

Wiesław Szott

Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Bilansowa metoda modelowania wypierania mieszającego w ośrodku porowatym

Wstęp

W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabierają zagadnienia sekwestracji CO₂ w podziemnych strukturach geologicznych. Spośród różnych typów takich struktur szczególne zainteresowanie budzą częściowo wyeksploatowane złoża ropy naftowej, ze względu na ich dość dobre rozpoznanie, istniejącą infrastrukturę napowierzchniową oraz unikalną możliwość połączenia procesu sekwestracji CO₂ z procesem wspomaganego wydobycia ropy (EOR) pozostałej w złożu. W większości takich przypadków proces EOR zachodzi w warunkach wypierania mieszającego (*miscible displacement*). Jako podstawowego narzędzia do modelowania procesów wypierania mieszającego używa się kompozycyjnych symulatorów złożowych.

Symulatory złożowe, a w szczególności symulatory kompozycyjne, są z reguły zaawansowanymi narzędziami programistycznymi pozwalającymi uzyskać szczegółowe wyniki prognoz eksploatacji złóż dla różnych mechanizmów ich szczypania. Wymagają one jednak znajomości wielu informacji dotyczących zarówno budowy geologicznej złóż, jak i właściwości płynów złożowych i ich oddziaływania z ośrodkiem porowatym. Dlatego ich użycie oznacza konieczność przygotowania i zweryfikowania

szczegółowych modeli wszystkich elementów składowych niezbędnych dla przeprowadzenia symulacji złożowych.

Spośród alternatywnych narzędzi i metod służących analizie pracy złóż swoją prostotą i elegancją wyróżniają się metody bilansowe, które choć ograniczają się do podstawowych wielkości i parametrów złóż, dostarczają podstawowych wyników takiej analizy w sposób szybki i efektywny. W literaturze poświęconej metodom bilansowym jest wiele pozycji odnoszących się do analogicznych problemów eksploatacyjnych, jednak brak jest jednolitego modelu, który łączyłby podejście bilansu materiałowego z prostym opisem procesu wypierania mieszającego.

W niniejszej pracy zaproponowano uproszczone rozwiązanie problemu wypierania mieszającego oparte na formalizmie Buckleya i Leveretta oraz jego sprzężenie z równaniem bilansu materiałowego. Przeprowadzona metoda jest uogólnieniem standardowych metod bilansowych, co pozwala prowadzić równoległe obliczenia dla procesu klasycznej eksploatacji i eksploatacji wspomaganego zatłaczaniem CO₂ do złoża. Proponowana metoda została w pracy zweryfikowana na modelu realnego złoża krajowego.

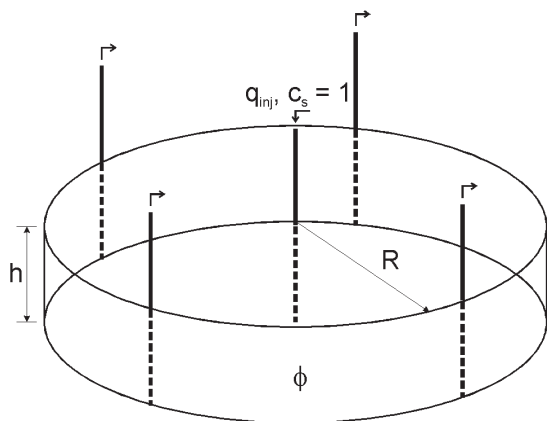
Model zjawiska wypierania mieszającego w ośrodku porowatym

Sformułowanie zagadnienia

W poniższym ujęciu zastosowano ogólną ideę opisu zjawiska wypierania płynów w ośrodku porowatym pochodzącą od Buckleya i Leveretta [1]. Użyto formalizmu dla ośrodka o symetrii osiowo-radialnej o współrzędnej przestrzennej r . Koncentracja płynu wypierającego ozna-

czona jest symbolem c_s , a płynu wypieranego symbolem $c_o = 1 - c_s$. Analizowany ośrodek porowaty opisany jest rozmiarem radialnym R i pionowym h oraz posiada porowatość ϕ (rysunek 1).

W przypadku stacjonarnego przepływu płynów o wielkości q dla przyjętej symetrii równanie ciągłości dla płynu wypierającego przybiera postać:



Rys. 1. Schemat geometrii modelu złoża dla analizy wypierania mieszającego

$$2\pi R h \phi \frac{\partial c_s(r,t)}{\partial t} = \frac{\partial q_s}{\partial r} = q \frac{\partial f_s}{\partial r}$$

i opisuje zmiany nasycenia tego płynu c_s w funkcji czasu t i położenia r .

Wprowadzono tutaj natężenie przepływu płynu wypierającego q_s , jako ułamek f_s całkowitej intensywności przepływu: $q_s = f_s \times q$.

Jeżeli w miejsce natężeń przepływu q i q_s wprowadzić prędkości przepływu u i u_s poprzez zależność typu $q = 2 \pi R h u$, równanie ciągłości przybiera postać:

$$\phi \frac{\partial c_s}{\partial t} = -u \frac{\partial f_s}{\partial r}$$

Całkowita prędkość przepływu rozkłada się na: $u = u_s + u_o$, gdzie u_o to prędkość płynu wypieranego. Uwzględniając prawo Darcy'ego dla ośrodka porowatego oraz prawo dyfuzji, prędkości te wyrażają się wzorami:

$$u_s = -\left(\frac{k}{\mu}\right) \frac{\partial p_s}{\partial r} - D \frac{\partial c_s}{\partial r}; \quad u_o = -\left(\frac{k}{\mu}\right)_o \frac{\partial p_o}{\partial r} - D \frac{\partial c_o}{\partial r}$$

gdzie D to stała dyspersji/dyfuzji. W dalszej analizie wykorzystano założenie braku ciśnienia kapilarnego dla wypierania mieszającego, tj. $p_s = p_o \equiv p$.

Wówczas przepływ ułamek płynu wypierającego wyraża się wzorem:

$$f_s = \frac{u_s}{u} = F_s - \frac{D}{u} \frac{\partial c_s}{\partial r}$$

gdzie: $F_s = \frac{1}{1 + \frac{k_o \mu_s}{k_s \mu_o}}$

Dla rozpatrywanego przypadku wypierania mieszającego przepuszczalności względne wyrażają się wzorami: $k_o = k \times c_o$, $k_s = k \times c_s$, gdzie k jest przepuszczalnością

bezwzględna ośrodka. Człon $\frac{\mu_s}{\mu_o}$ zastąpiono ogólnym parametrem M , zgodnie z uogólnieniem zaproponowanym przez Kovala [3]. Wówczas F_s przybiera postać:

$$F_s = \frac{M c_s}{1 + (M - 1) c_s}$$

Natomiast równanie ciągłości sprowadza się do postaci:

$$\phi \frac{\partial c_s}{\partial t} = -\frac{q}{2\pi R h} \frac{\partial c_s}{\partial r} \frac{dF_s}{dc_s} + \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c_s}{\partial r} \right)$$

Wprowadzenie bezwymiarowych współrzędnych: przestrzennej $\xi = \frac{r^2}{R^2}$ oraz czasowej $\tau = \frac{qt}{\pi R^2 h \phi}$ pozwala zapisać równanie ciągłości w postaci równania na $c_s(\tau, \xi)$:

$$\frac{dF_s}{dc_s} \frac{\partial c_s}{\partial \xi} - \frac{1}{P_e} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right) \frac{\partial c_s}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

gdzie $P_e \equiv \frac{q}{4\pi h D}$ to tzw. liczba Pécleta.

Rozwiązanie równania wypierania mieszającego

Równanie (1) nie posiada w ogólności dokładnego rozwiązania analitycznego. Poniżej zaprezentowano rozwiązanie przybliżone, oparte na rozwiązaniu przypadku szczególnego pomijającego człon dyspersji (tj. dla $\frac{1}{P_e} = 0$):

$$\frac{dF_s}{dc_s} \frac{\partial c_s}{\partial \xi} + \frac{\partial c_s}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

Równanie powyższe posiada szczególne rozwiązanie postaci: $c_s(\tau, \xi) = c_s(\eta(\tau, \xi))$

$$c_s(\eta) = \frac{1}{M - 1} \left(\sqrt{\frac{M}{1 + \alpha \eta}} - 1 \right) \text{ dla } \frac{\tau}{M} < \xi < M \tau$$

gdzie: $\eta(\tau, \xi) = \frac{\xi - \tau}{\lambda(\tau)}$, $\lambda(\tau) = \alpha \tau$ (3)

$$c_s(\tau, \xi) = 1 \text{ dla } \xi < \frac{\tau}{M}$$

$$c_s(\tau, \xi) = 0 \text{ dla } \xi > M \tau$$

Rozwiązanie to opisuje funkcję c_s zmienną w przedziale $\frac{\tau}{M} = \xi_{\min} < \xi < \xi_{\max} = M \tau$ oraz stałą poza tym przedziałem, czyli określa strefę zmienności koncentracji płynu wypierającego o szerokości: $2\lambda = \xi_{\max} - \xi_{\min}$, co definiuje stałą $\alpha = \frac{M^2 - 1}{2M}$.

Na bazie powyższego rozwiązania znajduwane jest rozwiązanie równania (1) uwzględniającego człon dyspersyjny. Rozwiązanie to z założenia ma postać funkcji (3) ze zmodyfikowanym parametrem $\lambda(\tau)$. Zastosowane przybliżenie polega na uproszczeniu współczynnika proporcjonalności w członie dyspersyjnym $\frac{\tau + \lambda\eta}{P_e\lambda} \frac{\alpha}{1 + \alpha\eta}$ przez wielkość $\frac{\tau\alpha}{P_e\lambda}$, tzn. użycie rozwiązania równania (2) na λ w liczniku tego członu: $\tau + \lambda\eta = \tau + \alpha\tau\eta = \tau(1 + \alpha\eta)$, co sprowadza równanie (1) do równania $\lambda(\tau)$:

$$\eta \left(\alpha - \frac{d\lambda}{d\tau} \right) - \frac{1}{P_e} + \frac{3}{2} \frac{\tau\alpha}{P_e\lambda} = 0$$

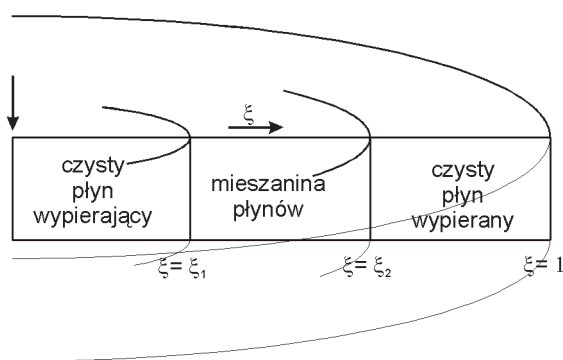
Po uśrednieniu po η : $\int \dots d\eta / \int dn$ rozwiązanie dla $\lambda(\tau)$ przybiera postać: $\lambda(\tau) = \varepsilon\alpha\tau$ ze stałym parametrem ε wyrażonym wzorem:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(1 - \gamma) + \frac{1}{2}\sqrt{(1 - \gamma)^2 + 6\gamma}$$

gdzie: $\gamma = \frac{1}{P_e\bar{\eta}\alpha}$, $\bar{\eta} = \frac{M-1}{M+1}$.

Właściwości uzyskanego rozwiązania

Uzyskane rozwiązanie jest dwuparametrowe: wymaga określenia parametru Kowala: M oraz liczby Pecleta opisującej dyspersję: P_e . Charakter rozwiązania implikuje powstanie w złożu następujących stref (rysunek 2):



Rys. 2. Schemat stref powstałych w złożu w wyniku zatłaczania płynu wypierającego

Do momentu przebiccia się płynu wypierającego do odwiertów wydobywczych istnieją 3 strefy:

1. strefa czystego płynu wypierającego określona przez zmienną $\xi = \frac{r^2}{R^2}$ w granicach $0 \leq \xi \leq \xi_1$, gdzie:

$$\xi_1 = \tau \left(1 - \frac{M-1}{M} \varepsilon \right),$$

2. strefa zmieszania płynu wypierającego i wypieranego w granicach $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, gdzie: $\xi_2 = \tau[1 + (M-1)\varepsilon]$,
3. strefa czystego płynu wypieranego w granicach $\xi_2 \leq \xi \leq 1$.

Moment przebiccia jest osiągnięty przy warunku $\xi_2 = 1$, tzn. dla $\tau \equiv \tau_{bt} = \frac{1}{1 + (M-1)\varepsilon}$. Od tego momentu w złożu istnieją dwie strefy odpowiadające strefom 1 i 2 powyżej.

Płyn wypierający obejmuje całą objętość złoża z chwilą, gdy spełniony jest warunek $\xi_1 = 1$, tzn. dla

$$\tau \equiv \tau_f = \frac{1}{1 - \frac{M-1}{M}\varepsilon}.$$

Rozszerzenie modelu na przypadek niestacjonarny: $q \neq \text{const}(t)$

W niniejszym rozdziale wprowadzono uogólnienie modelu podanego wyżej na przypadek niestacjonarny, w którym wydajność przepływu w złożu nie jest stała w czasie: $q \neq \text{const}(t)$. Dla uproszczenia formalizmu matematycznego poniżej rozpatrzono przypadek bez dyspersji ($D = 0$ lub $\varepsilon = 1$). Wykorzystano zależność znaną dla koncentracji płynu wypierającego, tj.

$$c_s = \frac{1}{M-1} \left(\sqrt{\frac{M\tau}{\xi}} - 1 \right) \text{ dla } \xi_1 \leq \xi \leq \xi_2, \quad c_s = 1 \text{ dla } \xi \leq \xi_1$$

i $c_s = 0$ dla $\xi \geq \xi_2$.

Przyjęto uogólnienie powyższej zależności w postaci:

$$c_s = \frac{1}{M-1} \left(\sqrt{\frac{1}{f(\xi)}} - 1 \right)$$

gdzie szukana funkcja $f(\xi)$ jest niejawną funkcją czasu τ i liniową funkcją ξ :

$$f(\xi) = A\xi + B$$

spełniającą warunki: $c_s(\xi_1) = 1$, $c_s(\xi_2) = 0$ lub: $f(\xi_1) = \frac{1}{M^2}$, $f(\xi_2) = 1$.

Warunki te spełnia funkcja:

$$f(\xi) = \frac{M^2 - 1}{M^2} \frac{\xi - \xi_1}{\xi_2 - \xi_1} + \frac{1}{M^2}$$

Użycie tej funkcji pozwala znaleźć objętość płynu wypierającego i wypieranego w warunkach złożowych zarówno w sytuacji przed przebicciem się płynu wypierającego, tzn. dla istniejącej strefy czystego płynu wypieranego, jak i po jej zaniku.

(1) Przed przebicciem zachodzą zależności:

- (1a) Objętość płynu wypierającego w warunkach złożowych (równa objętości zatłaczania):

$$V_s = V_{s,inj} = PV\xi_1 + PV \frac{1}{M+1} (\xi_2 - \xi_1)$$

(1b) Objętość płynu wypieranego:

$$V_o = PV \frac{M}{M+1} (\xi_2 - \xi_1) + PV(1 - \xi_2)$$

gdzie PV oznacza efektywną objętość porów złoża.

Powyższe równania nie są niezależne, gdyż ich suma daje warunek zachowania objętości złoża $PV = V_s + V_o$.

Prowadzą one do zależności: $\frac{V_{s,inj}}{PV} = \frac{M}{M+1} \xi_1 + \frac{1}{M+1} \xi_2$.

Przyjmując zależność $\xi_2 = M^2 \xi_1$ z modelu stacjonarnego, otrzymujemy rozwiązanie dla ξ_1 : $\xi_1 = \frac{1}{M} \frac{V_{s,inj}}{PV}$

i dla ξ_2 : $\xi_2 = M \frac{V_{s,inj}}{PV}$.

(2) Po przebicciu się płynu wypierającego zachodzą następujące zależności dla objętości płynów w strefie zmieszania:

dla płynu wypierającego:

$$\frac{V_{s,m}}{PV} = \frac{1}{M+1} \{2M(\sqrt{\xi_1} - \xi_1) - (1 - \xi_1)\}$$

dla płynu wypieranego:

$$\frac{V_{o,m}}{PV} = \frac{1}{M+1} \{2M(1 + \xi_1 - 2\sqrt{\xi_1})\}$$

Druga z tych zależności pozwala wyznaczyć położenie granicy stref ξ_1 w funkcji objętości płynu wypieranego $V_{o,m}$

$$\text{jako: } \xi_1 = \left[1 - \sqrt{\frac{V_{o,m}}{PV} \frac{M}{M+1}} \right]^2$$

Znajomość zmian koncentracji płynów wydobywanych: $c_s(\xi = 1)$ i $c_o(\xi = 1)$ pozwala wyliczyć ich strumień q_s i q_o , a w konsekwencji przyrosty wydobywania: ΔV_s i ΔV_o w przedziale czasu od t_1 do t_2 . Wyrażają się one wzorami:

$$\frac{\Delta V_o}{PV} = \frac{M-1}{M} [c_o^2(t_1) - c_o^2(t_2)] \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_s}{PV} = (M-1) \{c_o(t_2)[c_o(t_2) - 2] - c_o(t_1)[c_o(t_1) - 2]\} \quad (5)$$

Powyższe wzory mają praktyczne znaczenie, gdyż pozwalają obliczyć w kolejnych przedziałach czasowych wydobywanie (w warunkach złożowych) płynu wypierającego ΔV_s po jego przebicciu się do odwiertów wydobywczych przy zakładanym wydobywaniu płynu wypieranego ΔV_o . Sytuacja taka jest faktycznie realizowana podczas modelowania procesu wydobywania węglowodorów (np. ropy) wypieranych przez CO_2 , co jest tematem kolejnych rozdziałów pracy.

Model bilansowy złoża dla procesu wypierania mieszającego

Dla rozwiązania problemu wpływu zatłaczania płynu wypierającego (np. CO_2) na proces wydobywania płynu wypieranego (np. ropy) w procesie wypierania mieszającego, czyli procesu EOR, powyższy model wypierania jest uzupełniony o model bilansowy przedstawiony poniżej. Model ten standardowo obejmuje szereg równań odpowiadających prawom zachowania poszczególnych płynów i objętości złożowej:

1. Prawo zachowania ilości ropy (objętości w warunkach normalnych): $N(t) = N_{ini} - N_p(t)$, gdzie: $N(t)$ – ilość ropy w złożu, $N_p(t)$ – sumaryczne wydobywanie ropy.
2. Prawo zachowania ilości gazu węglowodorowego (objętości w warunkach normalnych): $G(t) = G_{ini} - G_p(t)$, gdzie: $G(t)$ – całkowita ilość gazu w złożu, w tym w czapie gazowej $G_{fg}(t)$ i rozpuszczonego w ropie $G_{fo}(t)$, $G_p(t)$ – sumaryczne wydobywanie gazu. Dodatkowo zachodzą równości: $G(t) = G_{fo}(t) + G_{fg}(t)$, $G_p(t) = G_{pg}(t) + G_{po}(t)$, gdzie: $G_{pg}(t)$ jest sumarycznym wydobywaniem gazu z czapy gazowej, $G_{po}(t)$ jest sumarycznym wydobywaniem gazu uwolnionego z ropy po jej dopłynięciu do odwiertów. Wydobywanie gazu z ropy $G_{po}(t)$ jest związane z wydobywaniem ropy $N_p(t)$ zależnością:

$$\frac{dG_{po}}{dt} = R_s \frac{dN_p}{dt}$$

gdzie R_s jest współczynnikiem rozpuszczalności gazu w ropie przy ciśnieniu na wlocie do odwiertu wydobywczego.

3. Prawo zachowania ilości wody (przypadek bez zatłaczania wody): $W(t) = W_{ini} + W_e(t) - W_p(t)$, gdzie: $W(t)$ – ilość wody w złożu, $W_e(t)$ – ilość wody, która dopłynęła do złoża z zewnętrznego akifera, $W_p(t)$ – sumaryczne wydobywanie wody ze złoża.
4. Prawo zachowania ilości płynu wypierającego (CO_2): $C(t) = C_{inj}(t) - C_p(t)$, gdzie: $C(t)$ – ilość płynu wypierającego w złożu, C_{inj} – sumaryczna ilość zatłoczonego płynu wypierającego, $C_p(t)$ – sumaryczna ilość wydobytego płynu wypierającego.

W powyższych wzorach wielkości z indeksami ini oznaczają początkową ilość danego płynu w złożu.

5. Prawo zachowania objętości złożowej:

$$V_o(t) + V_{fg}(t) + V_w(t) + V_s(t) = PV(t) \quad (6)$$

gdzie: V_x oznacza objętość płynu x w warunkach złożowych, a PV – całkowitą objętość porów złoża.

W analizowanym modelu zakłada się, że objętości

złożowe wszystkich płynów oddzielnie związane są z ich ilościami w warunkach normalnych poprzez odpowiednie współczynniki objętościowe, czyli:

$$V_o = B_o \times N, V_{fg} = B_g \times G_{fg}, V_w = B_w \times W, V_s = B_s \times C \quad (7)$$

a objętość porów złożeń wynika z ich efektywnej ściśliwości c_e

$$PV(t) = PV_o \{1 + c_e [P(t) - P_o]\} \quad (8)$$

gdzie: PV_o jest objętością porów przy ciśnieniu odniesienia P_o .

Warunki rozwiązania modelu bilansowego dla procesu wypierania mieszającego

Celem rozwiązania układu równań wprowadzonych w powyższym rozdziale należy go uzupełnić o:

- warunki początkowe: ciśnienie początkowe P_{ini} i początkowe zasoby płynów złożowych: ropy – N_{ini} , gazu węglowodorowego – G_{ini} , wody – W_{ini} ,
- właściwości płynów złożowych: współczynnik rozpuszczalności gazu w ropie R_s , współczynniki objętościowe dla ropy – B_o , gazu – B_g , wody – B_w i płynu wypierającego – B_s ,
- schemat procesu wypierania, tj. planowaną ilość za-

tlaczanego płynu wypierającego – $C_{inj}(t)$ i planowaną ilość wydobytej ropy – $N_p(t)$. Wielkości te podawane są na ogół w formie przyrostów ΔC_{inj} i ΔN_p i mogą ulec modyfikacji w trakcie procesu obliczeniowego np. na skutek osiągnięcia limitu ze względu na jeden lub więcej parametrów kontrolnych, takich jak: wykładnik gazowy GOR , ciśnienie złożowe P lub koncentrację (ilość płynu wypierającego obecnego w płynach wydobywanych) C_p .

Dla rozwiązania układu równań bilansowych potrzebne są jeszcze informacje (modele) opisujące i pozwalające prognozować:

1. wydobywanie gazu z czapy gazowej: G_{pg} ,
2. dopływ wody z akifera: W_e ,
3. wydobywanie wody ze złoża: W_p ,
4. wydobywanie płynu wypierającego (CO_2) ze złoża: C_p .

Wielkości w punktach 1, 2 i 3 nie są specyficzne dla omawianego procesu wypierania i można dla ich wyznaczenia skorzystać z jednego z wielu modeli istniejących w literaturze. Natomiast wydobywanie płynu wypierającego było tematem wcześniejszych rozdziałów i jest efektem zaproponowanego w niniejszej pracy modelu wypierania mieszającego.

Weryfikacja modelu bilansu materiałowego dla procesu wypierania mieszającego

W niniejszym rozdziale przedstawiono porównanie wyników dla procesu wspomaganiej eksploatacji złoża (EOR) poprzez zatłaczanie płynu (CO_2) z mieszającym wypieraniem węglowodorów uzyskane dwiema metodami: (a) zaproponowaną powyżej metodą bilansu materiałowego oraz (b) standardową metodą kompozycyjnych modeli symulacyjnych.

Porównanie to ma na celu weryfikację poprawności metody bilansowej. Dokonano go na realistycznym przykładzie krajowego złoża ropnego. Proces weryfikacji podzielono na etapy celem szczegółowego przeanalizowania uzyskanych wyników.

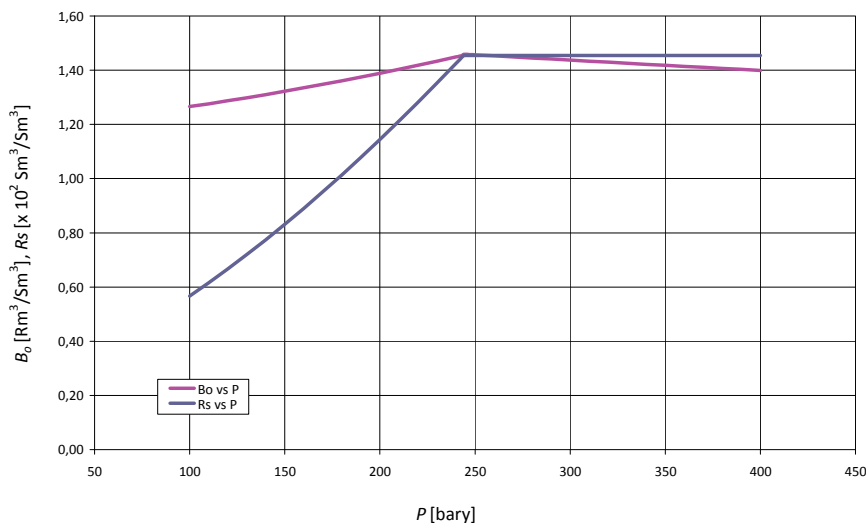
Etap I. Weryfikacja poprawności użytego równania bilansowego i właściwości płynów złożowych

W pierwszym etapie procesu weryfikacyjnego sprawdzono poprawność przyjętych właściwości płynów złożowych. Należy zaznaczyć, że omawiany proces ma charakter kompozycyjny i jako taki był symulowany w (b) modelami kompozycyjnymi. Natomiast model bilansowy z konieczności używa opisu uproszczonego (typu *Black Oil*), w którym używa się właściwości poszczególnych

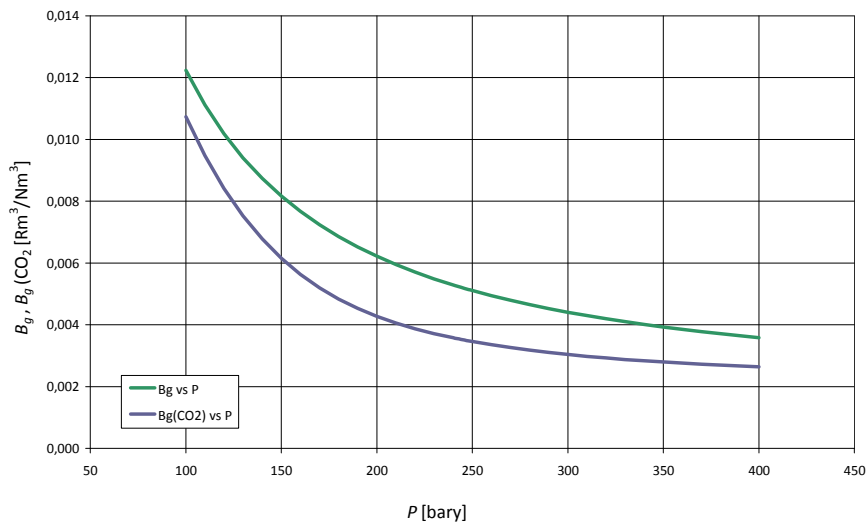
faz (ropa, gaz, woda, CO_2) bez wnikania w ich skład. Właściwości te w postaci kilku standardowych funkcji ciśnienia (B_o , R_s , B_g , B_{CO_2} , B_w) zostały wygenerowane na podstawie składu płynu złożowego równocześnie z danymi termodynamicznymi użytymi w formalizmie równania stanu w symulatorze kompozycyjnym przy pomocy specjalistycznego oprogramowania [5].

Funkcje te zostały następnie poprawione tak, aby jak najlepiej opisać bilans eksploatacji złoża w okresie przed rozpoczęciem zatłaczania płynu wypierającego (CO_2). Dotyczy to funkcji B_o , R_s , B_g , B_w . Natomiast współczynnik objętościowy dwutlenku węgla B_{CO_2} został wygenerowany przy pomocy standardowych korelacji [2] dla faktycznych warunków złożowych.

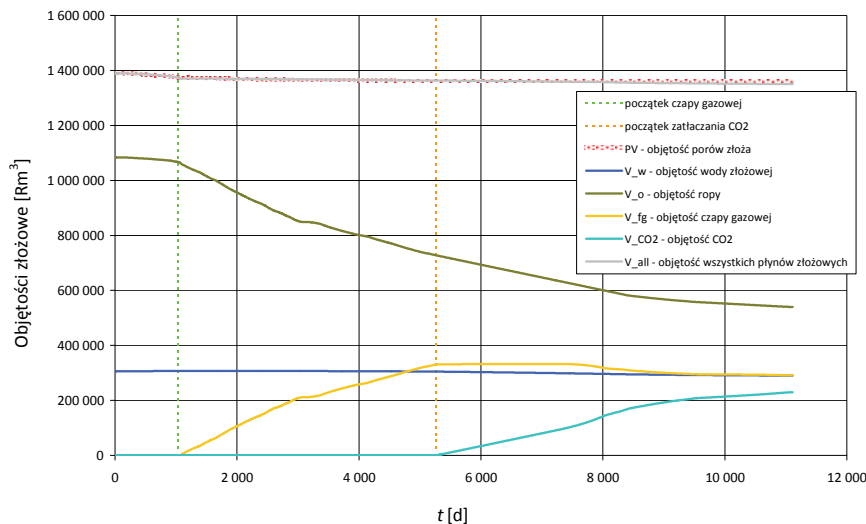
Wielkości powyższe przedstawiono na wykresach: rysunek 3 – B_o i R_s , rysunek 4 – B_g i B_{CO_2} . Współczynnik objętościowy wody B_w obliczono przy założeniu stałej ściśliwości. Podobnie użyto pojedynczego parametru ściśliwości porów dla obliczenia zmian ich objętości z ciśnieniem. Tak otrzymane właściwości płynów złożowych zostały wykorzystane do weryfikacji podstawowego równania bilansowego: prawa zachowania objętości złożowej, tj. równania (6). W tym celu użyto zasobów pierwotnych



Rys. 3. Właściwości płynów złożowych dla przykładowego złoża. Współczynnik objętościowy B_o dla ropy i współczynnik rozpuszczalności R_s gazu w ropie w funkcji ciśnienia P dla temperatury złożowej



Rys. 4. Właściwości płynów złożowych dla przykładowego złoża. Współczynnik objętościowy B_g dla gazu rodzimego i współczynnik objętościowy B_g dla dwutlenku węgla w funkcji ciśnienia P dla temperatury złożowej



Rys. 5. Objętości złożowe w funkcji czasu eksploatacji. Test poprawności modelu bilansowego

oraz sumarycznych wielkości wydobywania/zatłaczania płynów złożowych uzyskanych z symulacji metodą (b), tj. sumarycznego wydobywania płynów: ropy – N_p , gazu – G_p , wody – W_p , dwutlenku węgla – C_p oraz sumarycznego zatłaczania tego gazu – C_{inj} . Pozwoliły one wyliczyć ilość płynów pozostałych w złożu w warunkach normalnych, jak również, dzięki zależności (7), w warunkach złożowych: $V_o, V_{fg}, V_w, V_{CO_2}$.

Uwaga: do wyliczenia objętości czapy gazowej użyto równania bilansu dla gazu: $G_{fg} = G_{ini} - N \times R_s - G_p$.

Wielkości te zsumowano i porównano z całkowitą objętością porów złoża PV . Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 5. Zawiera on objętości złożowe wszystkich płynów złożowych oraz ich sumę V_{all} , a także, dla porównania, objętość porów złoża PV w funkcji czasu eksploatacji. Rysunek ten pokazuje bardzo dobrą zgodność V_{all} i PV nie tylko przed rozpoczęciem zatłaczania płynu wypierającego do złoża, ale również w trakcie jego trwania. Wynik ten pozytywnie weryfikuje przyjęty w modelu sposób bilansowania płynów złożowych oraz potwierdza poprawność użytych właściwości tych płynów. Należy również zaznaczyć, że użyta dla tego porównania objętość porów złoża PV wyliczona z równania (8) jest w 100% zgodna z analogiczną wielkością występującą w modelu symulacyjnym.

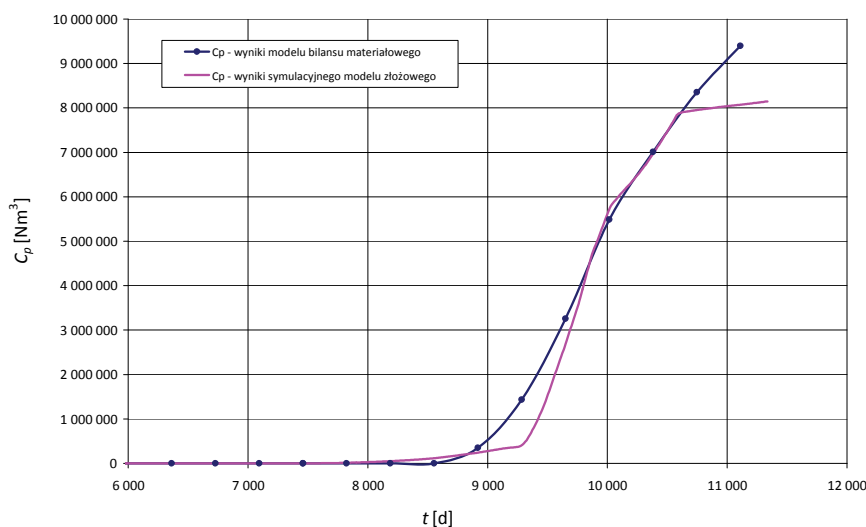
Etap II. Weryfikacja modelu wypierania mieszającego pod względem wydobywania dwutlenku węgla

W drugim etapie porównano wyniki zaproponowanego modelu wypierania mieszającego pod względem ilości prognozowanego wypływu CO_2 wraz z wydobywanymi ze złoża węglowodorami z odpowiednimi rezultatami

szczegółowego modelu symulacyjnego. Do obliczeń w ramach modelu bilansowego wykorzystano wyprowadzone wcześniej zależności (4) i (5) dla omawianego modelu wypierania. Pierwsza z nich pozwala określić spadek koncentracji płynu wypieranego c_o w całkowitym wydobywanym płynie (w warunkach złożowych) przy zadanej ilości wydobywania w kolejnych krokach czasowych. Natomiast druga, korzystając z wyników pierwszej, umożliwia znalezienie ilości płynu wypierającego w całkowitym wydobywanym płynie. Zależności te wymagają znajomości parametru M modelu. Parametr ten wyznaczony jest niezależnie na podstawie jego korelacji z czasem τ_{bt} przebiccia się płynu wypierającego do odwiertów wydobywczych:

$$\tau_{bt} = \frac{1}{M} \quad (\text{przypadek z } \varepsilon = 1)$$

Biorąc pod uwagę efektywną objętość porów złoża odpowiadającą sytuacji przebiccia się CO_2 do odwiertów wydobywczych analizowanego złoża, wyznaczono: $M = 1,93$ oraz przyrost sumarycznego wydobywania $CO_2 - C_p$, pokazany na rysunku 6. Dla porównania na rysunku tym przedstawiono również wyniki symulacji złożowych. Użyty model bilansowy prawidłowo oddaje trend wzrostu oraz przybliżoną wartość C_p w dłuższym przedziale czasu. Obserwowane różnice w początkowym okresie po przebicciu się CO_2 do odwiertów wydobywczych wynikają z nieregularnego rozmieszczenia odwiertów wydobywczych w stosunku do odwiertu zatłaczającego i znaczących różnic w geometrii złoża w porównaniu do zakładanej w modelu geometrii radialnej. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że użyty model jest efektywnie modelem 1-parametrowym, należy uznać otrzymany wynik za zadowalający.



Rys. 6. Sumaryczne wydobywanie CO_2 . Wyniki modelu bilansowego vs wyniki symulacji

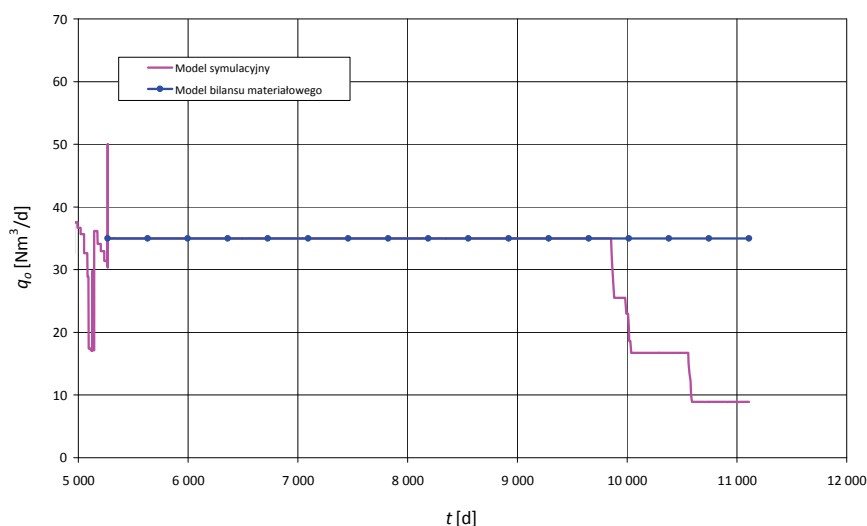
Zastosowanie modelu wypierania mieszającego w schemacie bilansu materiałowego do prognozowania procesu wydobycia wspomaganego zatłaczaniem CO₂

W niniejszym rozdziale zaproponowana metoda została zastosowana do prognozowania omawianego procesu z wykorzystaniem ograniczeń dla wartości średnich, takich jak średni wykładnik gazowy czy średni skład wydobywanych płynów (zawartość CO₂ w całkowitym strumieniu wydobywanych płynów). W szczególności w poniższym przykładzie założono stałą wydajność wydobycia ropy naftowej oraz wydajność zatłaczania CO₂ uzupełniającą ubytek płynów w złożu na skutek wydobycia.

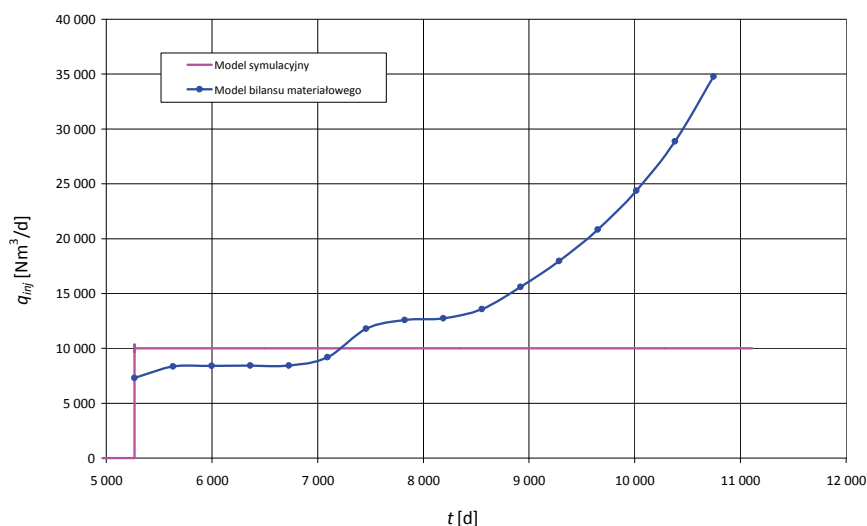
Różnice dla warunków wydobycia i zatłaczania CO₂ pomiędzy modelem symulacyjnym a modelem bilansu materiałowego pokazują wykresy na rysunkach 7 i 8. Wyniki modelowania procesu wypierania mieszającego dla podane-

go wcześniej złoża ropnego przedstawiono na rysunkach 9, 10 i 11 w postaci: zależności sumarycznego wydobycia ropy N_p od sumarycznego zatłaczania CO₂ – C_{inj} ; zależności sumarycznego wydobycia CO₂ (wraz z ropą i gazem) C_p od sumarycznego zatłaczania C_{inj} ; zależności sumarycznego wydobycia ropy N_p od sumarycznego wydobycia CO₂ – C_p . Wyniki te porównano z wynikami pełnoskalowych symulacji złożowych tego samego obiektu. Wyniki powyższe, choć różniące się z powodu różnych warunków wydobycia i zatłaczania, są spójne i mogą świadczyć o poprawności zastosowanych narzędzi.

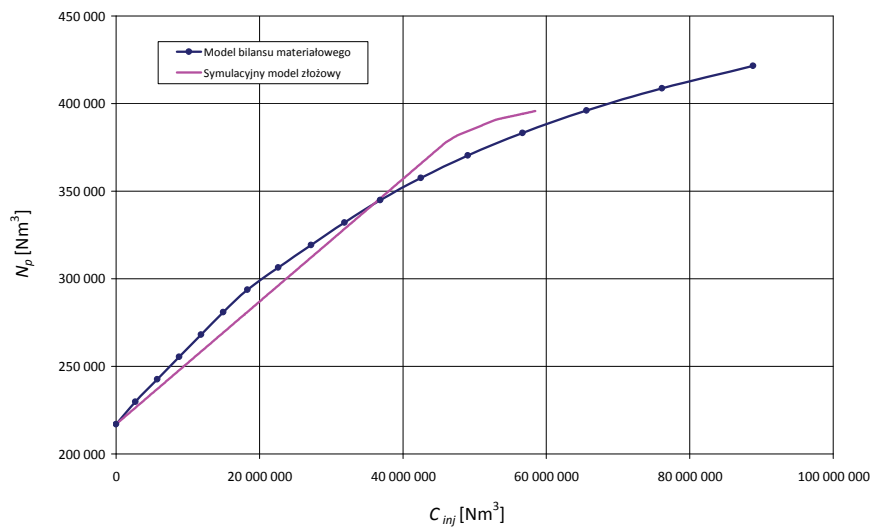
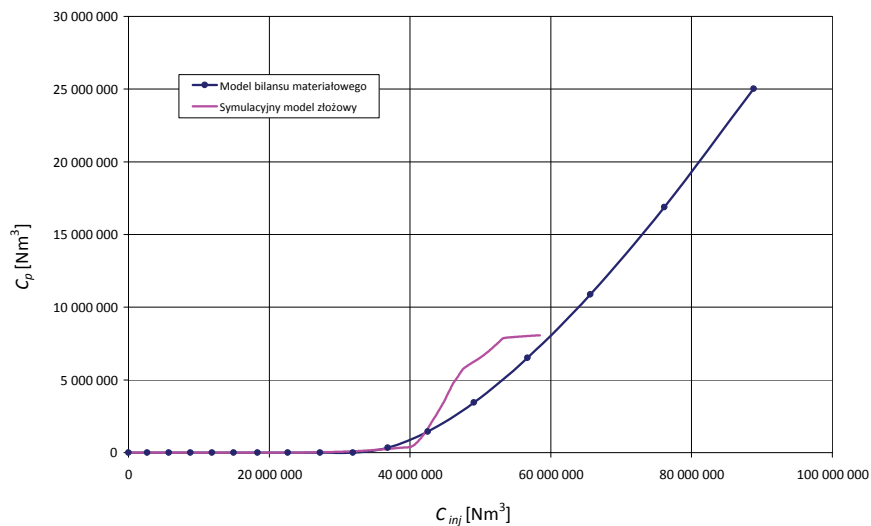
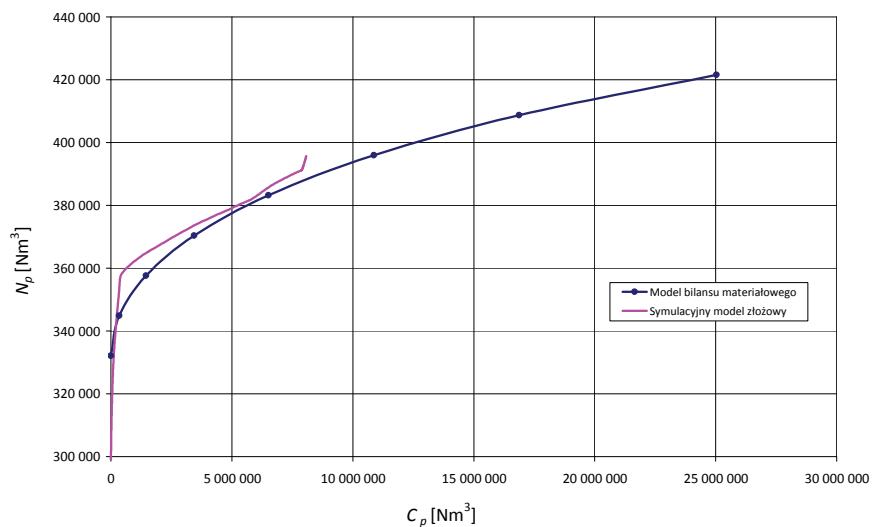
Proponowany model wypierania mieszającego pozwala szybko i skutecznie szacować wpływ wybranego schematu

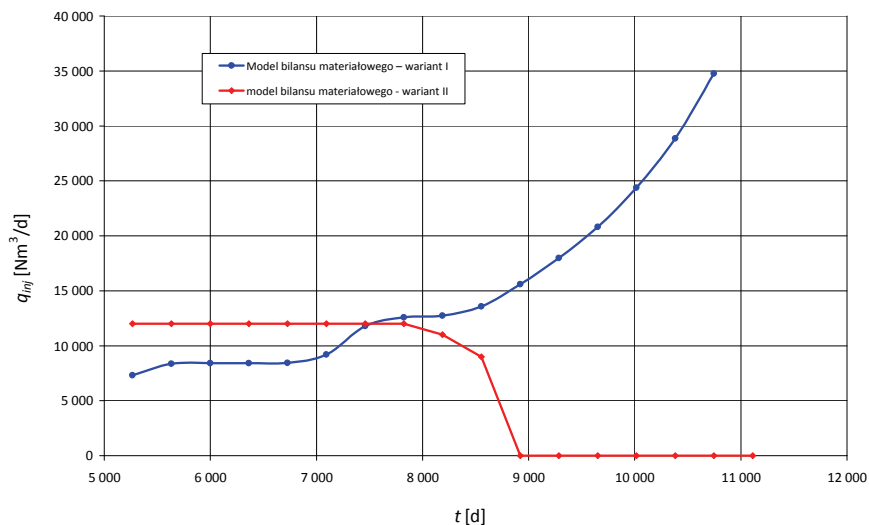


Rys. 7. Wydajność wydobycia ropy q_o vs t

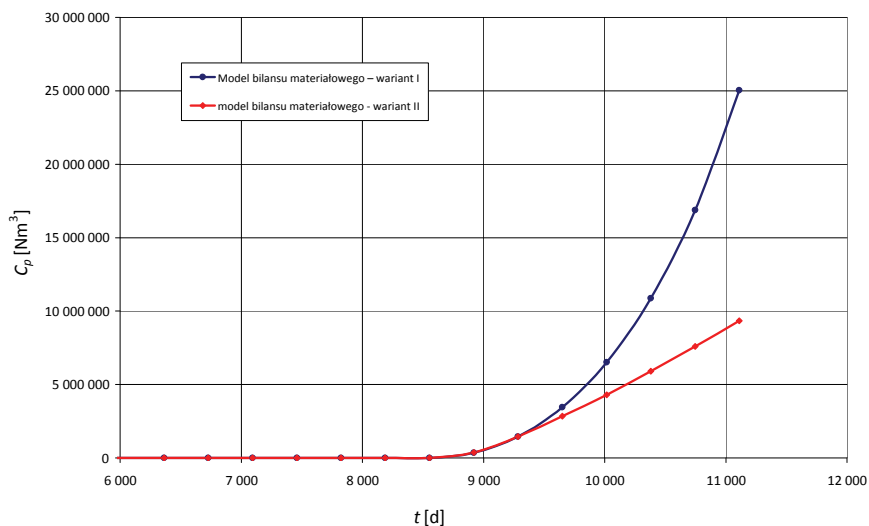


Rys. 8. Wydajność zatłaczania CO₂ – q_{inj} vs t

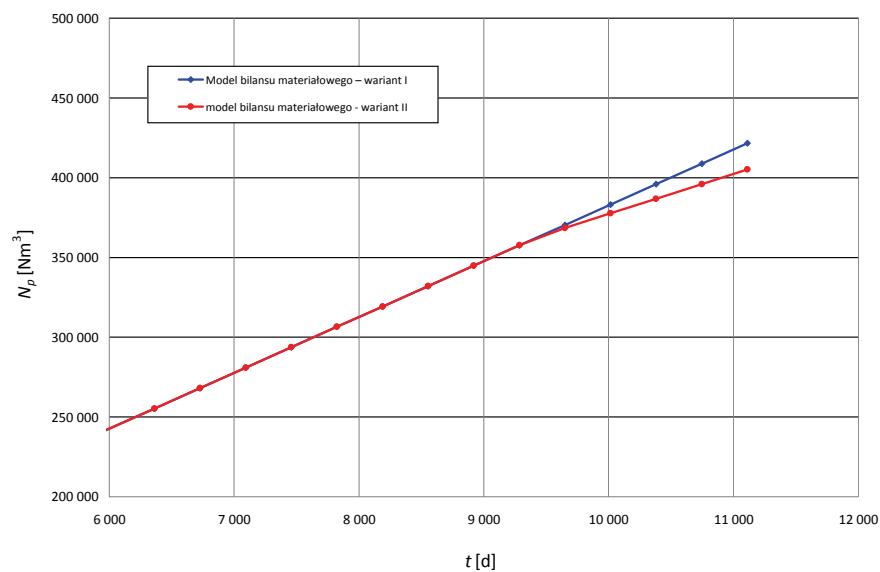
Rys. 9. Sumaryczne wydobycie ropy N_p vs sumaryczne załaczanie $\text{CO}_2 - C_{inj}$ Rys. 10. Sumaryczne wydobycie $\text{CO}_2 - C_p$ vs sumaryczne załaczanie $\text{CO}_2 - C_{inj}$ Rys. 11. Sumaryczne wydobycie ropy N_p vs sumaryczne wydobycie $\text{CO}_2 - C_p$



Rys. 12. Wydajność zatłaczania CO₂ – q_{inj} w funkcji czasu t . Porównanie wariantów I i II



Rys. 13. Sumaryczne wydobyte CO₂ – C_p w funkcji czasu t . Porównanie wariantów I i II



Rys. 14. Sumaryczne wydobyte ropy N_p w funkcji czasu t . Porównanie wariantów I i II

zatlaczania CO₂ do złoża na wydobycie ropy i pozostałe podstawowe wyniki eksploatacji złoża.

Dla przykładu zastosowanie w omawianym złożu intensywniejszego zatlaczania CO₂ w pierwszej fazie procesu oraz jego zaprzestanie w momencie przebiccia się CO₂

do odwiertów wydobywczych (rysunek 12 wariant II vs poprzedni wariant I) powoduje bardzo silne ograniczenie ilości CO₂ wydobywanego wraz z ropą (rysunek 13) przy jednocześnie niewielkim zmniejszeniu wydobycia ropy (rysunek 14).

Podsumowanie i wnioski

W pracy rozpatrzono zagadnienia wypierania mieszającego. Skonstruowano i rozwiązano prosty analityczny model opisujący ten proces. Model zaimplementowano do standardowych równań bilansu materiałowego oraz zweryfikowano poprzez porównanie z wynikami kompozycyjnych

symulacji złożowych przeprowadzonych dla krajowego złoża naftowego. Wyniki przeprowadzonych testów i weryfikacji pozwalają wnioskować o poprawności zaproponowanych metod prognozowania efektów wspomaganie wydobycia ropy naftowej poprzez zatlaczanie CO₂ do złóż ropy.

Literatura

- [1] Buckley S. E., Leverett M. C.: *Mechanism of fluid displacement in sands*. Trans. AIME 1942, vol. 146, s. 107–116.
- [2] CO₂ Thermophysical Property Calculator firmy Carbon Capture & Sequestration Technologies, MIT Energy Initiative, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] Koval E. J.: *A Method for Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Heterogeneous Media*. „SPE Journal” 1963, June, vol. 3, s. 145–154.
- [4] Pakiet ECLIPSE 300 Release 2010.1 firmy GeoQuest, Schlumberger.
- [5] Program PVTsim 16 firmy Calsep.



Dr Wiesław SZOTT – absolwent Uniwersytetu Jagiellońskiego i Texas A&M University. Założyciel i kierownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodorów i PMG w Instytucie Nafty i Gazu, Oddział w Krośnie. Od ponad 20 lat zajmuje się problematyką modelowania i symulacji złożowych. Autor przeszło 30 prac naukowych i licznych opracowań, głównie z zakresu powyższej tematyki.