

Wiesław Szott, Andrzej Gołąbek
Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno

Symulacje procesów eksploatacji złóż naftowych z zastosowaniem sterowania sprzężeniem zwrotnym.

Część II. Sterowanie procesami złożowymi

Wstęp

W praktyce stosowania symulacyjnych modeli złożowych do prognozowania pracy złóż naftowych i przebiegu zachodzących w nich procesów złożowych stosunkowo często napotyka się na problemy związane z optymalizacją ich efektywności dla określonych warunków i ograniczeń eksploatacyjnych narzuconych przez inwestora lub operatora złoża. Przykładem może być złożowy proces konwersji częściowo wyeksploatowanego złoża gazu ziemnego na podziemny magazyn gazu (PMG), obejmujący wytwarzanie poduszki gazu buforowego.

Do niedawna standardowo dostępne symulatory złożowe nie umożliwiały autentycznego i efektywnego sterowania takim procesem. Używano wówczas nieefektywnych metod sterowania ręcznego.

Obecnie w ramach symulatorów złożowych pojawiły się dodatkowe mechanizmy sterowania procesem symulacji o charakterze sprzężenia zwrotnego, wykorzystujące możliwości definiowania w trakcie symulacji wielkości po-

chodnych od standardowo używanych (takich jak ciśnienie, wydajności wydobywania itp.) oraz ich użycia do warunków realizacji działań sterujących procesem eksploatacji [2].

W niniejszej pracy przeanalizowano trzy typowe przykłady wykorzystania mechanizmów sterowania eksploatacją poprzez sprzężenie zwrotne wielkościami opisującymi jej przebieg. Przedstawiono także rozwiązania omawianych problemów na przykładach realistycznych modeli symulacyjnych złóż krajowych oraz uzyskane w ich ramach wyniki.

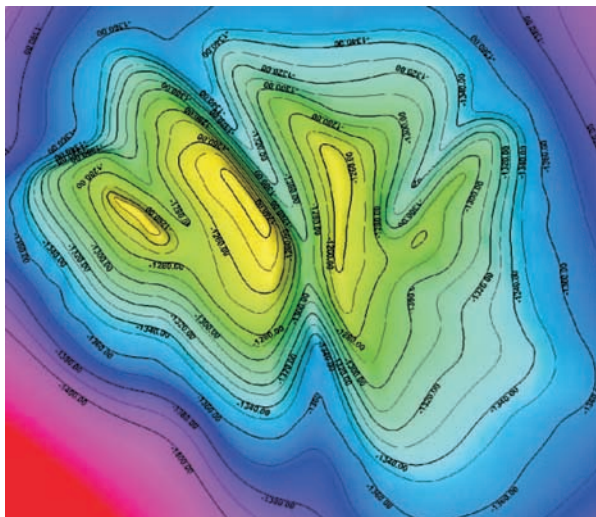
Obliczenia symulacyjne wykonano przy użyciu symulatorów pakietu ECLIPSE [1].

Praca składa się z dwóch części: część I – *Sterowanie eksploatacją złóż i PMG* [3] oraz część II – *Sterowanie procesami złożowymi*. W niniejszej, drugiej części pracy przedstawiono sposób wykorzystania mechanizmów sprzężenia zwrotnego do sterowania przebiegu symulacji procesów złożowych.

Sterowanie procesem wytwarzania PMG

Szczególnym problemem, do którego rozwiązania użyto metody sprzężenia zwrotnego, jest problem dotyczący sterowania migracją zatłaczanego gazu buforowego w trakcie wytwarzania PMG. Problem ten pojawił się podczas realizacji pracy [2]. Modelowane w wymienionej pracy wyeksploatowane złożo gazu ziemnego jest w naturalny sposób podzielone na dwie części strefą dyslokacyjną (rysunek 1).

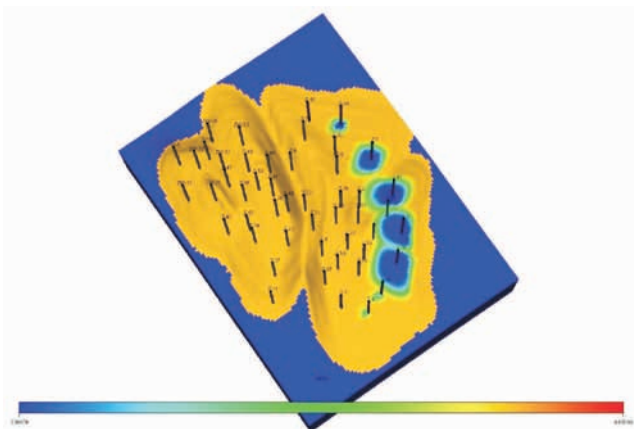
Podczas modelowania procesu konwersji tego złoża na PMG stwierdzono, że najkorzystniejsze dla późniejszej jego pracy będzie równomierne umieszczenie gazu buforowego w jednej z wymienionych wyżej części struktury, tj. części wschodniej. Aby zapewnić równomierne wypełnienie wybranej części struktury, należało w tym przypadku wykonać wielokrotne powtórzenie symulacji, w której ręcznie, w zależności od obserwowanych wyników, modyfikowano



Rys. 1. Mapa stropu struktury PMG

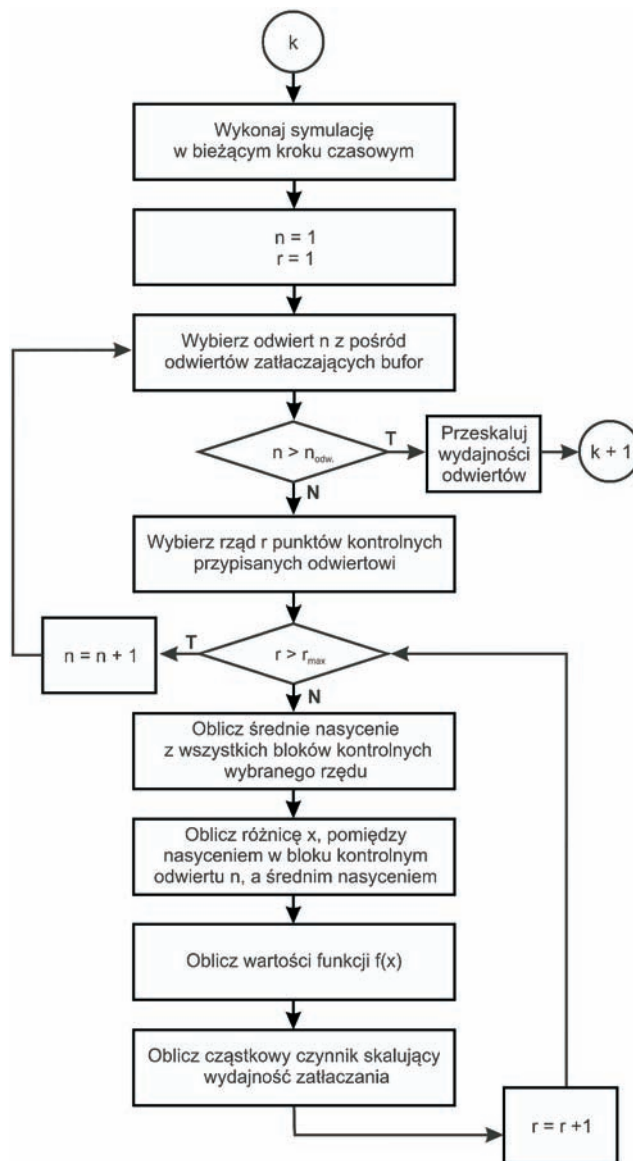
zmienne w czasie udziały w zatłaczaniu gazu buforowego (CO_2) poprzez poszczególne odwierty. Ponieważ tego typu iteracyjny proces wytwarzania bufora pochłania bardzo wiele czasu, dlatego w ramach niniejszej pracy podjęto próbę jego zautomatyzowania przy użyciu, niedawno udostępnionych w symulatorach ECLIPSE, mechanizmów sprzężenia zwrotnego.

Do rozwiązania wyżej wymienionego problemu wykorzystano model symulacyjny wraz z niektórymi założeniami dotyczącymi wytwarzania poduszki buforowej, wykonany w ramach wcześniej wymienionej pracy. Wykorzystane założenia dotyczą wydajności dozwolonych odwiertów zatłaczających ($n_{odw.}$ spośród odwiertów zlokalizowanych w części wschodniej struktury) – rysunek 2 oraz rodzaju i objętości bufora ($5 \text{ mld m}^3 \text{ CO}_2$). Czas zatłoczenia zadanej ilości gazu buforowego nie został określony w celu zmniejszenia ilości parametrów ograniczających opracowaną metodę. Ostatnim założeniem wykorzystanym w tej części opracowania są coroczne 14-dniowe „stójki” w zatłaczaniu gazu buforowego.



Rys. 2. Rozmieszczenie odwiertów zatłaczających CO_2

Ogólny schemat rozwiązania dotyczącego wytwarzania poduszki buforowej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat procedury sterowania procesem wytwarzania bufora PMG

W pierwszym kroku automatyzacji procesu wytwarzania poduszki buforowej określono limit na sumaryczną ilość dwutlenku węgla zatłoczonego do struktury. Ustawienie takiego limitu jest konieczne z powodu braku ograniczenia czasowego. Omawiany limit określono przy pomocy instrukcji warunkowej, przedstawionej poniżej w akcji o nazwie ACTFIELD:

```

ACTIONX
ACTFIELD 1 /
FGIT >= 5000000000.0 /
/
GCONINJE
    
```

```
,Z8' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z26' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z30' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z36' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z41' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z43' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
,Z51' ,GAS' ,RATE' 0.0 3* ,YES' /
NEXTSTEP
1.0
/
END
ENDACTIO
```

Przedstawiona akcja w każdym kroku czasowym symulacji sprawdza ile gazu zatłoczono do struktury. Jeżeli sumaryczna ilość zatłoczonego gazu przekroczy 5 mld m³, to zostanie wywołane działanie przypisujące wszystkim odwiertom zatłaczającym gaz buforowy zerową wydajność i w następnym kroku symulacja zostanie zakończona. Takie podejście umożliwia swobodne modyfikowanie wydajności zatłaczania poszczególnych odwiertów.

W kolejnym kroku rozwiązywania omawianego problemu założono, że po to, aby wschodnia część struktury, do której zatłaczany jest gaz buforowy, została równomiernie wypełniona, wydajności zatłaczania odwiertów muszą być uzależnione od szybkości migracji zatłaczanego CO₂ obserwowanej w granicznym obszarze wypełnianej struktury. W tym celu w części wschodniej struktury wybrano kilka punktów kontrolnych (bloków modelu), w których sprawdzane będzie nasycenie dwutlenkiem węgla. W pierwszym podejściu wybrano po jednym punkcie kontrolnym na odwiert, co oznaczało, że wydajność zatłaczania gazu przez konkretny odwiert uzależniona była od nasycenia dwutlenkiem węgla jednego konkretnego bloku. Zależność ta polegała na tym, że wydajności zatłaczania odwiertów były zwiększane/zmniejszane, jeśli nasycenie CO₂ w przypisanych do nich blokach (punktach kontrolnych) było niższe/wyższe od średniej arytmetycznej wyliczonej z nasyceń CO₂ wszystkich wybranych punktów kontrolnych. Ponieważ wymieniona wyżej różnica może być inna w każdym kroku czasowym, dlatego nie można przyjąć stałego czynnika skalującego wydajności wszystkich odwiertów zatłaczających. Jeśli zmiana nasycenia w konkretnym bloku kontrolnym jest niewielka to zmiana wydajności tego odwiertu również powinna być mała. W celu uzyskania takiego efektu założono, że zmiana wydajności każdego odwiertu biorącego udział w zatłaczaniu uzależniona jest od funkcji $f()$, której argumentem w danej chwili czasowej symulacji jest różnica pomiędzy nasyceniem CO₂ w jego bloku kontrolnym

a średnią arytmetyczną bloków kontrolnych wszystkich odwiertów. Poniżej przedstawiono zbiór instrukcji, za pomocą których wyliczana jest wydajność jednego z odwiertów zatłaczających: W-1:

```
UDQ
ASSIGN FUDZW1 150000.00 /
DEFINE FUSUM1 BYMF_3 37 105 1 + BYMF_3 47 102 1 + BYMF_3 56 90 1 + BYMF_3 64 85 1 /
DEFINE FUSUM2 BYMF_3 67 75 1 + BYMF_3 69 57 1 + BYMF_3 71 42 1 /
DEFINE FUAVE1 (FUSUM1 + FUSUM2) / 7 /
ASSIGN FUWSPA -0.03 /
ASSIGN FUWSPB 0.03 /
DEFINE FUW1 BYMF_3 69 57 1 - FUAVE1 /
DEFINE FUFUW1 1 - (FUWSPA * FUW1 * FUW1 * FUW1 + FUWSPB * FUW1) /
DEFINE FUDKW1 FUFUW1 * FUDZW1 /
/
```

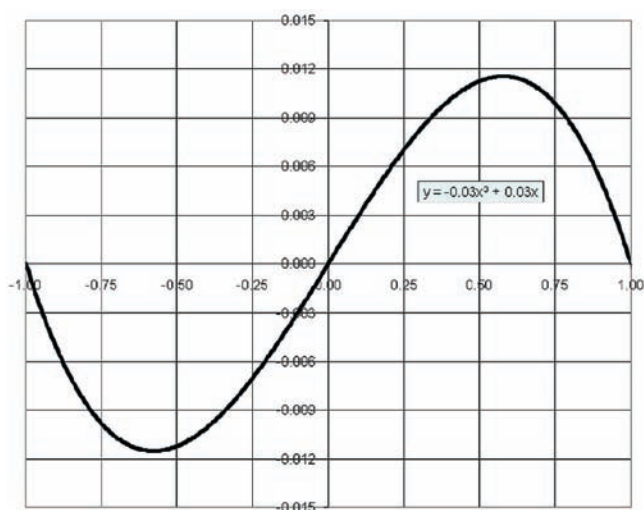
Jak widać w przedstawionym kodzie, wydajności zatłaczania gazu buforowego liczone są przy pomocy odpowiednio zadeklarowanych zmiennych użytkownika. W pierwszej instrukcji omawianego kodu zadeklarowano początkową wartość wydajności zatłaczania odwiertu W-1 (FUDZW1). Wszystkim odwiertom biorącym udział w zatłaczaniu buforu do magazynu przypisano początkową wydajność zatłaczania równą 150 tys. m³/d, co odpowiada dokładnie połowie ich wydajności dozwolonych. Tak ustalone wydajności początkowe umożliwiają symulatorowi już od pierwszych kroków czasowych symulacji modyfikowanie wydajności odwiertów w obu kierunkach (zmniejszanie i zwiększanie). Kolejne trzy instrukcje dotyczą obliczania zmiennej w czasie średniej arytmetycznej z nasyceń CO₂ we wszystkich zadeklarowanych blokach kontrolnych. Zadeklarowane zmienne FUSUM1 i FUSUM2 dotyczą obliczenia częściowych sum nasyceń w wybranych blokach kontrolnych (BYMF_mIJK, gdzie: m = 3 to numer składnika odpowiadającego CO₂, a IJK – to współrzędne bloków kontrolnych w modelu). Zmienna FUAVE1 natomiast przyjmuje wartość wyliczonej średniej arytmetycznej z nasyceń siedmiu wybranych bloków kontrolnych. Kolejne dwie instrukcje dotyczą deklaracji stałych współczynników w równaniu funkcji $f()$ postaci:

$$f(x) = Ax^3 + Bx$$

gdzie przyjęto FUWSPA = A, FUWSPB = B.

Przedstawioną postać funkcji, od której zależy zmiana wydajności zatłaczania odwiertów, użyto po przeprowa-

zeniu analizy wyników kilku symulacji, różniących się od siebie zarówno postacią funkcji $f()$, jak i zakresem zmian jej wartości. Użyta w metodzie funkcja, której wykres przedstawiono na rysunku 4, charakteryzuje się własnościami umożliwiającymi skalowanie (zmniejszanie bądź zwiększanie) wydajności zatłaczania, uwzględniając fakt opóźnienia efektów zmiany tych wydajności.



Rys. 4. Wykres funkcji $f()$

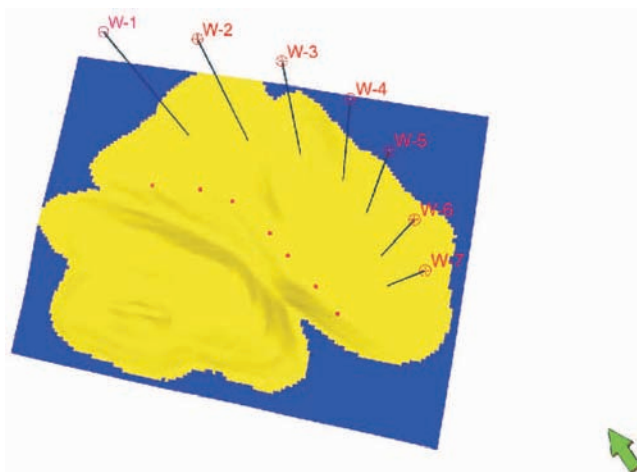
W opracowanej metodzie, rozwiązującej przedstawiony wcześniej problem, wydajności zatłaczania wszystkich odwiertów biorących udział w zatłaczaniu buforu liczone są w każdym kroku czasowym symulacji. Początkowe nasycenie CO_2 wynosi 0,0 we wszystkich wybranych blokach kontrolnych. Jeśli w czasie zatłaczania gazu buforowego nasycenie w którymś bloku kontrolnym zacznie się zwiększać to wydajność zatłaczania odwiertu przypisanego do niego będzie z każdym krokiem symulacji coraz bardziej zmniejszana. Z czasem, gdy różnica pomiędzy nasyceniem dwutlenku węgla w omawianym bloku a średnią z nasycień wszystkich bloków kontrolnych będzie nadal się zwiększać, zmniejszanie wydajności zatłaczania odwiertu przyporządkowanemu temu blokowi będzie przebiegać coraz wolniej. Pozostałe odwierty natomiast początkowo z każdym kolejnym krokiem symulacji będą pracować z coraz większymi wydajnościami, a gdy różnica pomiędzy nasyceniami dwutlenkiem węgla w blokach kontrolnych przypisanych tym odwiertom a średnim nasyceniem wyliczonym z wszystkich bloków kontrolnych będzie większa od wartości $-0,6$ to zwiększanie wydajności zatłaczania tym odwiertom będzie przebiegać w coraz wolniejszym tempie. Takie podejście pozwala uwzględnić opóźnienie efektów zmiany wydajności. Odległość pomiędzy odwiertem a punktem kontrolnym do niego przyporządkowanym

sprawia, że musi minąć trochę czasu, aby zwiększona w danym odwiercie wydajność zatłaczania wpłynęła na zwiększenie nasycenia CO_2 w przypisanym do niego bloku kontrolnym. Wartości współczynników A i B omówionej funkcji $f()$ dobrano tak, aby maksymalne zmiany wydajności w każdym kroku czasowym symulacji kształtowały się na poziomie 1%. Wybranie wyższych wartości omawianych współczynników powodowało nagle zmiany wydajności zatłaczania, czyniąc opracowaną metodę nieefektywną. Kolejną zmienną zdefiniowaną w omawianym kodzie jest zmienna o nazwie FUFUW1, która reprezentuje wartość różnicy pomiędzy nasyceniem CO_2 w bloku kontrolnym, przypisanym odwiertowi W-1 (BYMF_3 69 57 1) a średnią wyliczoną z nasycień dwutlenkiem węgla wszystkich bloków kontrolnych. Po wyliczeniu tej różnicy, przy użyciu następnego zmiennego FUFUW1, wyliczana jest wartość czynnika skalującego wydajność zatłaczania dwutlenku węgla przez odwiert W-1, która jest uzależniona od wartości funkcji $f()$:

$$\text{FUFUW1} = 1 - f(\text{FUFUW1})$$

Ostatnią instrukcją zamieszczoną w omawianym kodzie jest instrukcja definiująca wydajność zatłaczania gazu buforowego przez odwiert W-1. Nowa wydajność zatłaczania dwutlenku węgla przykładowego (FUDKW1) odwiertu jest równa iloczynowi jego aktualnej wydajności zatłaczania (FUDZW1) i czynnika skalującego, wyliczonego w podany wyżej sposób (FUFUW1).

W pierwszym podejściu rozwiązywania omawianego problemu wybrano po jednym punkcie kontrolnym dla każdego z odwiertów zatłaczających gaz buforowy. Na rysunku 5 przedstawiono rozmieszczenie tych punktów kontrolnych, w których sprawdzane jest nasycenie CO_2 . Wybrane bloki kontrolne zaznaczono na rysunku kolo-



Rys. 5. Wybrane punkty kontrolne. Wariant I

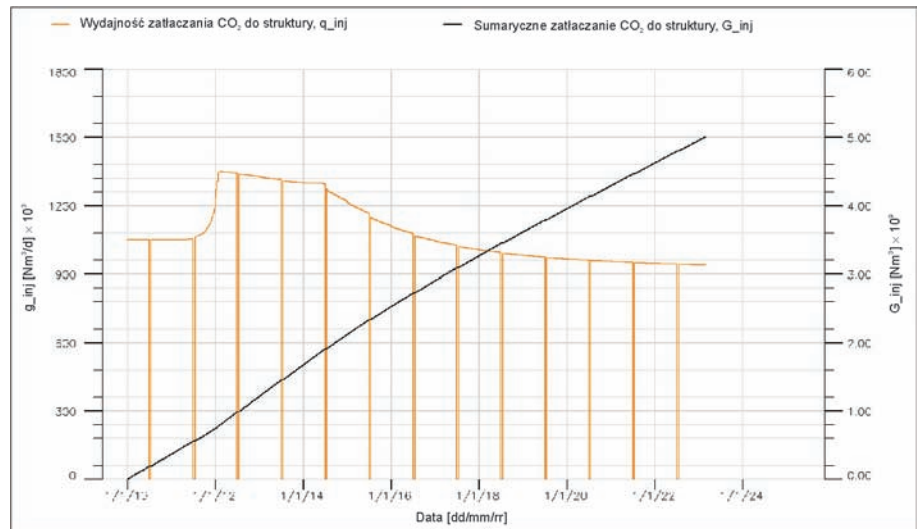
rem czerwonym. Zaznaczone bloki przypisane są kolejno poszczególnym odwiertom, tzn. pierwszy od lewej przypisany jest do odwiertu W-1 a pierwszy blok od prawej – do odwiertu W-7.

Przedstawione na rysunku bloki kontrolne w omawianym podejściu zlokalizowano wzdłuż szczytu części wschodniej struktury w taki sposób, aby znajdowały się one na kierunku migracji zatłaczanego dwutlenku węgla. Symulację z tak dobranymi punktami kontrolnymi nazwano wariantem I, a jej wyniki przedstawiono na rysunkach 6–9. Na pierwszym z wymienionych rysunków widać, że założony limit na zatłaczanie sumaryczne gazu do struktury został zachowany i pod koniec lutego 2023 roku symulacja została zakończona.

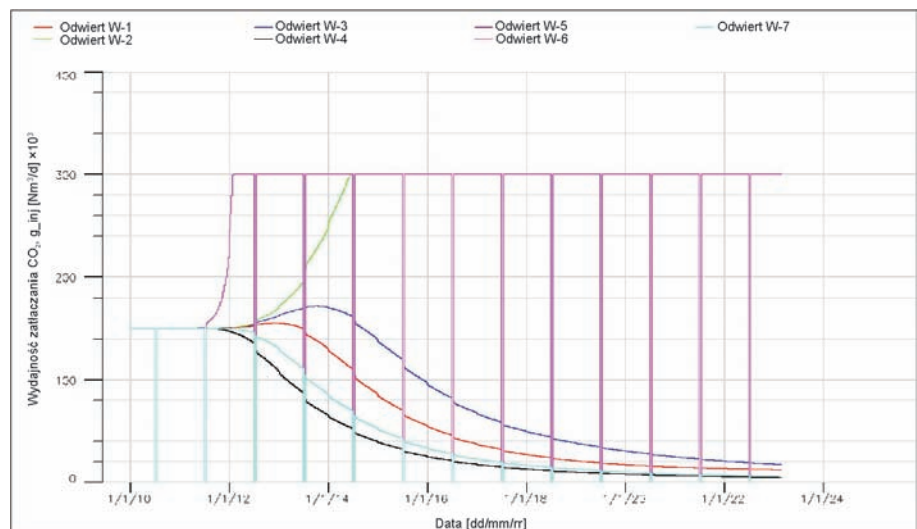
Na rysunku 7 przedstawiono zmianę w czasie wydajności zatłaczania wszystkich odwiertów, będącą reakcją na zmiany nasyceń CO_2 w punktach kontrolnych – rysunek 8.

Na rysunku 9 pokazano jak użycie omawianej metody wpłynęło na końcowy rozkład nasyceń CO_2 w strukturze. Kolor żółty reprezentuje nasyceń metanem w poszczególnych blokach modelu; kolor niebieski, znajdujący się na obrzeżach struktury – nasyceń wodą, a kolor niebieski, znajdujący się w obrębie pułapki złożowej – zatłoczony gaz buforowy (CO_2).

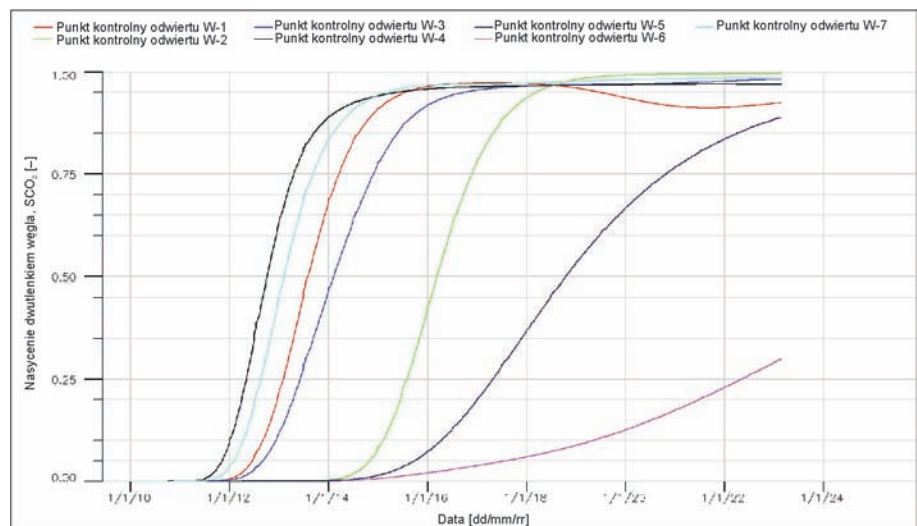
Jak widać, gaz zatłoczony do wschodniej części struktury przedostał się do części zachodniej. Wynika to z dużej ilości gazu buforowego zatłoczonego do struktury oraz różnicy ciśnień panujących w obu częściach omawianej struktury. Problem ten został szczegółowo omówiony w wyżej wymienionej pracy dotyczącej modelowania



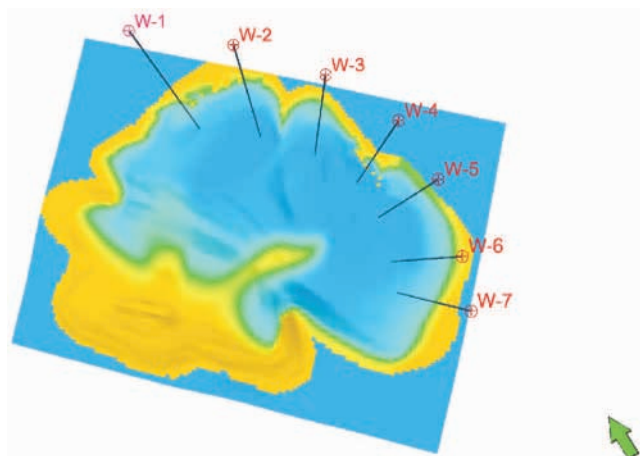
Rys. 6. Wydajność zatłaczania i sumaryczne zatłoczenie gazu buforowego. Wariant I



Rys. 7. Wydajność zatłaczania gazu buforowego przez poszczególne odwierty. Wariant I

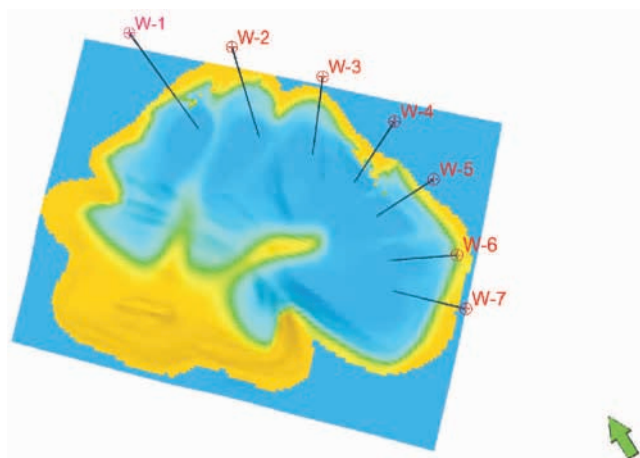


Rys. 8. Nasyceń CO_2 w blokach kontrolnych odwiertów. Wariant I



Rys. 9. Zatloczony bufor dwutlenku węgla. Wariant I

konwersji wybranego złoża na PMG. Natomiast rozwiązaniem problemu postawionego w niniejszej pracy jest jak najbardziej równomierne wypełnienie części wschodniej struktury oraz zatlaczenie buforu w taki sposób, aby front CO_2 przedostający się do części zachodniej struktury zajmował jak najmniejszą jej objętość i rozprzestrzenił się w sposób równomierny. Na omawianym rysunku widać, że w wariancie I nie uzyskano satysfakcjonującego rozwiązania. Jednak w porównaniu do wyników symulacji, w której odwierty zatlaczały bufor do struktury ze stałymi wydajnościami (wariant 0 – rysunek 10), wschodnia część struktury została wypełniona w sposób bardziej równomierny, zwłaszcza w obszarze zasilanym przez odwierty W-1 i W-2. Natomiast kształt frontu dwutlenku węgla przedostającego się do części zachodniej struktury został nieznacznie poprawiony.

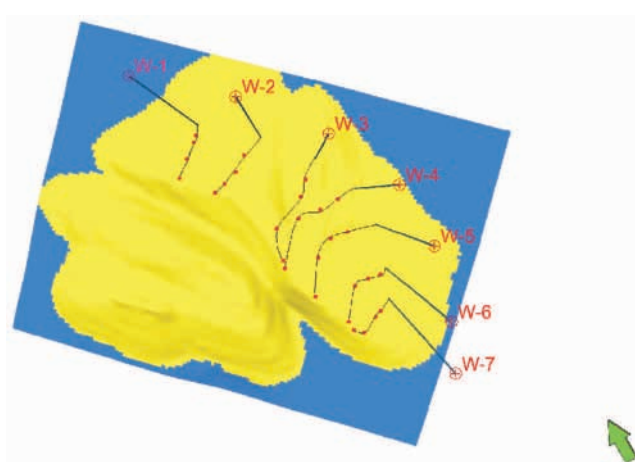


Rys. 10. Zatloczony bufor dwutlenku węgla. Wariant 0

Na postawie przedstawionych wyników należy stwierdzić, że opracowana metoda, która uzależnia pracę odwiertów zatlaczających od nasyceń w wybranych punktach

kontrolnych, działa poprawnie, lecz ilość lub lokalizacja wybranych punktów kontrolnych nie pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów.

W celu poprawienia powyższych wyników przeprowadzono kilka symulacji, w których modyfikowano położenie oraz ilość bloków kontrolnych przyporządkowanych do poszczególnych odwiertów zatlaczających. Najlepsze wyniki uzyskano w symulacji, w której każdemu odwiertowi zatlaczającemu gaz buforowy przypisano po cztery bloki kontrolne. Na rysunku 11 pokazano bloki kontrolne wybrane do symulacji wariantu II – połączono je liniami z odwiertami, do których zostały przypisane.



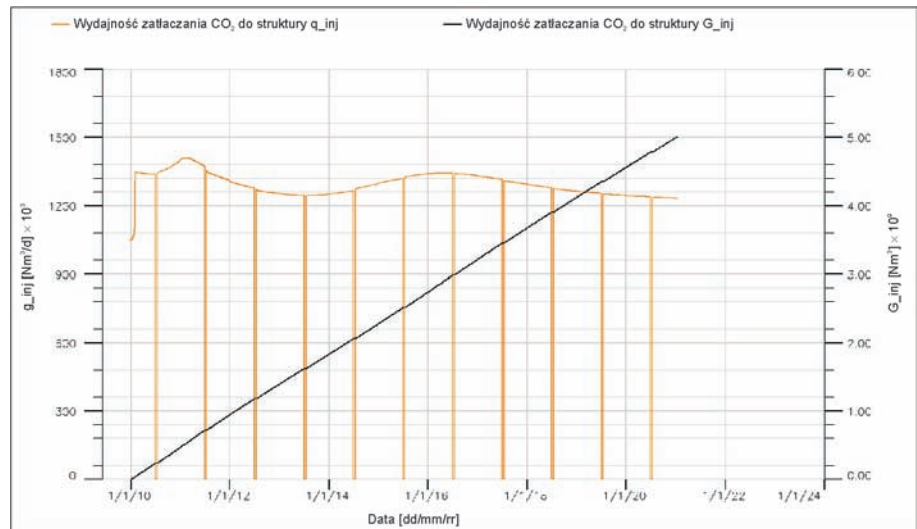
Rys. 11. Wybrane punkty kontrolne. Wariant II

Podczas doboru lokalizacji oraz ilości punktów kontrolnych brano pod uwagę kierunek migracji gazu zatlaczonego przez poszczególne odwierty. Po przeanalizowaniu pracy odwiertów w wariancie I zauważono, że odwierty W-5, 6 i 7 odpowiedzialne są za nadmierne przedostawanie się zatlaczonego gazu do zachodniej części struktury od strony południowej. Dlatego bloki kontrolne odpowiedzialne za późniejszą pracę tych odwiertów znajdują się w bliskiej odległości od siebie. Dotyczy to w szczególności odwiertów W-6 i W-7. Natomiast punkty kontrolne dla odwiertów W-3 i W-4 dobrane zostały tak, aby zwiększyć możliwość wypełnienia luki widocznej na rysunku 8, w której w wariancie I znajduje się gaz rodzimy nie wyparty przez dwutlenek węgla. Dla pozostałych dwóch odwiertów zatlaczających (W-1 i W-2) punkty kontrolne dobrane zgodnie z występującą w ich rejonie prostopadłą migracją gazu w kierunku części zachodniej struktury. Dobranie większej ilości punktów kontrolnych spowodowało wprowadzenie kilku modyfikacji w omówionym wcześniej kodzie, który dotyczył opracowanej metody sterowania wydajnościami odwiertów zatlaczających. W omawianym wariancie każ-

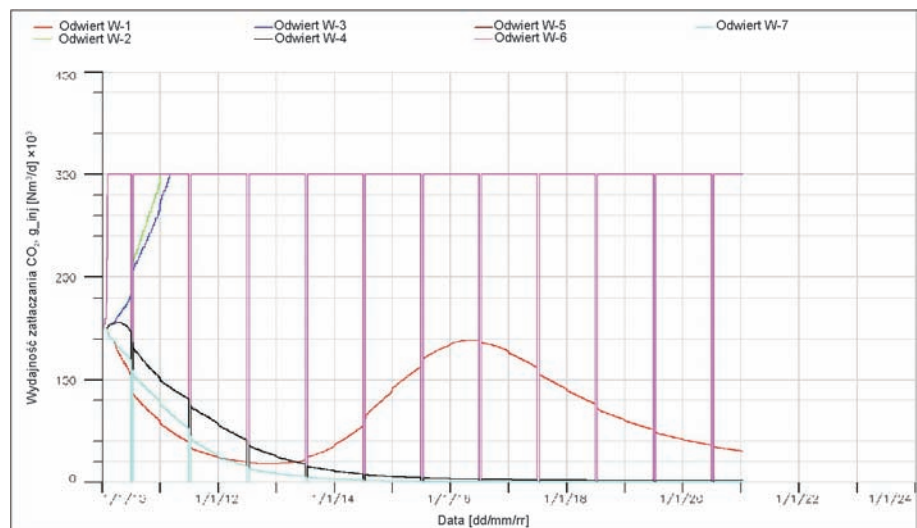
demu odwiertowi przypisano po cztery bloki kontrolne ($r_{max} = 4$), w których sprawdzane jest nasycenie gazem zatłaczanym (CO_2), dlatego wybrane bloki kontrolne podzielono w symulacji na cztery rzędy. Bloki kontrolne znajdujące się najbliżej odwiertów należą do rzędu pierwszego, a zlokalizowane najdalej odwiertów – czwartego. Podobnie jak w wariancie I liczona jest różnica pomiędzy nasyceniem CO_2 w bloku kontrolnym przypisanym do danego odwiertu a średnią nasycień pozostałych bloków, należących do tego samego rzędu. W każdym kroku symulacji liczone są takie różnice dla wszystkich wybranych bloków kontrolnych, a zmiana wydajności zatłaczania danego odwiertu zależy od nasycień wszystkich czterech bloków kontrolnych przypisanych do niego. Podobnie jak w wariancie I, w omawianym wariancie zmiana wydajności nie zależy bezpośrednio od wartości obliczonych wcześniej różnic, lecz od wartości funkcji $f()$, której argumentami są obliczone wartości różnic. Natomiast czynnik skalujący wydajność zatłaczania CO_2 do danego odwiertu w omawianym wariancie II jest iloczynem cząstkowych czynników skalujących obliczonych w każdym rzędzie punktów kontrolnych. Cząstkowe czynniki skalujące obliczane są w obrębie swojego rzędu według wzoru zastosowanego w wariancie I dla odwiertu W-1:

$$\begin{aligned} \text{FUFUW11} &= 1 - f(\text{FUW11}) \\ \text{FUFUW12} &= 1 - f(\text{FUW12}) \\ \text{FUFUW13} &= 1 - f(\text{FUW13}) \\ \text{FUFUW14} &= 1 - f(\text{FUW14}) \end{aligned}$$

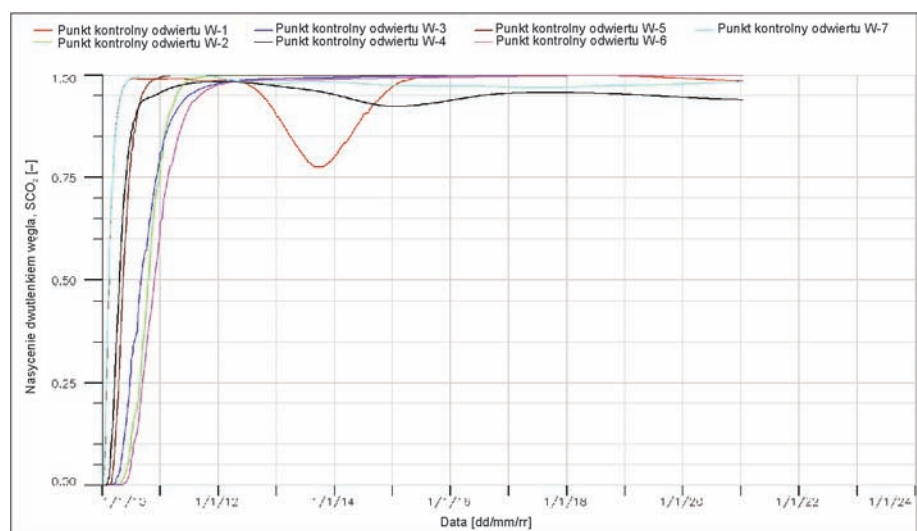
Przeskalowana wydajność zatłaczania CO_2 dla odwiertu W-1 jest obliczona ze wzoru:



Rys. 12. Wydajność zatłaczania i sumaryczne zatłoczenie gazu buforowego. Wariant II



Rys. 13. Wydajność zatłaczania gazu buforowego przez poszczególne odwierty. Wariant II

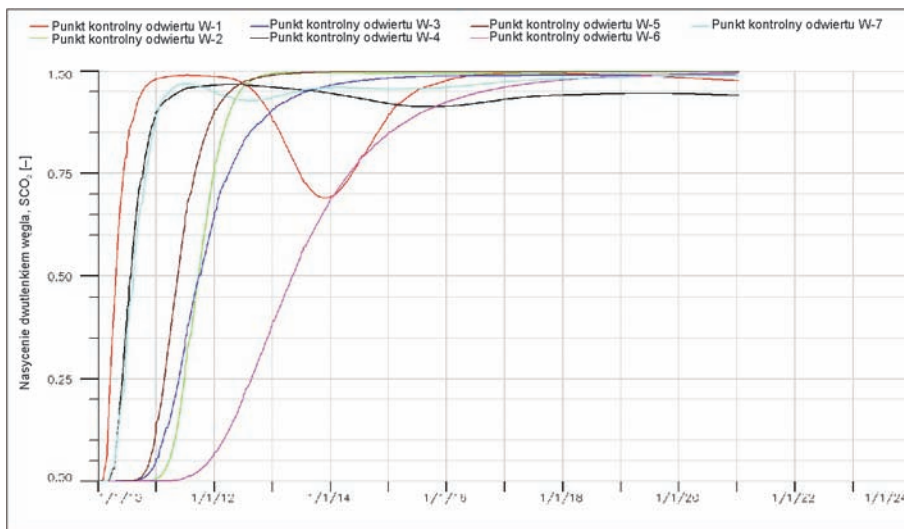


Rys. 14. Nasycenie CO_2 w blokach kontrolnych odwiertów – rząd pierwszy. Wariant II

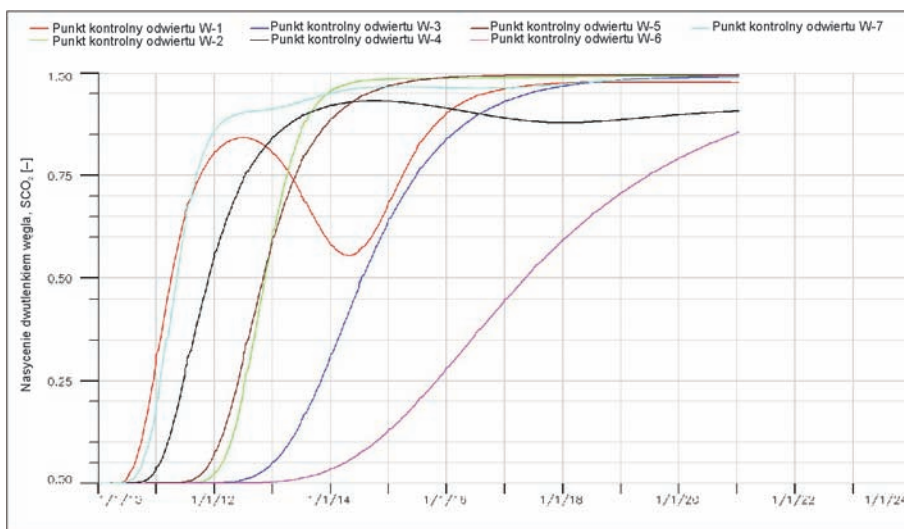
$$FUDKW1 = FUDZW1 * FU- \\ FUFUW11 * FUFUW12 * FU- \\ FUFUW13 * FUFUW14.$$

W wyżej przedstawionych równaniach zmienne FUFUW11, 12, 13 i 14 odpowiadają kolejno obliczanym cząstkowym czynnikom skalującym. Zmienne FUFUW11, 12, 13, 14 natomiast reprezentują obliczone różnice w obrębie każdego z rzędów. Dzięki takiemu rozwiązaniu wydajności zatłaczania poszczególnych odwiertów będą zmieniane częściej niż w wariantcie I i, jeśli będzie to konieczne, zmiany te będą gwałtowniejsze. Na przykład, jeśli w pierwszym bloku kontrolnym danego odwiertu zacznie przyrastać nasycenie CO₂ to wydajność zatłaczania tego odwiertu będzie zmniejszana. W późniejszym czasie, jeśli front dwutlenku węgla dotrze do drugiego punktu kontrolnego przypisanego do tego odwiertu, wydajność zatłaczania tego odwiertu będzie zmniejszana jeszcze gwałtowniej.

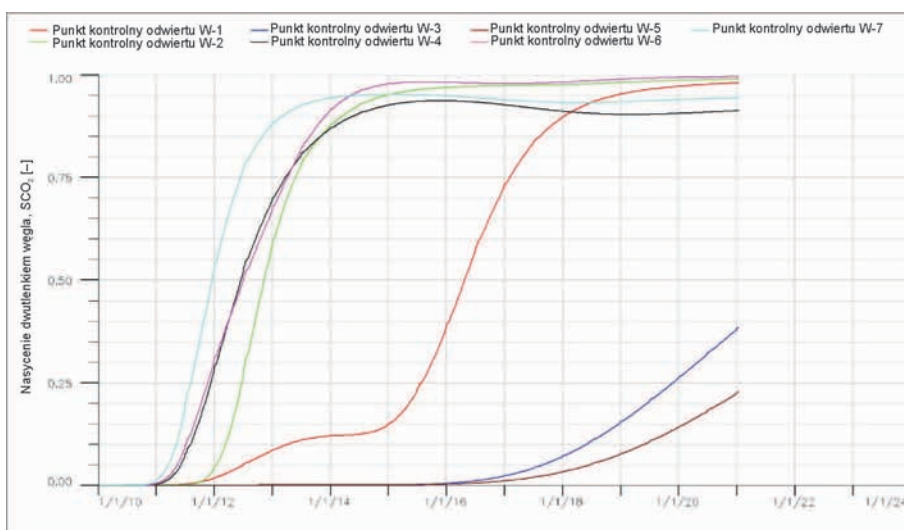
Wyniki dla wariantu II uwzględniającego omówione wyżej zmiany przedstawiono na rysunkach 12–18. Pierwszy z przedstawionych rysunków dotyczy całkowitej wydajności zatłaczania i sumarycznego zatłoczenia dwutlenku węgla do struktury. Na omawianym rysunku widać, że w porównaniu z wariantem I bufor w ilości 5,0 mld m³_n został zatłoczony do omawianej struktury o około 2 lata szybciej. Wiąże się to z tym, że w wariantcie II praktycznie przez cały okres symulacji bufor CO₂ zatłaczany był z większymi wydajnościami niż w wariantcie I. Wprowadzenie większej ilości punktów kontrolnych spowodowało, że symulator zmieniał wydajności zatłaczania poszczególnych odwiertów prak-



Rys. 15. Nasycenie CO₂ w blokach kontrolnych odwiertów – rząd drugi. Wariant II

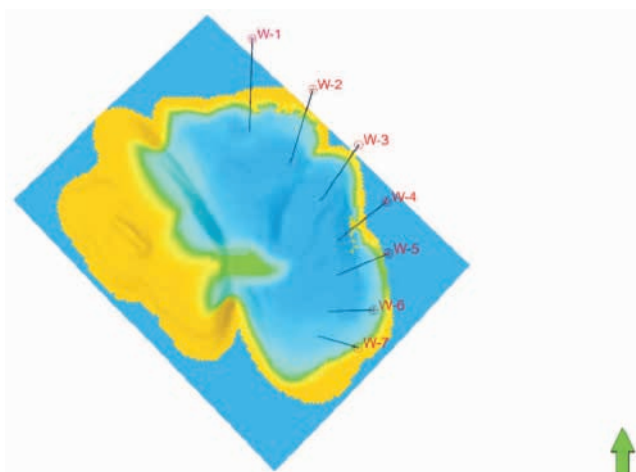


Rys. 16. Nasycenie CO₂ w blokach kontrolnych odwiertów – rząd trzeci. Wariant II



Rys. 17. Nasycenie CO₂ w blokach kontrolnych odwiertów – rząd czwarty. Wariant II

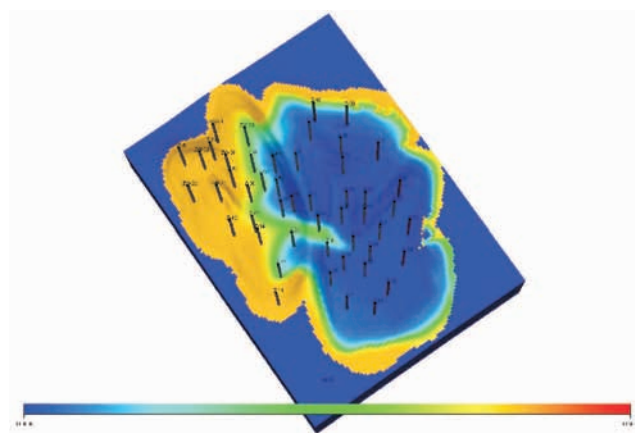
tycznie od samego początku symulacji (rysunek 13). W wariantcie I natomiast przez pierwsze półtora roku odwierty zatłaczały ze stałą zadaną początkową wydajnością. Również zmiany nasycień w punktach kontrolnych zachodziły gwałtowniej (rysunki 14–17).



Rys. 18. Zatloczony bufor dwutlenku węgla. Wariant II

Zrealizowanie wariantu II doprowadziło do lepszego niż w wariantcie I rozkładu nasycenia CO_2 w strukturze. Na rysunku 18, przedstawiającym omawiany rozkład, widać, że w porównaniu do wariantu I uzyskano zarówno lepsze wypełnienie zachodniej części struktury, jak również bardziej równomierny kształt frontu dwutlenku węgla, który

przedostał się do części zachodniej struktury. Zarówno podczas wykonywania symulacji, w których ręcznie dobierano wydajności poszczególnych odwiertów (rysunek 19), jak i przy użyciu opracowanej metody, nie udało się uzyskać idealnego wypełnienia części wschodniej struktury. Wiąże się to z występującymi w strukturze strefami o gorszych właściwościach złożowych. Wyniki uzyskane przy użyciu mechanizmów sprzężenia zwrotnego są bardzo zbliżone do wyników uzyskanych po wielokrotnych powtórzeniach symulacji metodą iteracyjną, dlatego należy stwierdzić, że opracowana metoda sterowania procesem wytwarzania PMG jest efektywna i pozwala zaoszczędzić wiele pracy.



Rys. 19. Zatloczony bufor dwutlenku węgla. Wariant z ręcznym sterowaniem

Podsumowanie i wnioski

W pracy sformułowano zagadnienia z zakresu szeroko pojętej symulacji procesów eksploatacji złóż naftowych i podziemnych magazynów gazu wymagających zastosowania sterowania z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego. Do zagadnień tych zaliczono:

- sterowanie równoczesnym wydobywaniem ropy naftowej i gazu ziemnego ze złoża ropno-gazowego,
- sterowanie odbiorem gazu ziemnego z podziemnych magazynów gazu, zapewniającym uzyskanie gazu o określonej jakości,
- sterowanie procesem wytwarzania podziemnych magazynów gazu pod kątem wytworzenia optymalnego buforu z gazu niewęglowodorowego.

W II części pracy przedstawiono ostatnie z wymienionych zagadnień. Powyższe zagadnienia analizowano na przykładzie faktycznych złóż krajowych. Do ich

rozwiązania zastosowano najnowsze opcje i możliwości symulatorów złożowych. W szczególności wykorzystano możliwości definiowania wielkości pomocniczych, wykonywania na nich operacji logiczno-arytmetycznych i ich używania do sterowania procesami złożowymi w schemacie sprzężenia zwrotnego. Wielkości te pozwoliły określić zmiany istotnych parametrów kontrolnych, ich odstępstwo od zadanych warunków eksploatacji oraz ilościowe modyfikacje wielkości bezpośrednio odpowiedzialnych za symulowany proces.

Możliwość wielokrotnego użycia powyższego schematu pozwoliła w efektywny sposób zrealizować sterowanie ze sprzężeniem zwrotnym, a w konsekwencji – spełnić złożone warunki eksploatacji złóż i podziemnych magazynów gazu oraz zapewnić optymalny przebieg procesów złożowych.

Literatura

- [1] Eclipse 300 v. 2010.1, firmy GeoQuest (Schlumberger).
 [2] W. Szott i zespół: *Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża na PMG i regularnej jego pracy z udziałem CO₂ jako gazu buforowego*. Praca INiG. Krosno, sierpień 2010.
 [3] W. Szott, A. Gołębek: *Symulacje procesów eksploatacji złóż naftowych z zastosowaniem sterowania sprzężeniem zwrotnym. Część I. Sterowanie eksploatacją złóż i PMG*. „Nafta-Gaz” 2011, s. 892–901.



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.



Mgr inż. Andrzej GOŁĘBEK – absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Od 2008 roku pracownik Zakładu Symulacji Złóż Węglowodorów i PMG Instytutu Nafty i Gazu Oddział Krosno. Zajmuje się różnorodnymi zagadnieniami z zakresu symulacji złóż i informatyki.

ZAKŁAD SYMULACJI ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW I PMG

- sporządzanie ilościowych charakterystyk złóż naftowych (konstruowanie map cyfrowych dla podstawowych wielkości złożowych);
- analizy geostatystyczne dla potrzeb projektowania modeli złóż naftowych, w tym PMG i obliczeń wolumetrycznych wielowymiarowych i wielofazowych;
- konstruowanie kompletnych symulacyjnych modeli złóż;
- wszechstronne badania symulacyjne dla potrzeb:
 - » weryfikacji zasobów płynów złożowych,
 - » wtórnych metod zwiększania wydobycia (zatlaczanie gazu lub wody, procesy WAG, procesy wypierania mieszającego, oddziaływanie chemiczne),
 - » optymalizacji rozwiercania i udostępniania złóż,
 - » prognozowania złożowych i hydraulicznych (w tym termalnych) charakterystyk odwiertów (w szczególności poziomych) dla celów optymalnego ich projektowania,
 - » sekwestracji CO₂;
- projektowanie, realizacja i wdrażanie systemów baz danych dla potrzeb górnictwa naftowego.

Kierownik: dr Wiesław Szott

Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno

Telefon: 13 436-89-41 w. 104

Faks: 13 436-79-71

E-mail: wieslaw.szott@inig.pl

