

Nowa metoda modelowanie zjawiska mieszania się gazów z wykorzystaniem standardowego symulatora złożowego

A new method to model in situ gas-gas mixing phenomenon using a standard reservoir simulator

Andrzej Gołąbek

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł dotyczy zagadnień numerycznego modelowania zjawiska dyspersji fizycznej występującej podczas mieszania się dwóch gazów. Ponieważ w standardowych, komercyjnych symulatorach złożowych nie udostępniono opcji pozwalających na poprawne modelowanie zjawiska mieszania się płynów, to w ramach niniejszej pracy podjęto próbę zbudowania narzędzia programistycznego uwzględniającego to zjawisko. Narzędzie to wykorzystuje możliwości programu Petrel sterującego działaniem symulatora Eclipse. W efekcie uzyskano praktyczną metodę sterowania zjawiskiem dyspersji fizycznej. Występująca w strukturach węglowodorowych dyspersja fizyczna jest procesem rozmycia profilu stężenia płynu wywołanego niejednorodnością pola prędkości konwekcyjnej powstałą na skutek złożonego przepływu przez ośrodek porowaty. Modelowanie tego zjawiska wymagało zaimplementowania w strukturze programu Petrel specjalnego schematu obliczeniowego (tzw. Workflow) w formie kodu wewnętrznego (skryptu) wynikającego z metody opracowanej w ramach poprzednich prac autora. Metoda ta polega na minimalizacji dyspersji numerycznej oraz rozszerzeniu równań o człon dyspersji fizycznej. Zastosowana w schemacie obliczeniowym minimalizacja dyspersji numerycznej to hybrydowa metoda łącząca w sobie ograniczenie rozmycia frontu mieszania się gazów poprzez zagęszczenie siatki modelu oraz ograniczenie strefy mieszania się gazów wynikające z zastosowania wielopunktowego ważenia podczas obliczeń mobilności tych gazów. Natomiast uwzględnienie dyspersji fizycznej w tym schemacie polegało na dodaniu do niego jej parametrów (zależnych od kierunku oraz prędkości przepływu), które poprzez rozszerzenie o człon dyspersyjny równania przepływu płynów między blokami wpływają na uzyskane nasycenia w blokach modelu. W ramach pracy wykonano kilka modeli symulacyjnych syntetycznego złoża, różniących się od siebie rozdzielczością siatki bloków oraz rozkładami parametrów petrofizycznych. W pracy rozpatrzono modele dwufazowe, w których występują dwie fazy gazowe (gaz zatłaczany i gaz rodzimy) o nieco różnych parametrach. W modelach tych założono pewne uproszczenia (zerowe ciśnienia kapilarne oraz stacjonarny przepływ płynów), co pozwoliło na wytestowanie opracowanego schematu bez niepotrzebnego komplikowania obliczeń. W artykule zamieszczono opis działania i schemat blokowy opracowanego schematu oraz przedstawiono wyniki jego działania na rysunkach. Ponadto w artykule umieszczono wybrane wzory matematyczne dotyczące zastosowanej metody.

Słowa kluczowe: dyspersja numeryczna, dyspersja fizyczna, mieszanie się płynów, symulator złożowy, Petrel, Workflow.

ABSTRACT: The paper deals with issues of numerical modeling of physical dispersion occurring during the mixing of two gases. Because standard commercial reservoir simulators do not provide options to model the phenomenon of mixing fluids, this paper presents an attempt to build a tool enabling the control of physical dispersion responsible for fluid mixing under reservoir conditions. The tool takes advantage of the capabilities of the Petrel program that controls the operations of the Eclipse simulator. The physical dispersion occurring in hydrocarbon structures is the process of blurring the fluid concentration profile caused by the inhomogeneity of the convective velocity field resulting from the complex flow through the porous medium. Modeling of this phenomenon requires the implementation of a method developed in the author's previous work into the Petrel workflow using its specific script coding. This method consists in minimizing numerical dispersion and extending the equations with the element of physical dispersion. The minimization of numerical dispersion used in the script is a hybrid method combining limiting the blur of the gas mixing front through the refinement of the model grid and limiting the gas mixing zone resulting from the use of multi-point weighing during gas mobility calculations. On the other hand, the inclusion of physical dispersion in the script consisted in adding its parameters (depending on the direction and velocity of the flow) which by extending the dispersion of the fluid flow equation between blocks, affect the obtained saturation in the blocks of the model. As part of the work, several simulation models of a synthetic reservoir were made, differing in the refinement of the grid of blocks and the distribution of petrophysical parameters. This article considers two-phase models in which there are two gas

Autor do korespondencji: A. Gołąbek, e-mail: andrzej.golabek@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji 28.12.2018 r. Zatwierdzono do druku 8.03.2019 r.

phases (injection gas and original gas) with slightly different parameters. These models assumed some simplifications (zero capillary pressure and stationary flow of fluids), which allowed to test the developed script without unnecessarily complicating the calculations. The paper includes a description of the operation and block diagram of the developed script and presents the results of its operation in the drawings. In addition, the article presents selected mathematical formulas concerning the applied method.

Key words: numerical dispersion, physical dispersion, fluid mixing, reservoir simulator, Petrel, Workflow.

Wstęp

W trakcie zatłaczania płynów do złóż węglowodorowych napotyka się na zjawisko dyspersji fizycznej (Perkins i Johnston, 1963; Bijeljic i Blunt, 2006) zachodzące podczas mieszania się zatłaczanego płynu z płynem „rodzimy” występującym w strukturze. Opis tego zjawiska różni się w zależności od rodzajów rozpatrywanych płynów złożowych. Gdy na przykład zatłacza się wodę do złoża ropnego to mamy do czynienia z tzw. wypieraniem niemieszającym, gdzie zjawisko dyfuzji molekularnej nie zachodzi, a zjawisko „mieszania” się tych płynów wynika ze skomplikowanej struktury ośrodka porowatego. Natomiast, gdy zatłacza się gaz do struktury gazowej zachodzi zjawisko wypierania mieszającego, w którym mieszanie się gazów zależy zarówno od dyfuzji molekularnej, jak i skomplikowanej budowy ośrodka porowatego.

Zjawisko mieszania się płynów złożowych jest bardzo istotne w praktykach podziemnego magazynowania gazu (Azin et al., 2008; Gołąbek i Szott, 2010; Szott, 2010; Gołąbek et al., 2011a, 2011b; Szott et al., 2012) (zwłaszcza podczas wytwarzania nie węglowodorowej poduszki buforowej lub zatłaczania wysokometanowego gazu ziemnego do struktur zawierających mocno zanieczyszczony gaz rodzimy) oraz w sytuacjach próby zwiększania energii złoża ropno-gazowego poprzez zatłaczanie gazu do jego czapy gazowej. Mimo iż zjawisko dyspersji fizycznej znacząco wpływa na przebieg mieszania się płynów w strukturach węglowodorowych, nie zostało ono poprawnie uwzględnione w dostępnych symulatorach złożowych (zarówno „open code”, jak i komercyjnych).

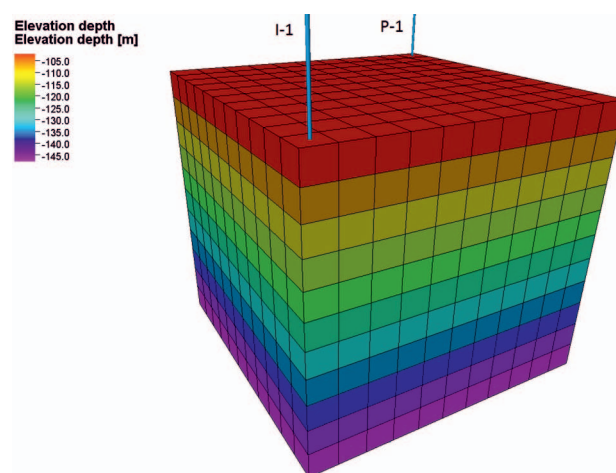
Niniejszy artykuł dotyczy pracy stanowiącej kontynuację poprzedniej pracy autora pt.: *Modelowanie zjawiska dyspersji fizycznej poprzez modyfikację wyników standardowego symulatora złożowego*, w ramach której zbudowano narzędzie (schemat obliczeniowy tzw. Workflow w formie kodu wewnętrznego – skrypt) modyfikujące wyniki symulatora Eclipse w oparciu o opracowaną wcześniej metodę sterowania dyspersją fizyczną (Fanchi et al., 1982; Miłek et al., 2013; Szott i Gołąbek, 2014; Gołąbek i Szott, 2015a, 2017; Szott, 2017). Zaimplementowana w skrypcie metoda polega na minimalizacji dyspersji numerycznej (mobilność z ważeniem wielopunktowym w kierunku napływu (Tood et al., 1972) plus podwójna siatka dyskretyzacji (Audigane i Blunt, 2003) oraz rozszerzeniu standardowych równań nasyceń o dodatkowy człon dyspersji fizycznej o zadanych parametrach (Redlich

i Kwong, 1949; Soave, 1972; Peaceman, 1977; Kreft i Zuber, 1978; Shrivastava et al., 2005). Skonstruowany skrypt umożliwił poprawne modelowanie przebiegu badań laboratoryjnych dotyczących wypierania niemieszającego i dotyczył tylko problemów jednowymiarowych.

W ramach niniejszej pracy podjęto próbę skonstruowania skryptu, który umożliwi sterowanie zjawiskiem mieszania się płynów w przypadkach pełnowymiarowych. Do modelowania zjawiska dyspersji fizycznej użyto komercyjnego oprogramowania firmy Schlumberger (Eclipse Black Oil and Compositional, 2010): symulatora złożowego Eclipse typu blackoil oraz środowiska skryptowego (Workflow) udostępnionego w programie Petrel.

Konstrukcja modeli symulacyjnych syntetycznego złoża

W pierwszym etapie omawianej pracy przy użyciu oprogramowania Petrel skonstruowano model symulacyjny syntetycznego złoża, który umożliwił późniejsze testy opracowanego skryptu sterowania zjawiskiem mieszania się płynów. Trójwymiarowy widok skonstruowanego modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przestrzenny widok modelu symulacyjnego (w prezentowanym widoku model został dwukrotnie rozciągnięty w kierunku z)

Fig. 1. 3D view of the simulation model (in the presented view the model has been stretched twice towards z)

Model ten to prostopadłościan o wymiarach $110 \times 110 \times 50$ m i pierwotnie założonej siatce $11 \times 11 \times 11$ bloków. Założona

siatka bloków była później zagęszczana w ramach hybrydowej metody ograniczenia dyspersji numerycznej. W modelu uwzględniono dwa odwierty, które zlokalizowano po dwóch przeciwnych rogach modelu. Pierwszy odwierc to odwierc iniekcyjny (I-1) udostępniający najpłytszą warstwę modelu. Natomiast drugi odwierc to odwierc produkcyjny (P-1) udostępniający najgłębszą warstwę skonstruowanego syntetycznego modelu symulacyjnego.

Właściwości petrofizyczne modelu

Wstępnie w modelu we wszystkich blokach założono stałe wartości parametrów petrofizycznych. Porowatość założono na poziomie 3%, przepuszczalności w kierunkach X i Y na poziomie 100 mD, przepuszczalność pionową wynikającą z zakładanej anizotropii na poziomie 10 mD oraz NTG równe 1, co zakłada stuprocentową miąższość efektywną. W późniejszym etapie wykonywanej pracy wartości te posłużyły jako wartości średnie w zakładanych rozkładach przestrzennych tych parametrów (z wyjątkiem NTG ponieważ nadal zakładano, że cała miąższość modelu jest miąższością efektywną. Zarówno porowatość, jak i przepuszczalności zostały wygenerowane w oparciu o tzw. rozkład normalny, gdzie dla porowatości założono średnią wartość na poziomie 3%, a odchylenie standardowe na poziomie 0,1%. W przypadku przepuszczalności – średnia wartość wyniosła 100 mD, a odchylenie standardowe 10. W kierunkach poziomych zakładano te same rozkłady. Dla kierunku pionowego założono natomiast anizotropię dzieląc uzyskany rozkład przez 10 mD.

Płyny złożowe

Budując model symulacyjny, oprócz parametrów petrofizycznych należy również zadać parametry płynów złożowych. W zależności od rozpatrywanych przypadków w modelu mogą znajdować się takie płyny złożowe, jak woda, ropa czy gaz ziemny. W ramach tego artykułu rozpatrzono modele dwufazowe, w których występują dwie fazy gazowe o nieco różnych parametrach. Użyte do analizy właściwości zakładanych płynów złożowych pochodzą z modeli rzeczywistych złóż gazu ziemnego wykonanych w ramach innych prac Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego.

Właściwości transportowe i ciśnienia kapilarne

W skonstruowanym modelu symulacyjnym syntetycznego złoża przyjęto typowe właściwości transportowe określone dla

rzeczywistego złoża gazu ziemnego. Przepuszczalność względną dla gazu k_{rg} określono przy pomocy standardowej zależności dla płynów mieszających się:

$$k_{rg} = S_g^* \quad (1)$$

gdzie: $S_g^* = \frac{S_g - S_{g,min}}{S_{g,max} - S_{g,min}}$ oraz $S_{g,min} = S_{gr} = 0,1$

$$\text{a } S_{g,max} = 1 - S_{wc}$$

W rozpatrywanych modelach symulacyjnych założono zerowe ciśnienia kapilarne, odpowiadające mieszającym się płynom. Ciśnienia kapilarne mają duże znaczenie w przypadku wypierania niemieszającego, lecz w przypadku mieszania się dwóch gazów zakłada się ich brak.

Warunki eksploatacji

W celu uproszczenia obliczeń w rozpatrywanych modelach symulacyjnych założono stacjonarny przepływ przy średnim ciśnieniu na poziomie 200 bar. Odwiertowi zatłaczającemu I-1 zadano wydajność tłoczenia gazu, a odwiertowi P-1 ustawiono sterowanie w taki sposób, aby odwierc ten wydobywał w warunkach złożowych tę samą ilość gazu, co jest zatłaczana. W przypadku tłoczenia gazu do gazu, wydajności zatłaczania i produkcji są zbliżone, ponieważ gazom tym założono zbliżone właściwości (współczynniki objętościowe, gęstości czy lepkości). Jest to w przybliżeniu model jednofazowy, który z przyczyn poprawnego modelowania zjawiska mieszania się dwóch gazów został rozdzielony na dwie niezależne fazy gazowe. Odwiertom udostępniającym zbudowany model założono typowe średnice: 0,1683 m oraz zwiększono PI, po to by zminimalizować niepotrzebne w tym przypadku opory pomiędzy odwiertami a blokami, w których są udostępnione.

Budowa skryptu sterowania dyspersją fizyczną (Workflow)

Proponowana metoda sterowania mieszaniami się dwóch płynów złożowych stanowi inne podejście rozwiązania tego problemu w porównaniu z poprzednimi pracami. W poprzednich pracach zmodyfikowano kod źródłowy symulatora BOAST typu *open source*, do którego zaimplementowano metodę sterowania dyspersją fizyczną przedstawioną poniżej.

- Proponowana metoda składa się z dwóch etapów: minimalizacji dyspersji numerycznej (rozmycia wyników symulacji wynikających ze stosowanej metody obliczeniowej – dyskretyzacja pochodnych poprzez różnice skończone

+ *upstream weighting*, zapewniający stabilność rozwiązań numerycznych);

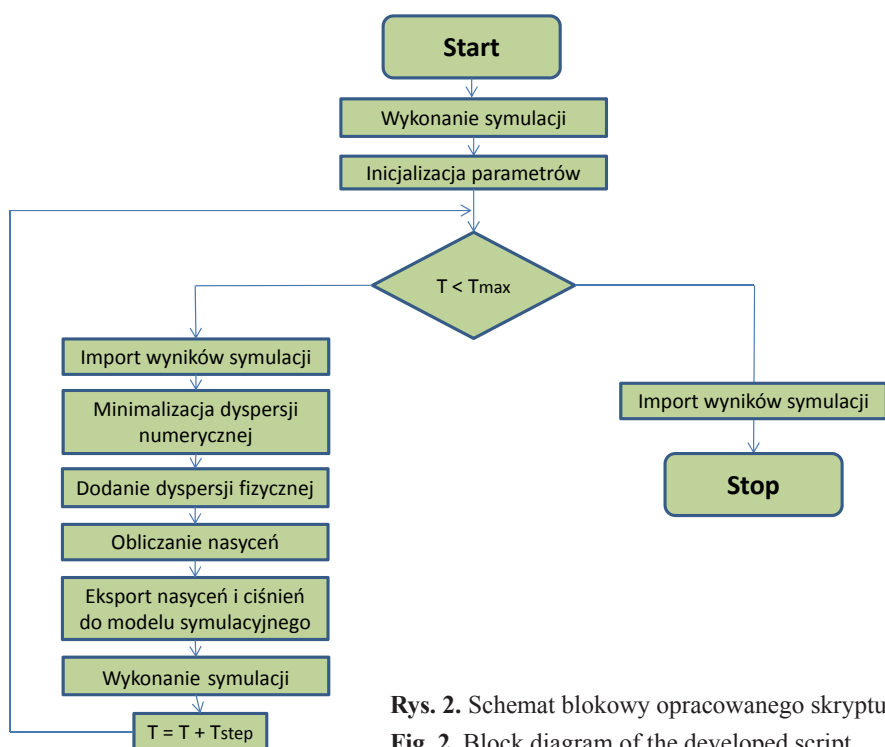
- rozszerzenia równań o człon dyspersji fizycznej (dodanie do symulatora parametrów umożliwiających sterownie dyspersją fizyczną poprzez zadanie stałej wartości dyspersji, bądź jej liniowej zależności od prędkości przepływu).

W przedstawionym artykule podjęto próbę zastosowania tej metody do modelowania dyspersji fizycznej przy wykorzystaniu mechanizmów skryptowych udostępnionych w programie Petrel. Poprzednie rozwiązanie jest oczywiście poprawne, lecz symulator złożowy BOAST nie jest w praktyce wykorzystywany ani w projektach komercyjnych ani w większości projektów naukowo-badawczych.

Ponieważ producenci komercyjnych symulatorów złożowych nie udostępniają ich kodu źródłowego to implementacja proponowanej metody bezpośrednio w tych symulatorach jest niemożliwa. Dlatego w ramach niniejszej pracy postanowiono stworzyć mechanizmy (w postaci skryptu) umożliwiające poprawne sterownie mieszaniem się płynów złożowych bazujące na wynikach uzyskanych w rezultacie obliczeń symulatora Eclipse. Do tego celu użyto środowiska skryptowego udostępnionego w programie Petrel, umożliwiającego bezpośredni dostęp do uzyskanych wyników symulacji.

Ogólne działanie skryptu

Zbudowany w ramach pracy skrypt umożliwiający sterowanie zjawiskiem dyspersji fizycznej dzieli się na kilka etapów.

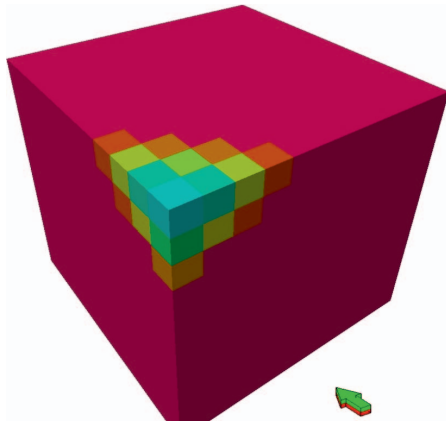


Rys. 2. Schemat blokowy opracowanego skryptu
Fig. 2. Block diagram of the developed script

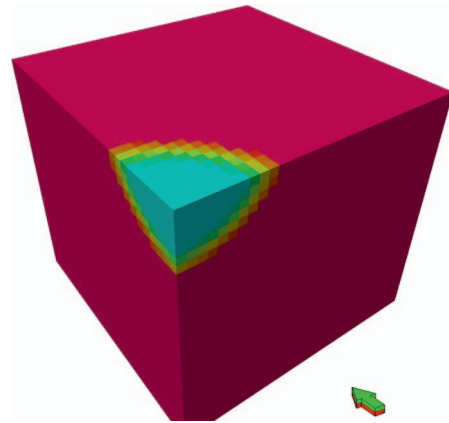
Na początku skrypt uruchamia pierwszą symulację, w której obliczany jest pierwszy krok czasowy. Następnie w skrypcie wykonywana jest inicjalizacja niezbędnych parametrów obliczeniowych. W skład inicjalizowanych parametrów wchodzi: parametry dyspersji fizycznej, współczynniki wykorzystywane w obliczeniach mobilności płynów, parametry określające maksymalną ilość bloków w każdym kierunku oraz parametry dotyczące kroków czasowych i odwiertów. W drugim etapie skryptu uruchamiana jest pętla, na początku której wykonywany jest import wyników poprzednich symulacji. Następnie z wykorzystaniem zaimportowanych wyników danych wykonywane są wszelkie niezbędne obliczenia umożliwiające uzyskanie nowych pseudonasyceń płynami złożowymi (ponieważ nasycenie gazem bloków modelu może dotyczyć zarówno gazu zatłaczanego, jak i rodzimego wprowadzono termin pseudonasyceń). Na koniec omawianego skryptu eksportowane jest nowe pseudonasycenie gazu zatłaczanego (uzyskane w wyniku obliczeń) oraz ciśnienie w blokach uzyskane w poprzedniej symulacji, które brało udział w obliczeniu tego pseudonasyceń. Zarówno nowe pseudonasycenie, jak i wyeksportowane ciśnienie inicjowane są jako wartości początkowe w nowej symulacji złożowej i wyliczany jest kolejny krok czasowy opracowanego skryptu (każda wykonana symulacja odpowiada jednemu krokowi czasowemu zbudowanego skryptu). Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy opracowanego skryptu.

Minimalizacja dyspersji numerycznej

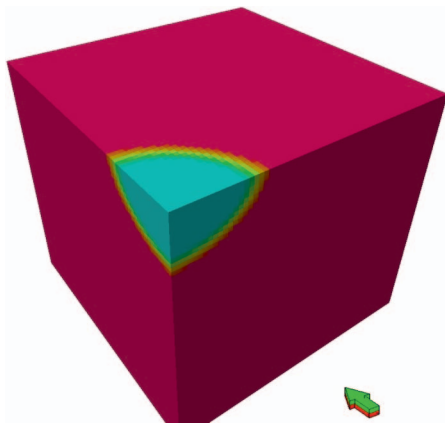
Pierwszym etapem opracowanej metody sterowania mieszaniem się płynów jest minimalizacja dyspersji numerycznej. W omawianej metodzie minimalizacja dyspersji numerycznej to hybrydowa metoda łącząca w sobie ograniczenie rozmycia frontu zmieszania się płynów poprzez zagęszczenie siatki modelu oraz ograniczenie strefy mieszania się płynów wynikające z zastosowania wielopunktowego ważenia podczas obliczeń mobilności tych płynów. Wyniki ograniczenia dyspersji numerycznej poprzez zagęszczanie siatki modelu pokazano na rysunkach 3–7. Na omawianych rysunkach przedstawiono rozkład pseudonasyceń gazem zatłaczanym w poszczególnych blokach modelu, gdzie kolorem niebieskim zaznaczono 100% pseudonasyceń gazem zatłaczanym natomiast kolorem ciemnoróżowym brak pseudonasyceń tym



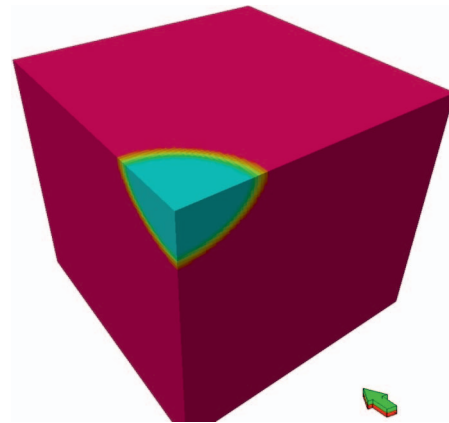
Rys. 3. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Niezagęszczona siatka modelu
Fig. 3. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model without grid refinement



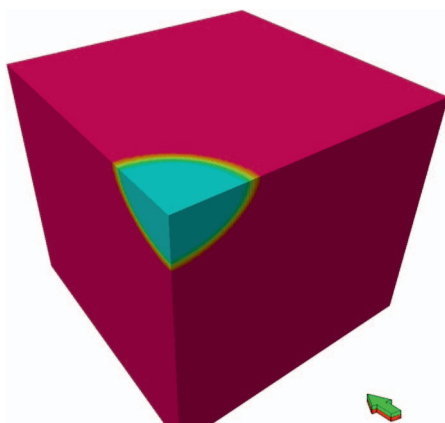
Rys. 4. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Trzykrotne zagęszczanie siatki modelu
Fig. 4. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with three times grid refinement



Rys. 5. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Sześciokrotne zagęszczanie siatki modelu
Fig. 5. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with six times grid refinement



Rys. 6. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Dziewięciokrotne zagęszczanie siatki modelu
Fig. 6. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with nine times grid refinement



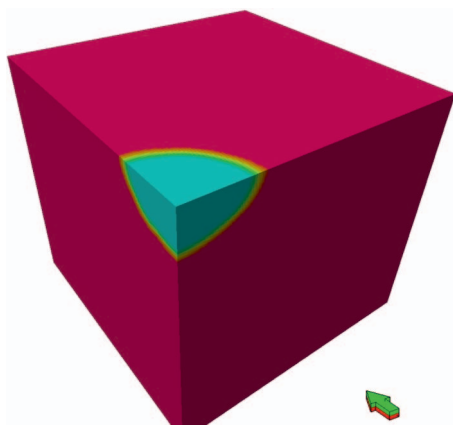
Rys. 7. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Dwunastokrotne zagęszczanie siatki modelu
Fig. 7. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with twelve times grid refinement

sześciokrotne, dziewięciokrotne i dwunastokrotne zagęszczenie modelu. Na rysunkach tych widać, że im większe zagęszczenie siatki modelu tym mniejszy front zmieszania się zatłaczanego gazu z gazem rodzimym. Wyniki te przedstawiono przy założonych stałych przepuszczalnościach i porowatościach we wszystkich blokach modelu.

W przypadku mieszania się dwóch gazów zadowalający wynik ograniczenia dyspersji numerycznej osiąga się już po dziewięciokrotnym zagęszczeniu siatki modelu. Dwunastokrotne zagęszczenie siatki modelu znacznie wydłuża obliczenia. Natomiast efekt w postaci ograniczenia dyspersji numerycznej w porównaniu z modelem o zagęszczeniu dziewięciokrotnym nie jest znaczący. Na rysunku 8 przedstawiono strefę zmieszania się dwóch gazów w modelu z dziewięciokrotnie zagęszczoną siatką oraz z zadanymi rozkładami parametrów petrofizycznych według zadanych rozkładów normalnych. Jak widać na rysunku, zmienność parametrów petrofizycznych wpływa nieznacznie na efekt minimalizacji dyspersji numerycznej.

gazem. Pierwszy z wymienionych rysunków dotyczy modelu niezagęszczonego. Kolejne pokazują natomiast trzykrotne,

Wielkość strefy zmieszania się dwóch gazów jest porównywalna z przypadkiem ze stałymi parametrami. Na omawianym rysunku można natomiast zauważyć niewielką asymetrię prezentowanego rozkładu nasycenia zatłaczanym gazem (w szczególności porównując kierunki pionowe z poziomymi) wynikającą z zmienności parametrów petrofizycznych.



Rys. 8. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Dziewięciokrotne zagęszczenie siatki modelu. Właściwości petrofizyczne według rozkładów normalnych

Fig. 8. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with nine times grid refinement. Petrophysical properties according to normal distributions

Drugą składową zaproponowanej hybrydowej metody ograniczenia dyspersji numerycznej jest obliczanie mobilności płynów z wykorzystaniem wielopunktowego ważenia w kierunku napływu. Metoda ta polega na sprawdzeniu kierunku przepływu dowolnego płynu (gazu, ropy czy wody) i obliczeniu przepuszczalności względnej między blokami na podstawie przepuszczalności względnych występujących w sąsiednich blokach. W przypadku modelu trójwymiarowego przepływ odbywać się może we wszystkich trzech kierunkach (X , Y , Z) w zależności od obecnych w złożu gradientów ciśnień. Wszystkie wzory i opis tej metody przedstawiono w poprzednich pracach (Gołąbek i Szott, 2015a, 2015b; 2016, 2017). Natomiast w prezentowanym artykule przedstawiono wzory dla przypadku ważenia trzypunktowego. Przepuszczalność względna między dwoma blokami w zależności od kierunku przepływu obliczana jest ze wzorów:

$$k_{r,i+\frac{1}{2}} = a_1 k_{r,i} + a_2 k_{r,i-1} + a_3 k_{r,i-2} \quad (2)$$

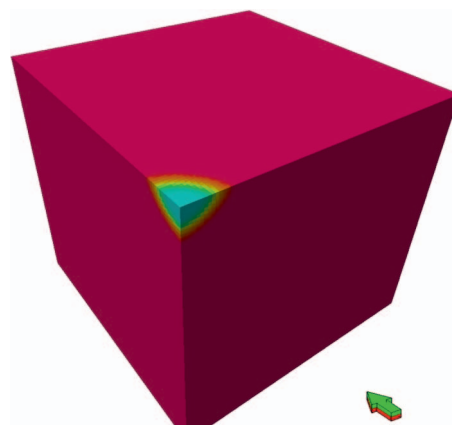
$$k_{r,i-\frac{1}{2}} = a_1 k_{r,i-1} + a_2 k_{r,i-2} + a_3 k_{r,i-3} \quad (3)$$

gdzie po odpowiednich przeliczeniach uzyskano współczynniki:

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

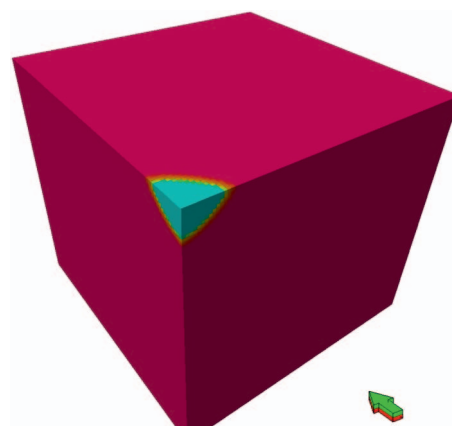
Wyniki minimalizacji dyspersji numerycznej poprzez zmianę obliczeń mobilności płynów przedstawiono na

rysunkach 9–11. Ponieważ proponowana metoda minimalizacji dyspersji numerycznej jest połączeniem dwóch metod minimalizacji to wyniki zastosowania wielopunktowego ważenia dla obliczeń mobilności płynów pokazano na modelu z dziewięciokrotnie zagęszczoną siatką modelu. Porównując ze sobą przedstawione rysunki można zauważyć, że zastosowanie dwupunktowego ważenia znacznie zmniejsza dyspersję numeryczną w porównaniu z modelem, w którym ważenie nie jest stosowane. Zastosowanie ważenia trzypunktowego również poprawia wyniki. W porównaniu z ważeniem dwupunktowym rozmycie frontu mieszania się płynów jest jeszcze mniejsze, za czym idzie lepsza minimalizacja dyspersji numerycznej. Stosowanie obliczeń mobilności płynów z większą ilością punktów biorących udział w ważeniu nie jest już efektywne i nie przyniesie pożądanych korzyści.



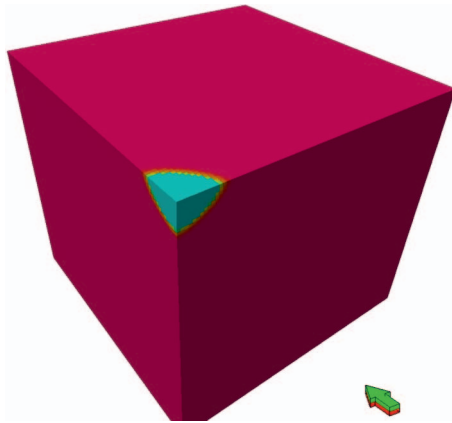
Rys. 9. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Dziewięciokrotne zagęszczenie siatki modelu. Mobilność płynów z ważeniem jednopunktowym

Fig. 9. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with nine times grid refinement. Mobility of liquids with one-point weighting



Rys. 10. Rozkład pseudonasycenia gazem zatłaczanym. Dziewięciokrotne zagęszczenie siatki modelu. Mobilność płynów z ważeniem dwupunktowym

Fig. 10. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with nine times grid refinement. Mobility of liquids with two-point weighting



Rys. 11. Rozkład pseudonasyceń gazem zatłaczanym. Dziewięciokrotne zagęszczenie siatki modelu. Mobilność płynów z ważeniem trzypunktowym

Fig. 11. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. Model with nine times grid refinement. Mobility of liquids with three-point weighting

Dyspersja fizyczna

Występująca w strukturach węglowodorowych dyspersja fizyczna jest to proces rozmycia profilu stężenia płynu wywołany niejednorodnością pola prędkości konwekcyjnej powstałą na skutek złożonego przepływu przez ośrodek porowaty (Gelhar i Collins, 1971; Fanchi et al., 1983; Reid, 1987; Coats et al., 2009; Li D., 2010). Uwzględnienie tego zjawiska w proponowanym skrypcie polegało na (Vitousek i Fringer, 2011; Gołąbek i Szott, 2016) dodaniu parametrów do równania na przepływ gazu z/do bloków sąsiednich do/z bloku o współrzędnych i, j, k :

$$\begin{aligned} \bar{Q}_g = & \overline{KA_{ci}} \frac{k_{rg,x}}{\mu_g B_g} \frac{P_{i-1} - P_i}{\frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2}} + \overline{D_{phys,x} A_{ci}} \frac{S_{i-1} - S_i}{B_g \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2}} + \\ & + \overline{KA_{cj}} \frac{k_{rg,y}}{\mu_g B_g} \frac{P_{j-1} - P_j}{\frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2}} + \overline{D_{phys,y} A_{cj}} \frac{S_{j-1} - S_j}{B_g \frac{\Delta y_{j-1} + \Delta y_j}{2}} + \\ & + \overline{KA_{cz}} \frac{k_{rg,z}}{\mu_g B_g} \frac{P_{k-1} - P_k}{\frac{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k}{2}} + \overline{D_{phys,z} A_{cz}} \frac{S_{k-1} - S_k}{B_g \frac{\Delta z_{k-1} + \Delta z_k}{2}} \quad (4) \end{aligned}$$

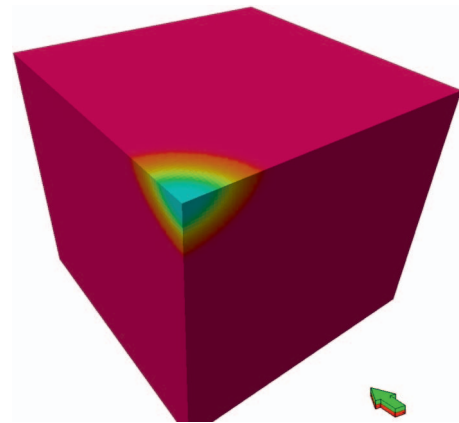
gdzie: \bar{K} to przepuszczalność bezwzględna, $\overline{A_{ci}}$, $\overline{A_{cj}}$, $\overline{A_{cz}}$, to pola przekrojów poprzecznych pomiędzy blokami (pomiędzy x_{i-1} i x_i , y_{j-1} i y_j , z_{k-1} i z_k), $k_{rg,x}$, $k_{rg,y}$, $k_{rg,z}$, to przepuszczalności względne gazu wypierającego przy mieszających się składnikach, proporcjonalne do jego pseudonasyceń (koncentracji) w różnych kierunkach, co odpowiada strumieniowi gazu według wzoru:

$$\vec{Q}_g = A * S_g * \vec{v} + D * \nabla S_g \quad (5)$$

μ_g , B_g to kolejno lepkość i współczynnik objętościowy gazu wypierającego, Δx_j , Δy_j , Δz_k to rozmiary bloków w różnych kierunkach, $P_{i,j,k}$ to ciśnienia w blokach, $S_{i,j,k}$ to pseudonasyceń gazem zatłaczanym, a $D_{phys,x}$ to dyspersja fizyczna wyrażona w wzorem $D_{phys,x} = D_x + a\vec{v}$ (analogicznie w kierunkach y i z).

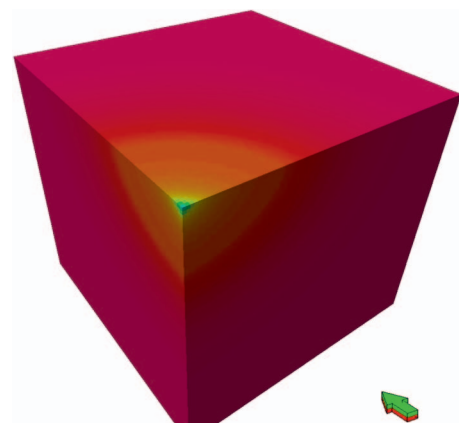
Kontrola strefy mieszania się płynów

Po zbudowaniu pełnego skryptu wykonano szereg testów, które umożliwiły sprawdzenie opracowanej metody. W testach zastosowano dziewięciokrotne zagęszczenie siatki modelu oraz trzypunktowe ważenie podczas obliczeń mobilności płynów. Wyniki sterowania dyspersją fizyczną przedstawiono na rysunkach 12–15. Ponieważ założony stacjonarny przepływ charakteryzują się stałą prędkością, to w wykonanych obliczeniach pominięto parametr α określający zależność dyspersji fizycznej od prędkości przepływu w danym



Rys. 12. Rozkład pseudonasyceń gazem zatłaczanym. $Dx = Dy = Dz = 4 \text{ m}^2/\text{d}$

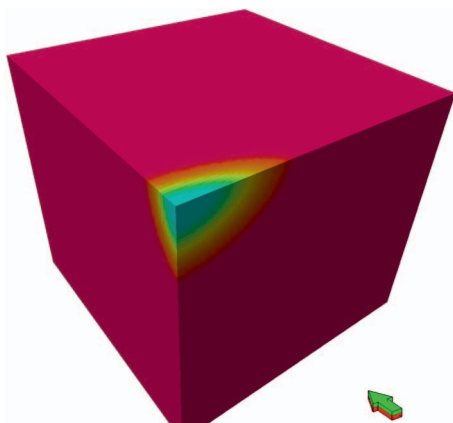
Fig. 12. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. $Dx = Dy = Dz = 4 \text{ m}^2/\text{d}$



Rys. 13. Rozkład pseudonasyceń gazem zatłaczanym. $Dx = Dy = Dz = 20 \text{ m}^2/\text{d}$

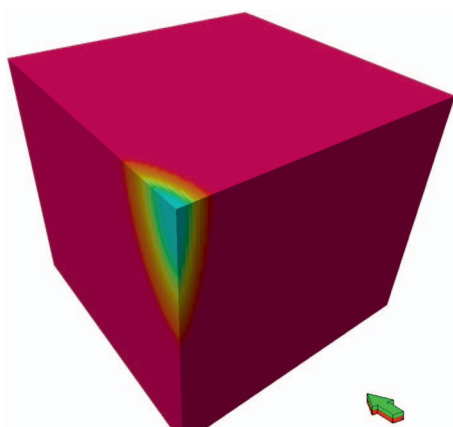
Fig. 13. Distribution of pseudo-saturation of injected gas. $Dx = Dy = Dz = 20 \text{ m}^2/\text{d}$

kierunku. Wielkość mieszania się gazów (zatlaczanego z rodzimym) określono za pomocą trzech parametrów D_x, D_y, D_z , którym najpierw założono te same stałe wartości. Jak widać na rysunkach 12 i 13 zwiększanie wielkości parametrów D powoduje znaczne zwiększenie strefy zmieszania się gazów. Przy założonych D_x, D_y, D_z na poziomie $20 \text{ m}^2/\text{d}$ otrzymujemy bardzo duże rozmycie strefy zmieszania się gazu zatlaczanego z gazem rodzimym (około 40 m) sięgające prawie do połowy rozpatrywanego modelu. Na kolejnych rysunkach (rys. 14, 15) przedstawiono wyniki zastosowania różnych wartości parametrów: D_x, D_y, D_z . Rysunki te pokazują możliwości sterowania dyspersją fizyczną udostępnione w skrypcie. Wielkość rozmycia frontu mieszania się gazów prawdopodobnie nie jest identyczna we wszystkich kierunkach. W większości modeli zakłada się anizotropię przepuszczalności (co wynika z badań laboratoryjnych), dlatego też powinno się zakładać anizotropię dyspersji fizycznej.



Rys. 14. Rozkład pseudonasycenia gazem zatlaczanym.
 $D_x = 10 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_y = 4 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_z = 7 \text{ m}^2/\text{d}$

Fig. 14. Distribution of pseudo-saturation of injected gas.
 $D_x = 10 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_y = 4 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_z = 7 \text{ m}^2/\text{d}$



Rys. 15. Rozkład pseudonasycenia gazem zatlaczanym.
 $D_x = 2 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_y = 4 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_z = 10 \text{ m}^2/\text{d}$

Fig. 15. Distribution of pseudo-saturation of injected gas.
 $D_x = 2 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_y = 4 \text{ m}^2/\text{d}$, $D_z = 10 \text{ m}^2/\text{d}$

Podsumowanie

W artykule podjęto zagadnienia dotyczące numerycznego modelowania zjawiska dyspersji fizycznej występującej podczas mieszania się dwóch gazów. Ponieważ w standardowych, komercyjnych symulatorach złożowych nie udostępniono opcji pozwalających na poprawne modelowanie zjawiska mieszania się płynów, to w ramach niniejszej pracy podjęto próbę zbudowania narzędzia, w postaci skryptu w programie Petrel, umożliwiającego sterowanie zjawiskiem dyspersji fizycznej i wykorzystującego zaproponowaną we wcześniejszych artykułach metodę polegającą na:

- minimalizacji dyspersji numerycznej poprzez wielopunktowe ważenie przy obliczeniach mobilności płynów oraz zastosowanie zagęszczenia siatki dyskretyzacji do obliczeń nasyceń;
- zadaniu parametrów dyspersji fizycznej (zależnych od kierunku oraz prędkości przepływu) oraz dodaniu ich poprzez rozszerzenie o człon dyspersyjny równania przepływu płynów między blokami.

W ramach pracy wykonano kilka modeli symulacyjnych syntetycznego złoża różniących się od siebie rozdzielczością siatki bloków oraz rozkładami parametrów petrofizycznych. Przy użyciu tych modeli wytestowano zbudowany skrypt. Wyniki uzyskane w trakcie wykonanej pracy pozwalają stwierdzić, że przy użyciu opracowanego skryptu, można poprawnie modelować zjawisko dyspersji fizycznej. Należy jednak pamiętać, że wnioski te oparto na uproszczonych modelach symulacyjnych, a zastosowanie opracowanego skryptu dla modelu rzeczywistej struktury będzie tematem przyszłych prac autora.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt.: *Modelowanie zjawiska mieszania się płynów złożowych z wykorzystaniem programu Petrel (Workflow)* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 20/KZ, nr archiwalny: DK-4100-20/18.

Literatura

- Audigane P., Blunt M.J., 2003. Dual mesh method in upscaling. *Society of Petroleum Engineers*, DOI: 10.2118/79681-MS.
- Azin R., Nusiri A., Entezari A.J., Montazeri G.H., 2008. Investigation of Underground Gas Storage in a Partially Depleted Gas Reservoir. *Society of Petroleum Engineers*, DOI: 10.2118/113588-MS.
- Bijeljic B., Blunt M.J., 2006. A Physically-Based Description of Dispersion in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*, DOI: 10.2118/102869-MS.
- Coats K.H., Whitson C.H., Thomas L.K., 2009. Modeling Conformance as Dispersion. *Society of Petroleum Engineers*, DOI: 10.2118/90390-PA.
- Eclipse Black Oil and Compositional, 2010, firmy GeoQuest Schlumberger.
- Fanchi J.R., 1983. Multidimensional Numerical Dispersion. *Society of Petroleum Engineers*, 23(1): 143–151. DOI: 10.2118/9018-PA.

- Fanchi J.R., Harpole K.J., Bujnowski S.W., 1982. 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.
- Gelhar L.W., Collins M.A., 1971. General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow. *Water Resour. Res.*, 7(6): 1511–1521. DOI: 10.1029/WR007i006p01511.
- Gołabek A., Miłek K., Szott W., 2011a. Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża na PMG i regularnej jego pracy, z udziałem CO₂ jako gazu buforowego. Część I – Konstrukcja i weryfikacja modelu, symulacja procesu wytwarzania buforu magazynu. *Nafta-Gaz*, 3: 153–162.
- Gołabek A., Miłek K., Szott W., 2011b. Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża na PMG i regularnej jego pracy, z udziałem CO₂ jako gazu buforowego. Część II – Symulacyjne prognozy pracy magazynu. *Nafta-Gaz*, 4: 240–248.
- Gołabek A., Szott W., 2010. Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża PMG i regularnej jego pracy z udziałem CO₂ jako gazu buforowego. Kraków: Praca statutowa Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Nr zlecenia 51/KZ, nr archiwalny DK-4100-51/10.
- Gołabek A., Szott W., 2015a.: Modyfikacje symulatora złożowego dla potrzeb modelowania zjawisk mieszania się gazów, *Nafta-Gaz*, 3: 177–184.
- Gołabek A., Szott W., 2015b. Trójwymiarowy symulator złożowy umożliwiający modelowanie mieszania się gazów. Kraków: Praca statutowa Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Nr zlecenia 40/KZ, nr archiwalny DK-4100-40/15.
- Gołabek A., Szott W., 2016. Numeryczne modelowanie zjawiska dyspersji fizycznej – modyfikacja pełnowymiarowego symulatora złożowego. *Nafta-Gaz*, 7: 528–533. DOI: 10.18668/NG.2016.07.05.
- Gołabek A., Szott W., 2017. Numeryczne Modelowania zjawiska dyspersji fizycznej –model rzeczywistej struktury. *Nafta-Gaz*, 2: 75–80. DOI: 10.18668/NG.2017.02.01.
- Kreft A., Zuber A., 1978. On the Physical Meaning of the Dispersion Equation and its Solutions for Different Initial and Boundary Conditions. *Chemical Engineering Science*, 33: 1471–1480.
- Li D., 2010. Comparative Simulation Study of water Flood. *Technology Interface Journal*, 10(3): 158–167. DOI:10.2118/88459-MS.
- Miłek K., Szott W., Gołabek A., 2013.: Symulacyjne badanie procesów wypierania metanu rozpuszczonego w wodach złożowych poprzez zatłaczanie gazów kwaśnych w ramach ich sekwestracji. *Nafta-Gaz*, 2: 112–121.
- Peaceman D.W., 1977. Fundamentals of numerical reservoir simulation. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Perkins T.K., Johnston O.C., 1963. A review of Diffusion and Dispersion in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/480-PA.
- Redlich O., Kwong J.N.S., 1949. On the Thermodynamics of Solutions. V An Equation of state. Fugacities of Gaseous Solutions. *Chem. Rev.*, 44: 223–244. DOI: 10.1021/cr60137a013.
- Reid R.C., Prausnitz J.M., Polling B.E., 1987. The Properties of Gases and Liquids. New York, USA, McGraw-Hill. ISBN 0-444-41578-5.
- Shrivastava V.K., Nghiem L.X., Okazawa T., 2005. Modeling Physical in Miscible Displacement – Part 1: Theory and the Proposed Numerical Scheme. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 44(5): 25–33.
- Soave G., 1972. Equalibrium Constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chemical Engineering Science*, 27: 1197–1203.
- Szott W., 2010. Zastosowanie symulacji komputerowych do modelowania pracy podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Nafta-Gaz*, 5: 339–344.
- Szott W. i zespół, 2012. Modelowanie symulacyjne PMG Wierchowice dla określenia charakterystyk pracy magazynu i wspomaganie jego zarządzaniem w sezonie 2012/2013. Kraków: Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego. Nr zlecenia 743/KZ, nr archiwalnyDK-4100-262/12.
- Szott W., Gołabek A., 2014. Symulacyjne modelowanie procesów mieszania się gazów w warunkach złożowych. *Nafta-Gaz*, 3: 151–161.
- Tood M.R., O'Dell P.M., Hirsaki G.J., 1972. Methods for Increased Accuracy in Numerical Reservoir Simulators. SPE-3516-PA, DOI: 10.2118/3516-PA.
- Vitousek S., Fringer O., 2011: Physical vs. numerical dispersion in nonhydrostatic ocean modeling. *Ocean Modelling*, 40: 72–86. DOI: 10.1016/j.ocemod.2011.07.002.



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