek współczynnik szczypania zmienia się – zwiększa swoją wartość. Po uwzględnieniu tej zależności  $RF_{n_{kom}}$  jest prezentowany w funkcji odwrotności pierwiastka kwadratowego z numeru komórki  $n_{kom}$ , dla której został obliczony. Granica tej funkcji przy  $(n_{kom} \rightarrow \infty)$  określa współczynnik szczypania  $RF^\infty$  dla nieskończonej liczby komórek:

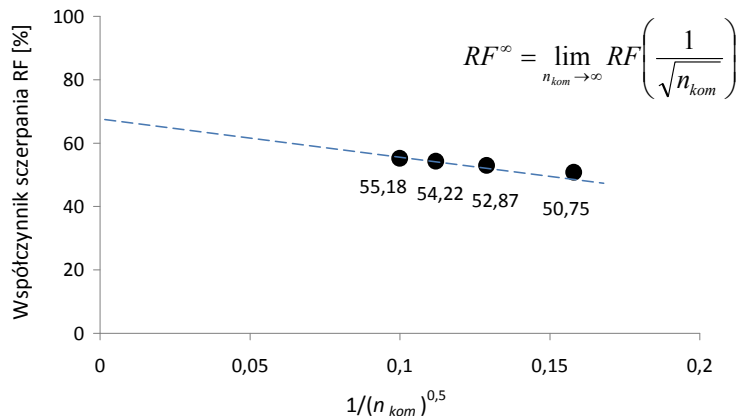
$$RF^\infty = \lim_{n_{kom} \rightarrow \infty} RF \left( \frac{1}{\sqrt{n_{kom}}} \right) \quad (6)$$

Stosując ekstrapolację liniową współczynnika  $RF(1/\sqrt{100})$ ,  $RF(1/\sqrt{80})$ ,  $RF(1/\sqrt{60})$  oraz  $RF(1/\sqrt{40})$  do wartości zero, znajdujemy granicę funkcji (6) równą współczynnikowi szczypania ( $RF$ ) odpowiadającemu nieskończonej liczbie komórek – rysunek 5.

Aby wyznaczyć minimalne ciśnienie mieszania w funkcji współczynnika szczypania  $MMP = f(RF)$ , należy przeprowadzić symulację testu wg prezentowanego algorytmu



dla trzech różnych ciśnień tłoczenia. Uzyskane współczynniki szcerpania  $RF$  w funkcji ciśnienia są ekstrapolowane do wartości ciśnienia, przy którym  $RF(P) = 97\%$  (def. MMP).



Rys. 5. Współczynnik szcerpania jako granica funkcji  $RF$ . Wartości liczbowe podano jako przykładowe – pochodzą one z odrębnego opracowania [4]

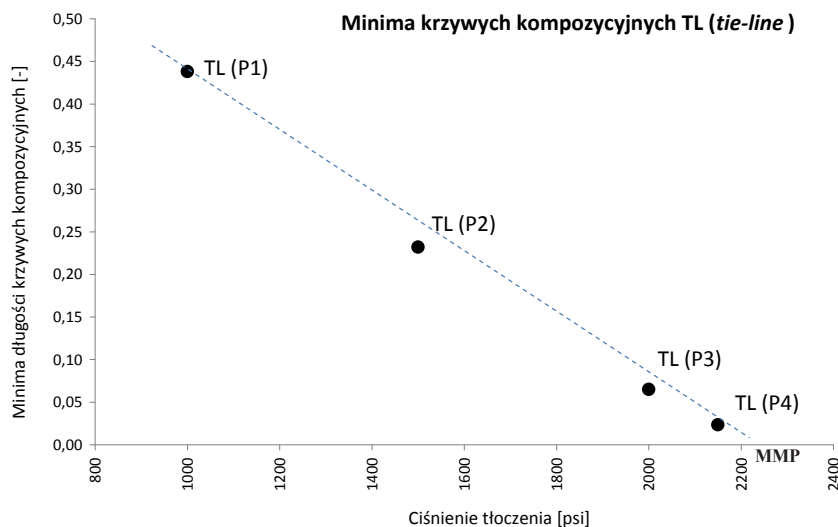
### Wyznaczanie MMP w oparciu o długość linii kompozycyjnych $TL$ (tie-lines)

Aby wyznaczyć MMP za pomocą współczynnika szcerpania  $RF$ , konieczne było przeprowadzenie wielu obliczeń – 400 pełnych obliczeń blokowych równowagi fazowej typu *flash* i tyle samo kalkulacji bilansowych związanych z transferem płynu pomiędzy komórkami. Tak bogaty zestaw danych pozwala na wyznaczenie MMP w oparciu o zmieniającą się długość linii kompozycyjnych  $TL$  (tie-lines). Metoda polega na wyznaczeniu wartości ciśnienia, dla którego linia kompozycyjna mieszaniny płynu wypieranego i wypierającego osiągnie wartość zero [6, 7, 8, 11]. Wraz ze wzrostem ciśnienia i zbliżaniem się do warunków mieszalnych długość linii kompozycyjnych  $TL$  zmniejsza się. Ekstrapolując uzyskane  $TL$  do wartości zero, otrzymujemy MMP, zgodnie z definicją:  $TL(MMP) = 0$ . Długość linii kompozycyjnej mieszaniny wieloskładnikowej jest opisana równaniem (7):

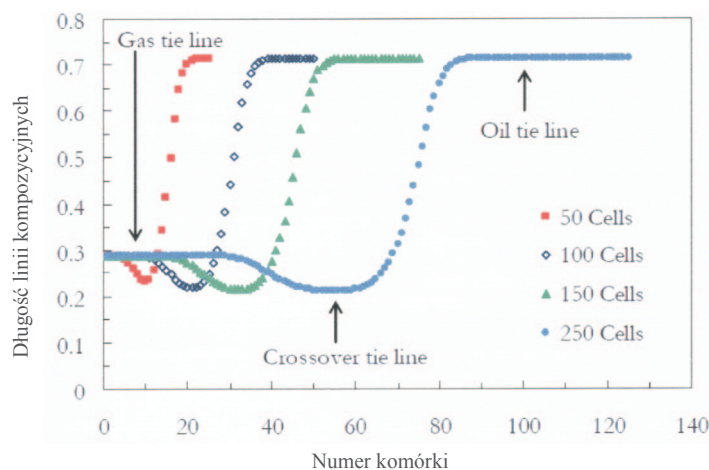
$$TL = \sqrt{\sum_1^{n_c} (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

gdzie:  $n_c$  to liczba składników układu, a  $x_i, y_i$  to procentowe udziały molowe  $i$ -tego składnika mieszaniny, odpowiednio w fazie ciekłej i gazowej.

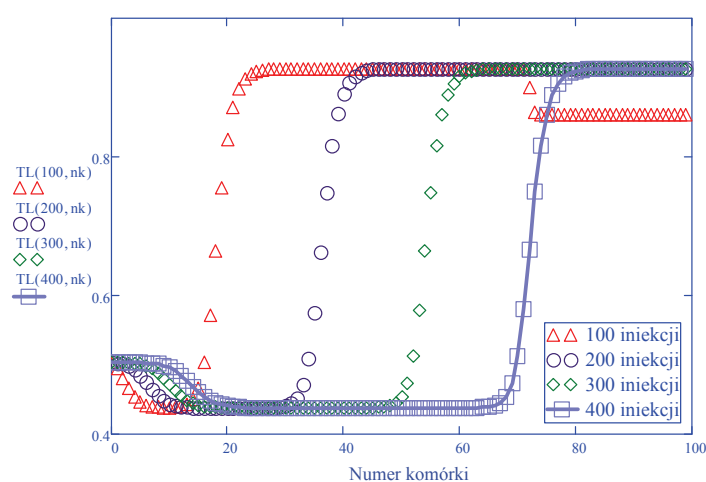
Nowoprezentowany model właściwie odwzorowuje przebieg linii kompozycyjnych (tie-lines), których zestawienie pokazano na rysunkach 7 i 8. Przedstawiony przez Ahmadiego i Johnsa profil (rysunek 7) [1] wskazuje na łączony mechanizm wypierania, w którym linie kompozycyjne: iniekcyjna (injection tie line) i początkowa (oil tie line) pozostają niezmiennie, a linia pośrednia/krzyżująca (crossover tie line) z każdym kolejnym kontaktem płynów zmniejsza swą długość. Bardzo podobny obraz linii kompozycyjnych uzyskano dla testowanego układu za pomocą algorytmu autora artykułu, co przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 6. Wyznaczenie MMP metodą ekstrapolacji liniowej w oparciu o obliczone minima linii kompozycyjnych  $TL$  dla czterech różnych wartości ciśnienia. Dane liczbowe pochodzą z symulacji wykonanej dla przypadku opisanego przez K. Ahmadiego i R. T. Johnsa [1]



Rys. 7. Profil długości linii kompozycyjnych (*tie-line length*) dla układu trójskładnikowego ( $C_1, C_4, C_{10}$ ) wypieranego przez gaz dwuskładnikowy ( $C_1-CO_2$ ). Prezentowane dane pochodzą z obliczeń prowadzonych dla różnej liczby komórek – z zakresu 50 do 250, dla warunków  $P_{in} = 2000$  psi,  $T = 160^\circ F$  [1]



Rys. 8. Profil długości linii kompozycyjnych (*tie-line length*) dla układu trójskładnikowego ( $C_1, C_4, C_{10}$ ) wypieranego przez gaz dwuskładnikowy ( $C_1-CO_2$ ). Prezentowane dane pochodzą z obliczeń prowadzonych według algorytmu autora dla stu koncepcyjnych komórek i warunków eksperymentu  $P_{in} = 2000$  psi,  $T = 160^\circ F$  [5]

## Podsumowanie

Zastosowanie niepopularnego równania stanu, trafne skonstruowanie schematu logicznego, właściwe dobranie mechanizmów transferowych pomiędzy komórkami oraz efektywne zastosowanie równań bilansowych i algorytmu obliczeń równowagowych typu *flash calculations* czynią zbudowany model skutecznym narzędziem do wyznaczania minimalnego ciśnienia mieszania (MMP) i szacowania współczynnika szczypania złoża (*recovery factor, RF*). Ponadto zintegrowane rozwiązanie modelu pozwala wyznaczyć wartość MMP w oparciu o obliczony *RF* i niezależnie obliczoną minimalną długość linii kompozycyjnych (*minimum tie-line length*). Ma to szczególne znaczenie, gdy niefortunnie wybrana funkcja aproksymująca *RF* zwraca wartość daleko odbiegającą od tej zaobserwowanej (*lab.*) lub zamodelowanej (*sym.*). Wówczas niezależne rozwiązanie oparte na długości linii kompozycyjnych stanowić będzie element korekcyjny, spełniając również rolę kontrolną ostatecznego wyniku.

Wprowadzone przez autora modyfikacje powodują, iż nowy, usprawniony model analityczny charakteryzuje się następującymi zaletami:

- *Dowolną liczbą składników zatłaczanego gazu* – ma to szczególne znaczenie przy projektowaniu i symulacji procesu zatłaczania  $CO_2$  wzbogaconego o lekkie węglowodory bądź często stosowany azot,  $N_2$ .
- *Dowolną liczbą składników wypieranego płynu* – im więcej składników reprezentuje płyn złożowy, tym wiarygodniejsze dostajemy wyniki symulacji. Brak ograniczeń technicznych pozwala na szersze scharakteryzowanie wypieranego płynu, nieograniczając się jedynie do frakcji  $C_{7+}$ , jakkolwiek symulacja systemu składającego się z więcej niż 10–13 składników na ogół przekracza możliwości obliczeniowe komputera osobistego (PC).
- *Szerokim zakresem temperatur* – model symulacyjny sprawdza się dla całego zakresu stosowalności kubicznego równania stanu dla gazów rzeczywistych.
- *Dowolnymi proporcjami zatłaczanego gazu* – w literaturze przedmiotu najczęściej stosowane i rekomendowane przez innych autorów proporcje zatłaczanego gazu do objętości pojedynczej komórki to  $GOR = 0,3$  (*gas oil ratio*), jednakże wartość ta dobrana została w sposób

intuicyjny, dlatego zmodyfikowany model analityczny pozostawia użytkownikowi możliwość iniekcji gazu w dowolnej proporcji, przy czym zalecany jest przedział GOR (0,1÷1).

- *Dowolną objętością całkowitą przetłoczonego gazu* – w przeważającej liczbie doniesień literaturowych objętość CO<sub>2</sub> przeznaczona do przetłoczenia przez serię komórek to 1,2 sumy ich objętości. Nowy model daje możliwość dowolnej zmiany tego parametru, przy czym realnie uzasadnionym (w kontekście MMP) wydaje się pozostawianie go w zakresie (1,0÷2,0).
- *Stosunkowo niewielką liczbą komórek* – liczebność serii już na poziomie 100 koncepcyjnych komórek daje bardzo dobre rezultaty obliczeniowe. Wyeliminowana została konieczność tworzenia zespołu

komórek o liczebności np.  $n_c = 1000$  i więcej, co często obserwowane jest u innych autorów. W każdym przypadku ograniczenie liczby komórek skutkuje krótszym czasem ukończenia symulacji i ograniczeniem zapotrzebowania na moc obliczeniową wykorzystywanego narzędzia.

- *Niezależnym obliczaniem współczynnika szcerpania RF i długości linii kompozycyjnych TL (tie-line length)* – zmodyfikowany model analityczny efektywnie wykorzystuje licznie zebrane wyniki obliczeń równowagowych i transferowych. Bazując na jednym zbiorze wyników, model umożliwia wyznaczenie minimalnego ciśnienia mieszania MMP jednocześnie w oparciu o współczynnik szcerpania węglowodorów RF oraz obliczane długości linii kompozycyjnych (TL).

## Literatura

- [1] Ahmadi K., Johns Russel T.: *Multiple Mixing-Cell Method for MMP Calculations*. Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, 2008.
- [2] Cook A. B., Walker C. J., Spencer J. B.: *Realistic K-Values of C7+ Hydrocarbons for Calculating Oil Vaporization During Gas Cycling at High Pressures*. „Journal of Petroleum Technology” 1969, vol. 21, no 7.
- [3] Danesh A.: *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids*. Elsevier, 1998.
- [4] Habera Ł.: *Identyfikacja zjawisk fizycznych towarzyszących podziemnemu zatłaczaniu dwutlenku węgla*. Praca statutowa Instytutu Nafty i Gazu, 2010.
- [5] Habera Ł.: *The laboratory and analytical methods to predict the optimal pressure for CO<sub>2</sub> injection in to the geologic formation*. Presented on AAPG/SEG/SPE hedberg conference „Geological Carbon Sequestration: Prediction and Verification”, Vancouver 2009.
- [6] Jaubert J. N., Wolff L., Avaullee L., Neau E.: *A Very Simple Multiple Mixing Cell Calculation to Compute the Minimum Miscibility Pressure Whatever the Displacement Mechanism*. Ind. Eng. Chem. Res. 1998.
- [7] Metcalfe R. S., Cook A. B.: *Simplified Method for Calculation of Minimum Miscibility Pressure or Enrichment*. „SPE Journal” 1973, vol. 2, s. 116–124.
- [8] Wang Y., Orr F. M. Jr.: *Analytical Calculation of Minimum Miscibility Pressure*. „Fluid Phase Equilibria” 1997, vol. 139, s. 101–124.
- [9] Warowny W., Nagy St.: *Wyznaczanie punktu rosy węglowodorów w gazie ziemnym*. „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 2004, nr 4, s. 114–122.
- [10] Warowny W.: *Kubiczne równania stanu i ich wykorzystanie w gazownictwie ziemnym*. „Nafta-Gaz” 2007, nr 10, s. 613–623.
- [11] Zhao Z. G., Adidharma H., Towler B., Radosz M.: *Minimum Miscibility Pressure Prediction Using Statistical Associating Fluid Theory: Two- and Three-Phase Systems*. Conference Paper – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 24–27 September 2006, San Antonio, TX, USA.



Mgr inż. Łukasz HABERA – asystent, ukończył Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej, pracuje w Pionie Poszukiwań Złóż Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się metodami stymulacji złóż, prowadzi prace badawcze w dziedzinie termodynamiki gazu ziemnego, sekwestracji CO<sub>2</sub> i materiałów wysokoenergetycznych stosowanych w przemyśle naftowym.