

Andrzej Gołębek, Wiesław Szott

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Modyfikacje symulatora złożowego dla potrzeb modelowania zjawisk mieszania się gazów

W pracy przedstawiono praktyczne rozwiązanie dla modelowania zjawiska mieszania się gazów w złożu w postaci niezbędnych modyfikacji symulatora złożowego typu *black oil*. Modyfikacje te objęły zagadnienia redukcji efektu dyspersji numerycznej oraz wprowadzenia numerycznego opisu zjawiska dyspersji fizycznej. Zastosowane metody przetestowano na jedno- i dwuwymiarowych modelach złożowych opisujących procesy wzajemnego wypierania płynów mieszających się (gazów).

Słowa kluczowe: dyspersja numeryczna, dyspersja fizyczna, mieszanie się gazów, symulator złożowy.

Modifications of reservoir simulator for the modelling of gas mixing processes

The paper presents a practical solution of gas-mixing modelling in a reservoir by appropriate modifications of a standard black oil reservoir simulator. The modifications included techniques for the reduction of numerical dispersion and implementation of physical dispersion phenomena. The modified simulator was tested for 1D and 2D reservoir models describing displacement processes of mixing fluids (gases).

Key words: numerical dispersion, physical dispersion, gas mixing, reservoir simulator.

Wstęp

Mieszanie się gazów w złożu stanowi zjawisko istotne dla opisu i przebiegu pracy podziemnych magazynów gazu w sytuacjach, gdy gaz buforowy i gaz magazynowy różnią się swoimi składami [6]. Mechanizmem odpowiedzialnym za to zjawisko jest dyspersja fizyczna występująca w ośrodku porowatym.

Konwencjonalne symulatory złożowe (np. Eclipse firmy Schlumberger lub Imex firmy CMG) nie dają możliwości modelowania i sterowania tym zjawiskiem. Co więcej symulatory te obarczone są pewnymi niedoskonałościami, których efekty przypominają zjawisko dyspersji, ponieważ przejawiają się w zbliżony sposób (rozmycie koncentracji na froncie wypierania wzajemnego). Niedoskonałości te noszą nazwę dyspersji numerycznej i dzięki powyższemu podobieństwu bywają wykorzystywane do modelowania tego zjawiska. Autorzy wielokrotnie wykorzystywali mechanizm dyspersji

numerycznej do modelowania efektów dyspersji fizycznej [5]. Należy jednak podkreślić, że dyspersja numeryczna z racji swojej genezy nie stanowi ani do końca poprawnego, ani tym bardziej eleganckiego sposobu modelowania zjawisk naturalnych, co przejawia się m.in. brakiem możliwości bezpośredniego sterowania jej wielkością. W niniejszej pracy zaprezentowano sposób uwzględnienia właściwej dyspersji fizycznej w symulatorze złożowym na przykładzie ogólnie dostępnego (wraz z kodem) symulatora BOAST v1.1 [3]. Zastosowano wieloetapowe podejście do postawionego zadania, zarówno w zakresie rozwiązywanych problemów (ograniczenie dyspersji numerycznej, uwzględnienie dyspersji fizycznej), jak i w zakresie złożoności symulatora (wariant jedno- i dwuwymiarowy). Rozszerzenie zastosowanych rozwiązań na symulatory trójwymiarowe będzie tematem oddzielnej publikacji.

Ograniczenie dyspersji numerycznej

Poprawne modelowanie dyspersji fizycznej wymaga wyeliminowania z symulatora złożowego efektów dyspersji numerycznej.

Niestety całkowite usunięcie tej ułomności symulatorów bazujących na schemacie różnic skończonych nie jest możliwe, gdyż jej obecność zapewnia stabilność pracy symulatora. Dlatego koniecznym staje się ograniczenie wielkości dyspersji

numerycznej do poziomu, który nie zniekształca właściwego efektu dyspersji fizycznej.

W pracy zastosowano dwa mechanizmy redukcji dyspersji numerycznej:

- 1) mobilność z ważeniem wielopunktowym w kierunku napływu (*multipoint upstream weighting*),
- 2) podwójną siatkę dyskretyzacji (*double mesh*).

Mobilność z ważeniem wielopunktowym w kierunku napływu

Dwupunktowe ważenie dla obliczeń mobilności płynów (*two-point upstream weighting* [7]) zostało wbudowane w symulator BOAST. W niniejszej pracy metodę tę rozszerzono do ważenia trzypunktowego.

Technika ta polega na sprawdzeniu kierunku przepływu dowolnego płynu (np. gazu zatłaczanego) i obliczeniu jego przepuszczalności względnej między blokami na podstawie przepuszczalności względnych występujących w sąsiednich blokach. W standardowym jednopunktowym podejściu przepuszczalność względna dowolnego płynu przepływającego z bloku i do $i + 1$, $k_{r,i+\frac{1}{2}}$ równa jest przepuszczalności względnej występującej w bloku i ,

$$k_{r,i+\frac{1}{2}} = k_{r,i} \quad (1)$$

W przypadku, gdy przepływ odbywa się w odwrotnym kierunku, czyli z bloku $i + 1$ do bloku i , przepuszczalność względna pomiędzy tymi blokami wynosi:

$$k_{r,i+\frac{1}{2}} = k_{r,i+1} \quad (2)$$

W dwupunktowym ważeniu przepuszczalność względna między blokami dla przepływu z bloku i do $i + 1$ obliczana jest według wzoru:

$$k_{r,i+\frac{1}{2}} = \frac{3}{2}k_{r,i} - \frac{1}{2}k_{r,i-1} \quad (3)$$

a dla przepływu od $i + 1$ do i :

$$k_{r,i+\frac{1}{2}} = \frac{3}{2}k_{r,i+1} - \frac{1}{2}k_{r,i+2} \quad (4)$$

Wartości współczynników $\left(a_1 = \frac{3}{2}, a_2 = -\frac{1}{2}\right)$ zostały okre-

ślone poprzez rozwinięcie w szereg Taylora pochodnej cząstkowej w otoczeniu punktu x_i :

$$\frac{\partial k_r}{\partial x} \Big|_i \approx \frac{k_{r,i+\frac{1}{2}} - k_{r,i-\frac{1}{2}}}{\Delta x} \quad (5)$$

gdzie: Δx jest rozmiarem bloku, przy założeniu (dla przepływu od $i - 1$ do i oraz od i do $i + 1$), że:

$$\begin{aligned} k_{r,i+\frac{1}{2}} &= a_1 k_{r,i} + a_2 k_{r,i-1}, \\ k_{r,i-\frac{1}{2}} &= a_1 k_{r,i-1} + a_2 k_{r,i-2} \end{aligned} \quad (6)$$

Analogicznie w przypadku ważenia trzypunktowego przepuszczalność względna między dwoma blokami w zależności od kierunku przepływu liczona jest ze wzorów:

$$\begin{aligned} k_{r,i+\frac{1}{2}} &= a_1 k_{r,i} + a_2 k_{r,i-1} + a_3 k_{r,i-2}, \\ k_{r,i-\frac{1}{2}} &= a_1 k_{r,i-1} + a_2 k_{r,i-2} + a_3 k_{r,i-3} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: $a_1 = \frac{11}{6}, a_2 = -\frac{7}{6}, a_3 = \frac{2}{6}$.

W celu uniknięcia niefizycznych wartości wynikających z niedokładności obliczeń przepuszczalności względnych między blokami do symulatora wprowadzono ograniczenia, które w razie wyliczenia ujemnych bądź większych od jedynki przepuszczalności względnych dla danego płynu przypisują wartości 0 lub 1 – w zależności od przekroczonego limitu. Innym praktycznym ograniczeniem jest warunek, aby przepuszczalność względna między dwoma blokami nie była większa od przepuszczalności względnej w bloku, z którego następuje przepływ. Dlatego przepuszczalność względna wyliczona według użytej formuły jest zawsze sprawdzana i ograniczana do przepuszczalności względnej bloku będącego źródłem przepływu.

Podwójna siatka dyskretyzacji

Kolejną metodą umożliwiającą ograniczenie dyspersji numerycznej jest zmniejszenie rozmiarów bloków modelu.

Niestety zagęszczanie modelu dla całości obliczeń niesie za sobą poważne konsekwencje w postaci znacznego wydłu-

zenia czasu wykonywanych symulacji. Ponieważ symulator złożowy BOAST dokonuje obliczenia z wykorzystaniem metody IMPES (*Implicit Pressures, Explicit Saturations*), istnieje możliwość rozdzielania tych obliczeń i realizacji tylko części z nich na zagęszczonej siatce modelu [1]. W metodzie tej w każdym nowym kroku czasowym symulacji nasycenia w blokach obliczane są na podstawie nasycień wyliczonych w poprzednim kroku czasowym, natomiast ciśnienia w tych blokach liczone są *implicite* z układu równań w każdym kroku czasowym. Obliczenia nasycień w blokach modelu są znacznie mniej skomplikowane i mniej czasochłonne niż obliczenia dotyczące ciśnień. Dlatego omawiana metoda ograniczenia dyspersji numerycznej polega na wykorzystaniu do obliczeń symulacji dwóch siatek modelu: *coarse grid* (siatka niezagęszczona) do obliczeń dotyczących ciśnień oraz *fine grid* (siatka zagęszczona) do obliczeń nasycień.

W modyfikowanym symulatorze BOAST procedury dotyczące obliczeń nasycień w blokach zostały zmienione do postaci zagęszczonej siatki modelu. Deklarację siatki zagęszczonej rozwiązano analogicznie do deklaracji siatki niezagęszczonej: z zewnętrznego pliku wczytywane są wszystkie parametry mówiące o rozmiarach i ilości bloków znajdujących się w zagęszczonej siatce modelu oraz informacje dotyczące lokalizacji regionów i odwiertów na tej siatce. Należy podkreślić, że omawiane siatki, chociaż niezależne od siebie, muszą posiadać spójne rozmiary. Zalecane jest również nieparzyste zagęszczanie bloków modelu (tj. każdy blok modelu dzielimy w jednym kierunku na 3, 7, 9 itd. bloków), po to by lokalizacje odwiertów przypisane do środków bloków na obu siatkach pokrywały się ze sobą.

Dyspersja fizyczna

Występująca w strukturach węglowodorowych dyspersja fizyczna [2] to proces rozmycia profilu koncentracji płynu, wywołany niejednorodnością pola prędkości konwekcyjnej powstałą na skutek złożonego przepływu przez ośrodek porowaty. Uwzględnienie tego zjawiska w symulatorze złożowym wymaga wprowadzenia do równań nasycień dodatkowego członu proporcjonalnego do gradientu koncentracji. Standardowo stosowane w symulatorach równanie dla koncentracji to równanie konwekcyjne nieuwzględniające zjawiska dyspersji fizycznej. W procesie dyskretyzacji tego równania powstaje błąd będący tzw. dyspersją numeryczną (minimalizowaną w poprzednich rozdziałach), zmieniający kształt tego równania do postaci konwekcji–dyfuzji. Rozszerzając tę funkcję o dyspersję fizyczną, otrzymamy (przy założeniu stacjonarnych ciśnień w modelu) równanie postaci [4]:

W celu poprawnego wytestowania wprowadzonych zmian w obliczeniach nasycień początkowo w symulatorze wyłączono obliczenia ciśnień, a poszczególnym blokom zagęszczonej siatki przypisano stałe w czasie ciśnienia umożliwiające stacjonarny przepływ. Ciśnienia uzyskane dla siatki niezagęszczonej poddano procedurze interpolacyjnej przypisującej wyinterpolowane wartości ciśnień blokom zagęszczonej siatki.

Testy wykazały, że w przypadku modelu jednowymiarowego liniowa interpolacja była wystarczająca i dawała poprawne wyniki. Natomiast w modelu dwuwymiarowym interpolacja dwuliniowa generuje błędy i nie może być używana. Dlatego w tym przypadku zastosowano dla ciśnienia P w punkcie (x, y) interpolację wyższego rzędu postaci:

$$P(x, y) = \sum_{i=-2,-1,1,2} \sum_{j=-2,-1,1,2} P(x_i, y_j) \prod_{\substack{k \neq i \\ k=-2,-1,1,2}} \left(\frac{x-x_k}{x_i-x_k} \right) \prod_{\substack{l \neq j \\ l=-2,-1,1,2}} \left(\frac{y-y_l}{y_j-y_l} \right) \quad (8)$$

gdzie: $P(x_i, y_j)$ to wartości ciśnień w węzłach (x_i, y_j) siatki niezagęszczonej.

Tak opisana interpolacja została zastosowana do określania ciśnień wewnątrz modelowanego obszaru. Przy brzegach, gdzie nie można zastosować powyższej interpolacji, wartości ciśnień obliczano, gdy było to możliwe, metodą interpolacji biliniowej, a w pozostałych przypadkach bloków skrajnych zastosowano wartości zapewniające zerowy gradient, prostopadłe do brzegu modelu. Wyniki (nasycień i innych wielkości będących funkcjami nasycień) na zagęszczonej siatce przypisywano właściwym blokom siatki niezagęszczonej, stosując średnie ważone objętością bloków lub ich powierzchnią boczną.

$$(D_{phys} + D_{num}) \vec{\nabla}^2 u - \vec{v}_t \vec{\nabla} u = \phi \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

gdzie: u to koncentracja (nasycenie) płynem (gazem) wypierającym, a \vec{v}_t to prędkość całkowita, $\vec{v}_t = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ – czyli suma prędkości dwóch mieszających się płynów (gazów), \vec{v}_1 i \vec{v}_2 , ϕ to porowatość, D_{phys} – współczynnik dyspersji fizycznej, D_{num} – współczynnik dyspersji numerycznej, gdzie D to człon niezależny od prędkości, α – współczynnik proporcjonalności.

Techniczne rozwiązanie założonego celu polegało na dodaniu w symulatorze BOAST jawnego członu dyspersji o zadanych parametrach. Założono liniową zależność dyspersji od prędkości przepływu: $D_{phys} = D + \alpha \vec{v}$. Tak określone parametry dyspersji fizycznej uwzględniono bezpośrednio w równaniach obliczających przepływy płynów pomiędzy

blokami. Dla przepływu z bloku $i - 1$ do i równanie na wielkość przepływu \bar{Q}_g przyjmuje postać:

$$\bar{Q}_g = \overline{KA_c} \frac{k_{rg}}{\mu_g B_g} \frac{p_{i-1} - p_i}{\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2}} + \overline{D_{phys} A_c} \frac{s_{i-1} - s_i}{B_g \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2}} \quad (10)$$

gdzie: K to przepuszczalność absolutna, A_c – pole przekroju

poprzecznego pomiędzy x_{i-1} i x_i , k_{rg} , μ_g , B_g to kolejno: przepuszczalność względna, lepkość i współczynnik objętościowy gazu wypierającego, Δx_i – rozmiar bloku w kierunku x , p_i – ciśnienie w bloku, a s_i to nasycenie gazem wypierającym, kreska nad symbolem oznacza wartość średnią pomiędzy blokami $i - 1$ a i .

W omawianym podejściu nasycenie gazem wypierającym jest tożsame z jego koncentracją $S_i = u_i$.

Symulacje jednowymiarowe

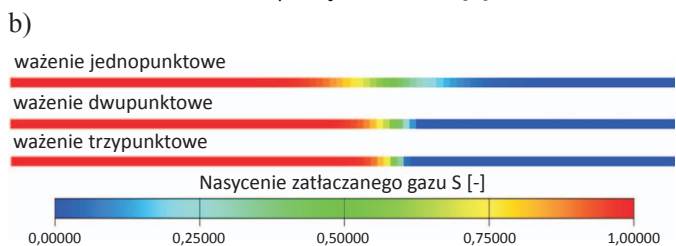
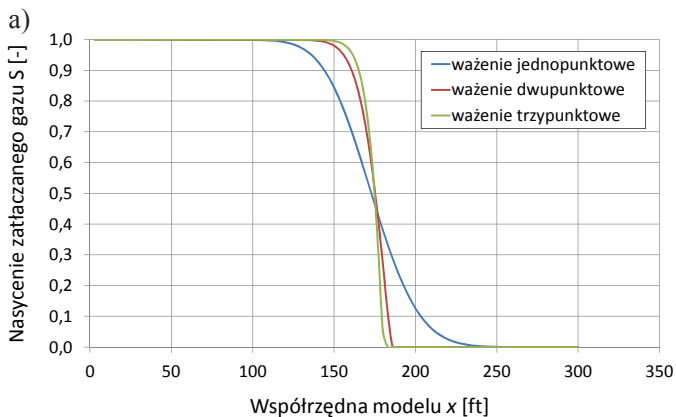
Ponieważ modelowanie zjawiska dyspersji zachodzącego podczas wzajemnego wypierania płynów mieszających się (gazów) wymagało wprowadzenia do symulatora złożowego przedstawionych w poprzednich rozdziałach zmian, to w pierwszej kolejności (w celu uproszczenia analiz) rozpatrywano zmiany tylko w jednym wymiarze.

Zbudowany jednowymiarowy model symulacyjny ośrodka porowatego, na którym przetestowano zmodyfikowany symulator złożowy BOAST (w wersji Black Oil) posiada następujące charakterystyki: liczba bloków: 100, wymiary bloków: $3 \times 3 \times 3$ ft, porowatość: $\phi = 0,15$, przepuszczalność: $K = 50$ mD. Założono model jednofazowy (brak obecności wody złożowej). Kolejnym uproszczeniem dla dokładniejszego przetestowania wprowadzonych rozwiązań było założenie identycznych własności gazów biorących udział w procesie mieszania się (gęstość, lepkość, współczynnik objętościowy). W pierwszym podejściu założono również stały rozkład

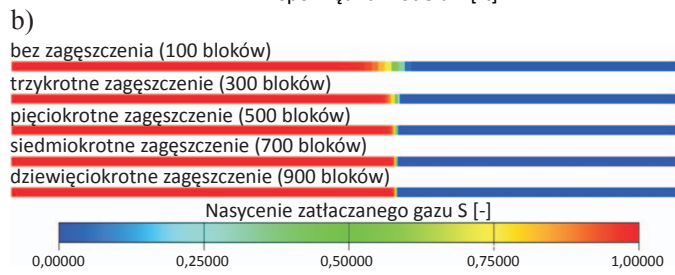
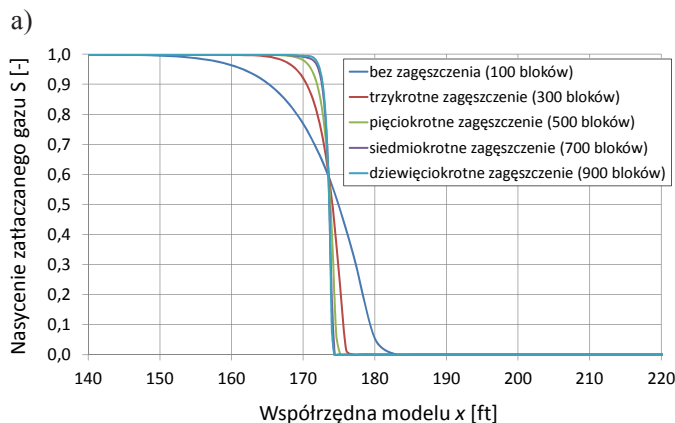
ciśnien w modelu, umożliwiający stacjonarny przepływ płynów między blokami. W modelu zdefiniowano dwa odwierty: zatłaczający – zlokalizowany w pierwszym bloku modelu i odbierający – w ostatnim bloku modelu. Odwiertom tym dobrano wydajności zatłaczania/odbioru tak, aby zachować stacjonarny przepływ.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki zastosowania pierwszej, z omawianych wyżej, metody ograniczającej dyspersję numeryczną w postaci rozmycia frontu mieszania się gazów widocznego na rozkładzie nasycenia zatłaczanym gazem (wypierającym), dla ustalonego kroku czasowego. Zastosowanie dwupunktowego ważenia w znacznym stopniu zmniejsza rozmycie frontu, a użycie ważenia trzypunktowego daje kolejną poprawę wyników.

Metoda trzypunktowego ważenia nie likwiduje całkowicie zjawiska dyspersji numerycznej, a cztero- czy pięciopunktowe



Rys. 1. Model 1D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zmianę sposobu obliczeń mobilności płynów: a) nasycenie zatłaczanego gazu w funkcji współrzędnej modelu dla ustalonego kroku czasowego, b) nasycenie zatłaczanym gazem w poszczególnych blokach modelu dla ustalonego kroku czasowego



Rys. 2. Model 1D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zagęszczenie siatki dla obliczeń nasycień w modelu: a) nasycenie zatłaczanego gazu w funkcji współrzędnej modelu dla ustalonego kroku czasowego, b) nasycenie zatłaczanym gazem w poszczególnych blokach modelu dla ustalonego kroku czasowego

ważenie prawdopodobnie dałoby lepsze rezultaty. Jednak na podstawie różnic pomiędzy dwu- a trzypunktowym ważeniem można oczekiwać, że poprawa ta nie będzie znacząca.

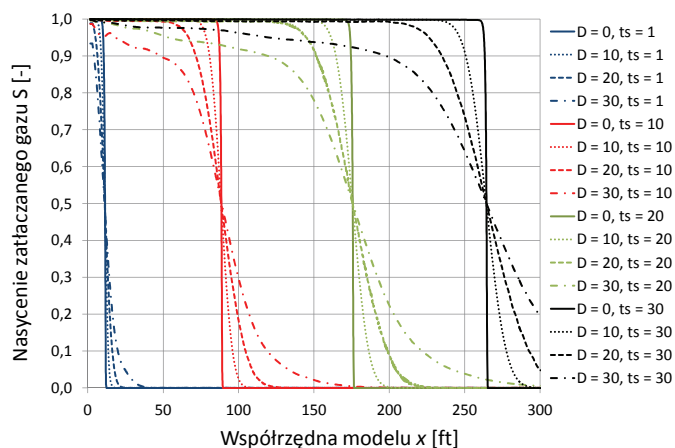
Wyniki zastosowania drugiej z wprowadzonych wcześniej metod ograniczających dyspersję numeryczną, tj. zagęszczenie siatki modelu dla obliczeń nasyceń, pokazano na rysunku 2, który przedstawia rozmycie frontu mieszania się gazów w postaci rozkładu nasyceń gazem zatłaczanym dla różnych stopni zagęszczania siatki modelu, przy jednoczesnym trzypunktowym ważeniu dla obliczeń mobilności płynów. Połączenie tych dwóch metod daje zadowalające wyniki w postaci bardzo niskiej dyspersji numerycznej. W modelu, w którym nie zastosowano metod ograniczenia dyspersji numerycznej, rozmycie frontu mieszania się gazu zatłaczanego z rodzimym przy założonej prędkości przepływu sięgało prawie 100 ft. Natomiast najlepszy uzyskany wynik pokazany na rysunku 2 (z dziewięciokrotnym zagęszczeniem siatki) to rozmycie frontu poniżej 2 ft. Dalsze ograniczanie dyspersji numerycznej przy użyciu metody zagęszczenia siatki, choć możliwe, jest mniej efektywne.

Wyniki wprowadzenia do modelu członu z dyspersją fizyczną pokazano na rysunku 3, przedstawiającym rozkład nasyceń gazu zatłaczanego w funkcji położenia wzdłuż modelu dla wybranych czterech wielkości stałej dyspersji D oraz czterech wybranych kroków czasowych symulacji ts . Rozmycie frontu mieszania się gazów zwiększa się nieznacznie z czasem. Wynika to z nieco odmiennych rozkładów ciśnień panujących w różnych krokach czasowych symulacji w sytuacji, gdy rozkłady ciśnień były jawnie wyliczane w symulatorze.

Na rysunku 3 widać również, że ograniczenie dyspersji numerycznej jest poprawne niezależnie od kroku czasowego, a rozmycie frontu mieszania się gazów w każdym kroku czasowym symulacji zmienia się proporcjonalnie do zadawanego parametru D . Założenie wielkości parametru D na poziomie $30 \text{ ft}^2/\text{d}$ wygenerowało rozmycie frontu mieszania się gazów na całej założonej długości modelu, co widać na jednej z krzywych przedstawiających rozmycie po 20 dobach.

Symulacje dwuwymiarowe

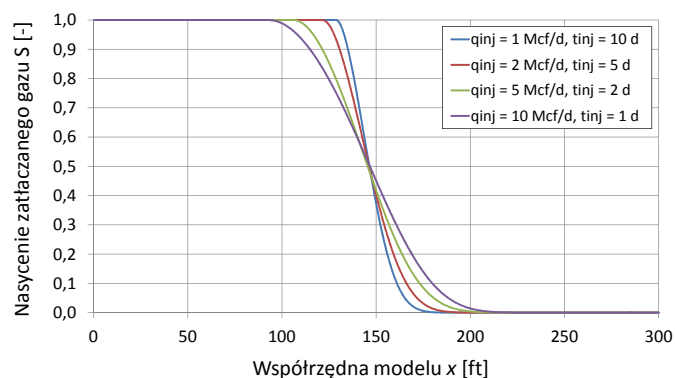
Wszystkie zmiany wprowadzone do symulatora złożowego BOAST, dotyczące ograniczenia dyspersji numerycznej oraz dodania parametrów dyspersji fizycznej (opisane wyżej), rozszerzono do dwóch wymiarów i przetestowano na przykładowym modelu złoża scharakteryzowanym przez: rozmiar 60×60 bloków o wymiarach $3 \times 3 \times 3$ ft, porowatości $\phi = 0,15$ i przepuszczalności $K = 50 \text{ mD}$ przy braku wody złożowej. Analogicznie do modelu jednowymiarowego, założono identyczne



Rys. 3. Model 1D. Efekt uwzględnienia dyspersji fizycznej o stałym parametrze D w rozmyciu frontu mieszania się gazu zatłaczanego z gazem rodzimym

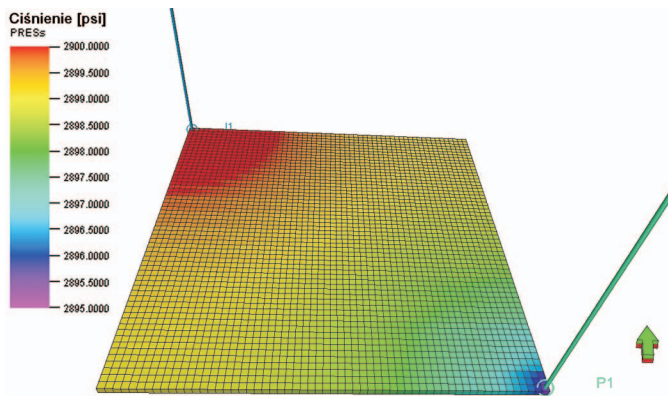
Rysunek 4 przedstawia wyniki symulacji dla dyspersji zależnej od prędkości, w których do jednowymiarowego modelu złoża zatłoczono tę samą ilość gazu G_{inj} w różnym czasie t_{inj} , gdzie: $G_{inj} = q_{inj} \cdot t_{inj}$, przy ustalonych parametrach dyspersji fizycznej: $D = 10 \text{ ft}^2/\text{d}$, $\alpha = 0,5$ ft.

Jak widać, zwiększenie wydajności zatłaczania gazu w modelu PMG zwiększa strefę zmieszania się tego gazu z gazem rodzimym obecnym w modelowanej strukturze, co poprawnie odzwierciedla to zjawisko zachodzące w rzeczywistości.



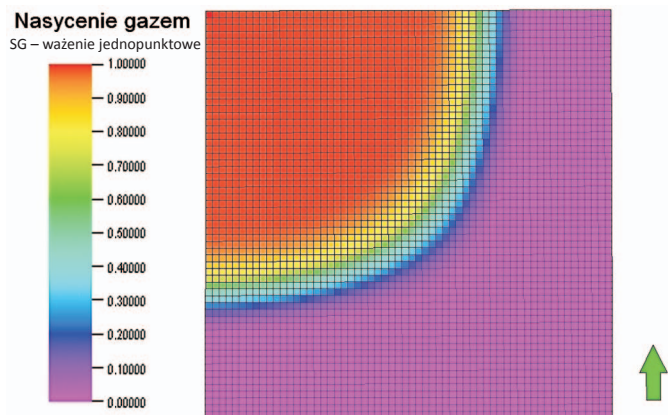
Rys. 4. Model 1D. Wpływ zastosowania dyspersji fizycznej zależnej od prędkości przepływu na rozmycie frontu mieszania się gazu zatłaczanego z gazem rodzimym

własności gazów (zatłaczanego i rodzimego) mieszających się w procesie wypierania. W pierwszym podejściu przyjęto stały rozkład ciśnień w modelu umożliwiającym stacjonarny przepływ płynów między blokami oraz pracę dwóch odwiertów: zatłaczającego (I1) i odbierającego (P1), zlokalizowanych na przeciwległych krańcach modelu (rysunek 5) i pracujących z wydajnościami zatłaczania/odbioru na poziomie pozwalającym zachować stacjonarny przepływ płynów w modelu.

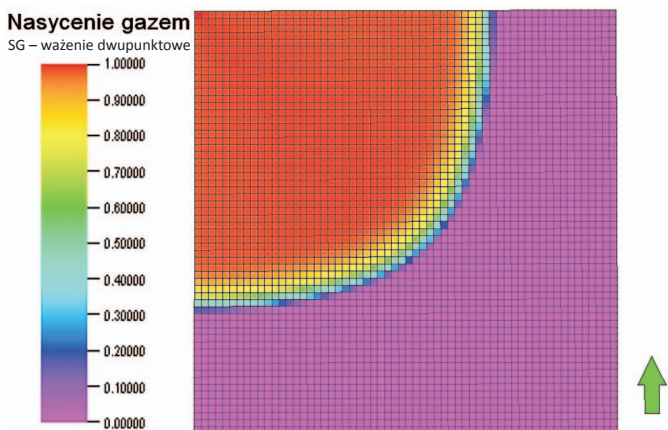


Rys. 5. Model 2D. Przestrzenny widok modelu złoża z rozmieszczeniem odwiertów i stacjonarnym rozkładem ciśnienia

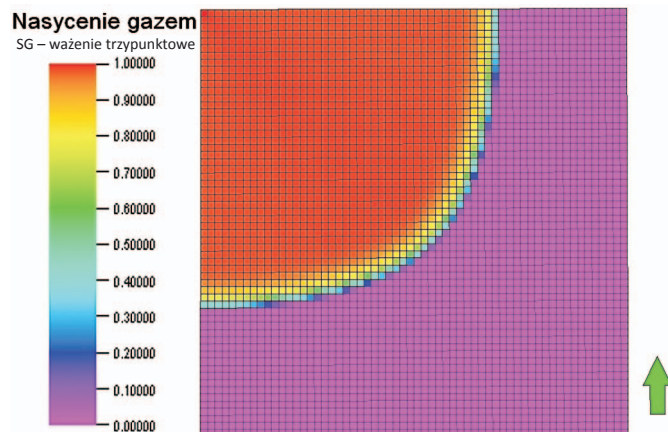
Na rysunkach 6–8 pokazano efekty ograniczenia dyspersji numerycznej (w modelu dwuwymiarowym) poprzez zmianę sposobu obliczania mobilności płynów od ważenia



Rys. 6. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zmianę sposobu obliczeń mobilności płynów – ważenie jednopunktowe. Nasylenie zatłaczanym gazem w poszczególnych blokach modelu dla ustalonego kroku czasowego



Rys. 7. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zmianę sposobu obliczeń mobilności płynów – ważenie dwupunktowe. Nasylenie zatłaczanym gazem w poszczególnych blokach modelu dla ustalonego kroku czasowego

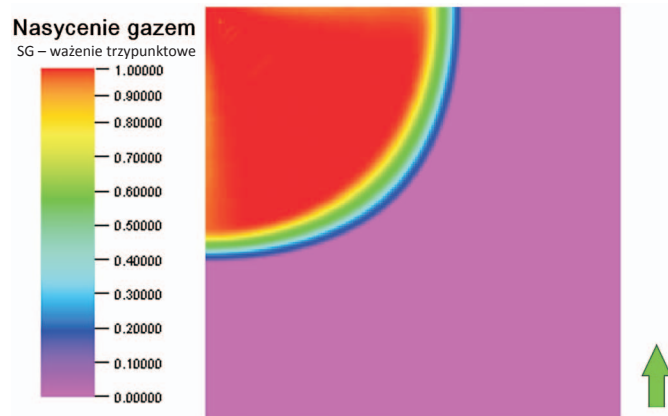


Rys. 8. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zmianę sposobu obliczeń mobilności płynów – ważenie trypunktowe. Nasylenie zatłaczanym gazem w poszczególnych blokach modelu dla ustalonego kroku czasowego

jednopunktowego poprzez dwupunktowe, skończywszy na trypunktowym. Podobnie jak w przypadku jednowymiarowym, zastosowanie ważenia dwupunktowego w znacznym stopniu ograniczyło dyspersję numeryczną, a przy ważeniu trypunktowym uzyskano jeszcze mniejsze rozmycie frontu mieszania się gazów.

Wpływ zagęszczenia siatki modelu (w metodzie *double mesh*) na wielkość rozmycia frontu mieszania się gazów w dwuwymiarowym modelu złoża przedstawiono w postaci wyników dla trzykrotnego, pięciokrotnego, siedmiokrotnego i jedenastokrotnego zagęszczenia siatki modelu odpowiednio na rysunkach 9–12. Każde kolejne zagęszczenie siatki przynosi wyraźną redukcję strefy mieszania się gazów.

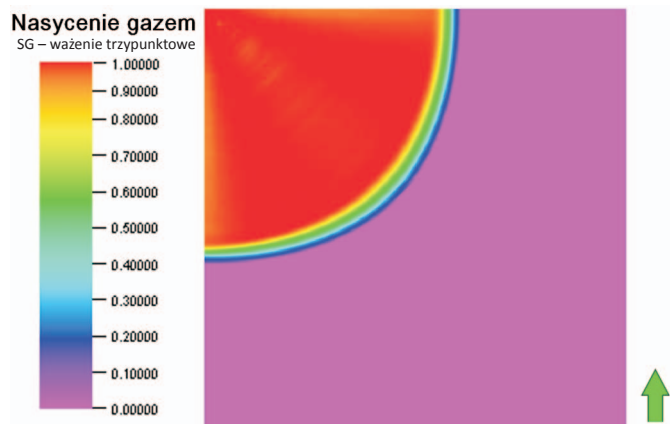
Na rysunku 13 przedstawiono wpływ zastosowania dyspersji fizycznej w modelu 2D z jednocześnie ograniczoną dyspersją numeryczną. Użyte parametry dyspersji fizycznej zależnej od prędkości to: $D = 10 \text{ ft}^2/\text{d}$ i $\alpha = 0,5 \text{ ft}$. Tam, gdzie



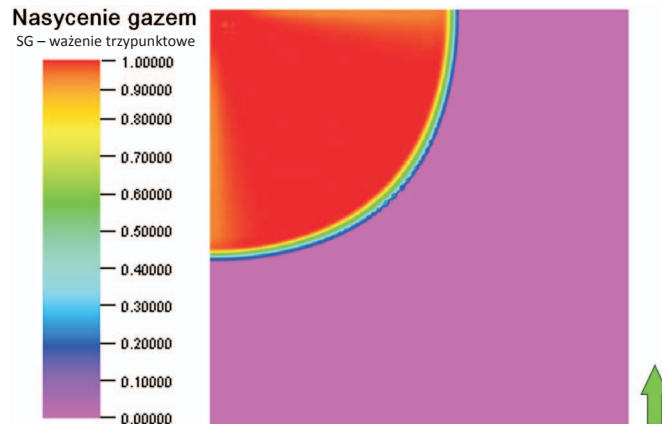
Rys. 9. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zagęszczenie siatki dla obliczeń nasylen w modelu – trzykrotne zagęszczenie (liczone ciśnienia). Nasylenie zatłaczanym gazem dla ustalonego kroku czasowego

prędkości przepływu są niższe (tj. na obrzeżach modelu), obserwujemy mniejsze rozmycie frontu mieszania się gazów,

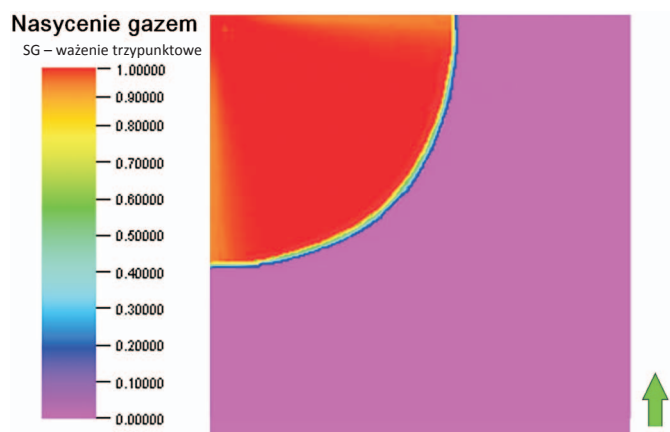
natomiast tam, gdzie są większe (w sąsiedztwie odwiertu odbierającego), rozmycie osiąga wyższe wartości.



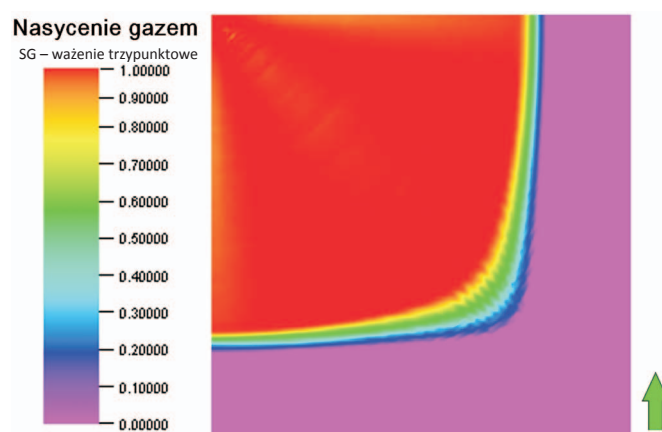
Rys. 10. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zagęszczenie siatki dla obliczeń nasyceń w modelu – pięciokrotne zagęszczenie (liczone ciśnienia). Nasycecie zatłaczanym gazem dla ustalonego kroku czasowego



Rys. 11. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zagęszczenie siatki dla obliczeń nasyceń w modelu – siedmiokrotne zagęszczenie (liczone ciśnienia). Nasycecie zatłaczanym gazem dla ustalonego kroku czasowego



Rys. 12. Model 2D. Ograniczenie dyspersji numerycznej poprzez zagęszczenie siatki dla obliczeń nasyceń w modelu – jedenastokrotne zagęszczenie (liczone ciśnienia). Nasycecie zatłaczanym gazem dla ustalonego kroku czasowego



Rys. 13. Model 2D. Wpływ zastosowania dyspersji fizycznej zależnej od prędkości przepływu na rozmycie frontu mieszania się gazu zatłaczanego z gazem rodzimym

Podsumowanie

W pracy przedstawiono zagadnienie dotyczące numerycznego modelowania zjawiska dyspersji występującego podczas wypierania mieszających się płynów złożowych (jak w przypadku pracy PMG). W standardowych komercyjnych symulatorach złożowych (typu Eclipse lub Imex) nie są dostępne opcje pozwalające na poprawne modelowanie tego zjawiska. W niniejszej pracy zmodyfikowano symulator złożowy BOAST celem uzyskania narzędzia umożliwiającego symulacje tych zjawisk. W tym celu zaimplementowano:

- procedurę ograniczającą dyspersję numeryczną poprzez trzypunktowe ważenie mobilności płynów,
- procedurę ograniczającą dyspersję numeryczną poprzez

zastosowanie podwójnej siatki modelu (*dual mesh*) oddzielnej do obliczeń ciśnień i nasyceń,

- rozszerzenie równania przepływu płynów o jawny człon dyspersyjny.

Ze względu na złożoność podjętego problemu wyżej wymienione modyfikacje wykonano i przetestowano w jednym i dwu wymiarach, z planem ich rozszerzenia do trzech wymiarów w przyszłości.

Zastosowane rozwiązanie przetestowano na odpowiednio jedno- i dwuwymiarowych modelach złożowych opisujących procesy wzajemnego wypierania płynów mieszających się (gazów).

Wnioski

1. Modelowanie zjawiska dyspersji zachodzącego podczas wzajemnego wypierania płynów mieszających w dotychczasowej praktyce wymagało manipulowania parametrami modelu niezwiązanymi bezpośrednio z tym zjawiskiem.
2. Modelowanie dyspersji fizycznej wymaga zminimalizowania występującej podczas obliczeń symulacyjnych dyspersji numerycznej. Metody: wielopunktowego ważenia mobilności oraz podwójnej siatki modelu pozwalają uzyskać praktyczną redukcję dyspersji numerycznej.
3. Zaproponowana modyfikacja symulatora złożowego, poprzez ograniczenie dyspersji numerycznej i uwzględnienie sparametryzowanej dyspersji fizycznej, poprawnie modeluje zjawiska mieszania się płynów w ośrodku porowatym.
4. Zmodyfikowany w jednym i dwóch wymiarach symulator złożowy BOAST może stanowić podstawę do budowy trójwymiarowego symulatora złożowego uwzględniającego modelowanie zjawisk zachodzących podczas wytwarzania buforu podziemnego magazynu gazu.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2015, nr 3, s. 177–184

Artykuł nadesłano do Redakcji 30.10.2014 r. Zatwierdzono do druku 9.01.2015 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Numeryczne modelowanie zjawiska dyspersji zachodzącego podczas tworzenia buforu w PMG* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr archiwalny: DK-4100-16/14, nr zlecenia: 16/KZ/14.

Literatura

- [1] Audigane P., Blunt M. J.: *Dual mesh method in upscaling*. SPE 79681, 2003.
- [2] Bijeljic B., Blunt M. J.: *A Physically-Based Description of Dispersion in Porous Media*. SPE-102869-MS, 2006.
- [3] Fanchi J. R., Harpole K. J., Bujnowski S. W.: *BOAST: A three-dimensional, three-phase black oil applied simulation tool (Version 1.1) Volume 1: Technical Description and FORTRAN Code*. Bartlesville Energy Technology Center, 1982.
- [4] Peaceman D. W.: *Fundamentals of numerical reservoir simulation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.
- [5] Szott W., Golabek A.: *Symulacyjne modelowanie procesów mieszania się gazów w warunkach złożowych*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 3, s. 151–161.
- [6] Szott W.: *Zastosowanie symulacji komputerowych do modelowania pracy podziemnych magazynów gazu w Polsce*. *Nafta-Gaz* 2010, nr 5, s. 339–344.
- [7] Tood M. R., O'Dell P. M., Hirsaki G. J.: *Methods for Increased Accuracy in Numerical Reservoir Simulators*. SPE 3516, 1972.



Mgr inż. Andrzej GOŁABEK
Asystent w Zakładzie Symulacji Złóż Węglowodórów i Podziemnych Magazynów Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: andrzej.golabek@inig.pl



Dr Wiesław Szott
Adiunkt; kierownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodórów i Podziemnych Magazynów Gazu.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: wieslaw.szott@inig.pl