

Wiesław Szott

*Instytut Nafty i Gazu w Krakowie, Oddział Krosno*

## Zastosowanie symulacji komputerowych do modelowania pracy podziemnych magazynów gazu w Polsce

### Wstęp

Dla poprawnego i skutecznego projektowania oraz późniejszego zarządzania podziemnymi magazynami gazu w częściowo wyeksploatowanych złożach naftowych lub akiferach należy uwzględnić ciąg elementów składowych całego systemu magazynowania. Szczególne miejsce zajmuje w nim element złożowy, podlegający jedynie w ograniczonym stopniu bezpośredniej obserwacji i pomiarowi. Jednocześnie w elemencie tym z reguły zachodzą bardzo złożone oddziaływania głównych czynników składających się na strukturę podziemnego magazynu.

Czynnikami tymi są: skała porowata – zapewniająca własności zbiornikowe, oraz płyny złożowe; zarówno naturalnie występujące w złożu, tj. woda i częściowo wyeksploatowane zasoby węglowodorów, jak i zatłaczany i magazynowany w złożu gaz. Funkcjonowanie magazynu z punktu widzenia zjawisk złożowych sprowadza się do okresowych przepływów płynów w skale złożowej. W odróżnieniu od względnie powolnej migracji płynów w czasie eksploatacji złoża węglowodorowego, praca magazynu gazu charakteryzuje się stosunkowo intensywnymi przepływami mediów złożowych – zwłaszcza w zimowym okresie odbioru gazu. Oznacza to, że złożo wykorzystywane do magazynowania gazu praktycznie nigdy nie osiąga statycznego stanu równowagi, ale funkcjonuje jako układ wysoce dynamiczny, przechodzący przez kolejne stany przejściowe. Fakt ten w zasadniczym stopniu utrudnia rozumienie, śledzenie i przewidywanie zachowania się PMG. Dodatkowo problem często komplikuje niejednorodność własności skały złożowej oraz złożoność zjawisk fizycznych, zachodzących podczas przepływów złożo-

wych. Dlatego praktycznie jedynym sposobem badania zachowania się podziemnych magazynów gazu, który jest w stanie uwzględnić wszystkie podstawowe zjawiska i szczególne cechy PMG, są matematyczne modele złożów. Modele te przy użyciu techniki komputerowej pozwalają na przeprowadzenie symulacji funkcjonowania PMG; zarówno w okresie budowy magazynu, jak i jego późniejszej, regularnej pracy. Symulacje takie umożliwiają weryfikację założeń dotyczących budowy geologicznej złoża, analizę różnorodnych scenariuszy wytwarzania magazynu, optymalizację jego rozwiercania i wybór najkorzystniejszych parametrów pracy.

Zakład Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu Instytutu Nafty i Gazu (INiG) jest jednym z głównych ośrodków modelowania i symulacji złożowych w Polsce. INiG wykonuje usługi w zakresie opracowywania matematycznych modeli złożowych dla PMG oraz realizuje zadania szczegółowe, opisane w dalszej części artykułu. Do tego celu wykorzystywane są profesjonalne narzędzia – w postaci symulatorów komputerowych najnowszej generacji oraz programów specjalistycznych – dla rozwiązywania zagadnień specyficznych dla podziemnego magazynowania gazu [6]. Wysoka jakość i profesjonalizm naszych opracowań opiera się na doświadczeniu zdobytym podczas realizacji prac dla potrzeb istniejących lub budowanych magazynów gazu (Wierzchowice, Husów) [7, 8]. Dodatkowo posiadamy wieloletnie (od połowy lat 80. ub. wieku) doświadczenie w stosowaniu techniki symulacyjnej dla potrzeb górnictwa naftowego (eksploatacja złóż

naftowych), która w swoich podstawowych cechach jest wspólna dla problemów eksploatacji złóż gazowych

i problemów podziemnego magazynowania gazu [1–5, 9, 10, 11].

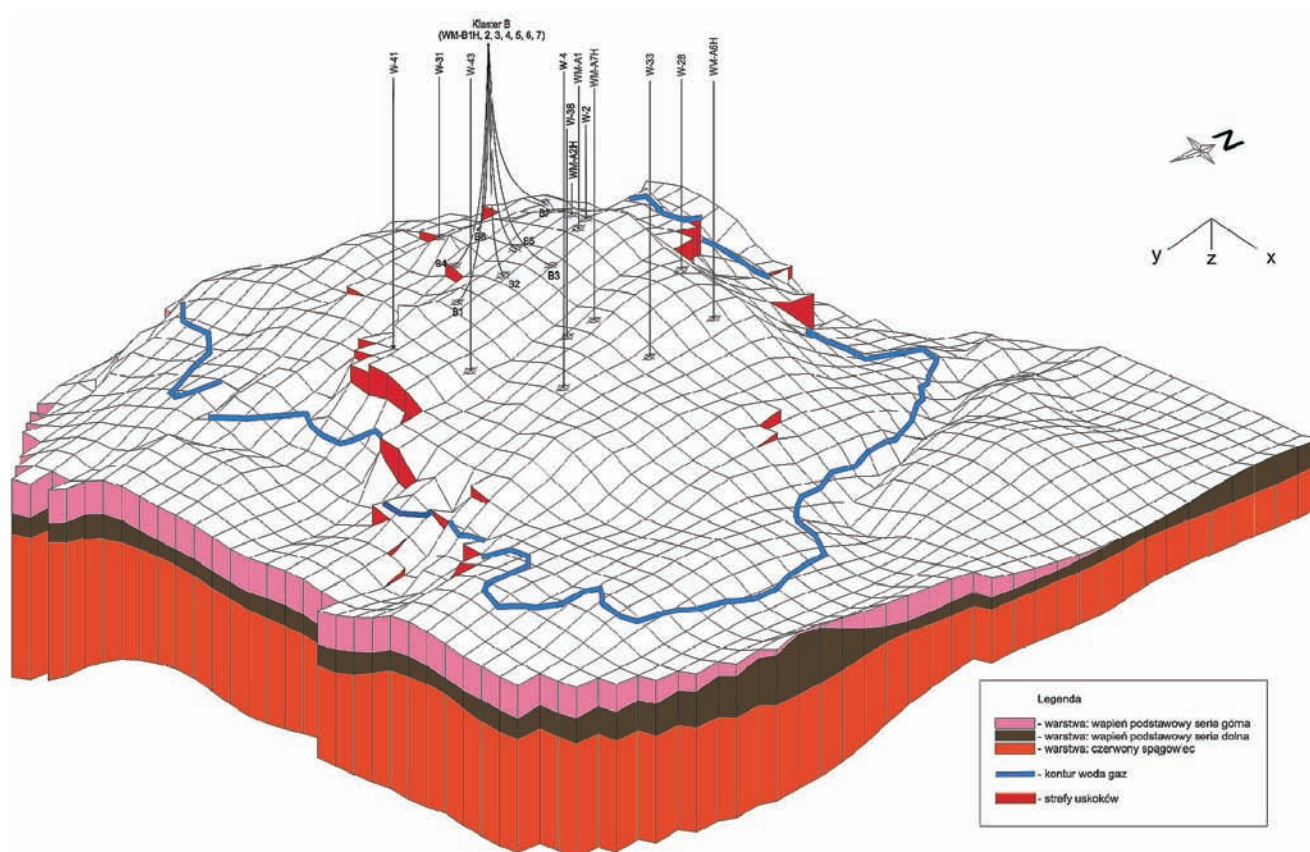
### Symulacyjne modele PMG – wymagane dane i konstrukcja modelu

Model złoża stanowi spójny system wszystkich dostępnych informacji o własnościach poszczególnych elementów złoża, obejmujących skałę złożową, płyny złożowe, techniczne i eksploatacyjne parametry odwiertów oraz dane o ich wzajemnym oddziaływaniu. Informacje te mogą mieć charakter bezpośredni (jak w przypadku danych geologicznych) lub pośredni (np. wyniki testów produkcyjnych, interferencyjnych itd.). Podstawową cechą modelu złożowego jest jego wewnętrzna spójność, tj. zgodność danych geologicznych oraz wyników eksploatacji.

Punktem startowym do stworzenia modelu złożowego są dane geologiczne (charakter i granice pułapki złożowej, kształt powierzchni stropowej, cechy tektoniczne oraz cechy litologiczne o charakterze przestrzennym). Dane te determinują podstawowy parametr magazynu – jakim jest maksymalna objętość złożowa możliwa do wykorzystania na magazyn gazu. Na podstawie danych stratygraficznych oraz przestrzennych korelacji własności zbiornikowych wyznacza się strukturę warstwową złoża, która ma istotny

wpływ na charakter przepływów złożowych oraz niejednorodny rozkład objętości magazynowej. Powyższe informacje, w formie map strukturalnych i miąższościowych, są przekształcane do postaci cyfrowej i weryfikowane przy pomocy specjalnych programów komputerowych. Informacje dotyczące głównych kierunków przepływów płynów złożowych oraz aktualne lub planowane lokalizacje odwiertów pozwalają na określenie przestrzennej orientacji modelu, a także jego uniformizacji – w postaci wprowadzenia siatki bloków, będącej podstawą dla numerycznej reprezentacji modelu złoża. Rysunek 1 przedstawia przykład przestrzennego modelu złoża dla PMG Wierzchowice, z zaznaczoną siatką bloków i lokalizacją odwiertów.

Kolejnym etapem budowy modelu złoża jest wprowadzenie przestrzennego rozkładu podstawowych parametrów zbiornikowych (miąższość efektywna, porowatość, przepuszczalność bezwzględna, ściśliwość skały i inne – dla bardziej skomplikowanych przypadków, takich jak ośrodki o podwójnej porowatości). Dane te, pochodzące z różnych



Rys. 1. Przestrzenny obraz modelu PMG Wierzchowice (widok od południowego-wschodu)

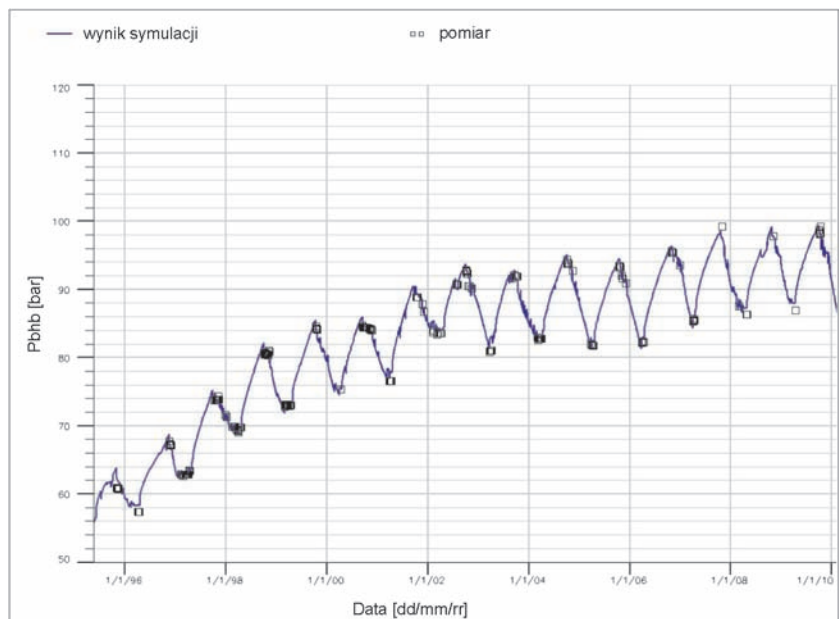
badania (profile geologiczne, badanie laboratoryjne rdzeni, testy hydrodynamiczne w odwiertach), wymagają analizy pozwalającej na określenie rozkładów w wydzielonych warstwach modelu. Analizy takie są również częścią prac wykonywanych przez zespoły badawcze w INiG. Obecnie, obok klasycznych metod interpolacyjnych, wykorzystane są także nowoczesne metody oparte na technice geostatystycznej. Własności zbiornikowe w bezpośredni sposób determinują najważniejsze parametry PMG: objętość porów w złożu, rozkład przepływu, wydajność odwiertów, rozkład ciśnień i nasyceń płynami złożowymi.

Kolejną grupą danych są własności termodynamiczne płynów złożowych (gaz, woda złożowa), istotne dla określenia podstawowych parametrów PMG (pojemności magazynu, rozkładu płynów w nim, charakteru przepływu i wzajemnego wypierania się płynów).

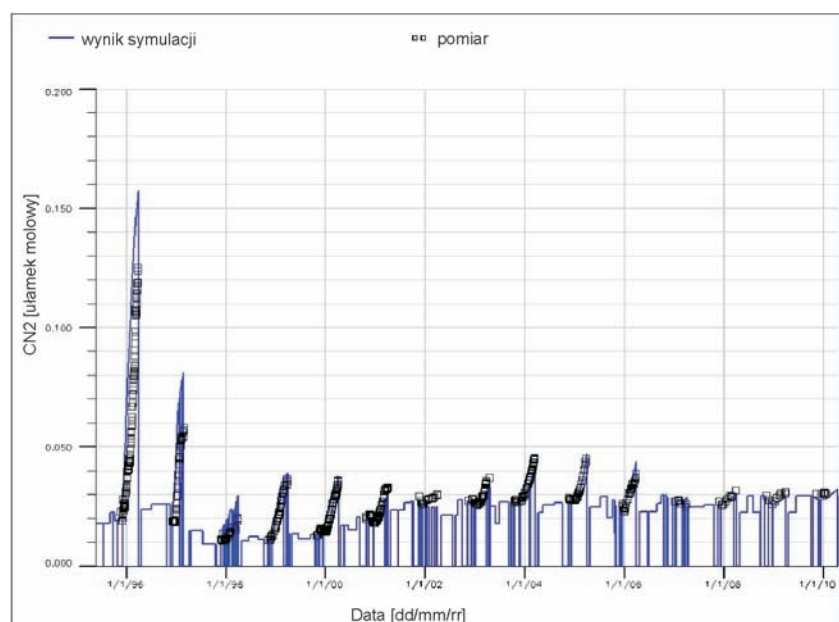
Natomiast wielkości odpowiadające za wpływ skały złożowej na warunki przepływu płynów złożowych (krzywe ciśnień kapilarnych i przepuszczalności względnych, współczynniki dyspersji fizycznej i dyfuzji molekularnej) odpowiedzialne są za poprawny opis dynamiki magazynu, w tym: zjawiska histerezy podczas wzajemnego przemieszczania się płynów złożowych, pułpki gazu, czy mieszania się gazu rodzimego z gazem zatłaczanym. Kolejny istotny zestaw informacji to warunki brzegowe, które wynikają m.in. z obecności rozległych obszarów wody okalającej lub podścielającej (akiferów). Hydrodynamiczne parametry tych struktur oraz ich rozmiary decydują w istotnym stopniu o długoterminowych zmianach podstawowych parametrów pracy podziemnych magazynów gazu. Parametry te mogą być określone metodami pośrednimi – poprzez obliczenia symulacyjne i kalibrację modelu złoża, z wykorzystaniem danych eksploatacyjnych.

Omówione powyżej elementy modelu złoża stanowią punkt wyjścia do kolejnego ważnego etapu budowy modelu, jakim jest jego weryfikacja (kalibracja) przy pomocy danych eksploatacyjnych, dostępnych z wcześniejszych etapów funkcjonowania złoża (okres eksploatacji zasobów złoża

i/lub dotychczasowy okres pracy magazynu gazu). Poprzez efektywne obliczenia wykonane na modelu symulacyjnym, dla poszczególnych odwiertów uzyskuje się wyniki w postaci zmieniających się w czasie przebiegów: ciśnień, składu wydobywanych płynów złożowych i innych szczegółowych parametrów, jak np. składu chemicznego wydobywanego gazu. Porównanie tych wyników ze zmierzonymi danymi eksploatacyjnymi stanowi najbardziej wiarygodną ocenę poprawności i spójności skonstruowanego wcześniej modelu złoża. Wszelkie rozbieżności oznacza-



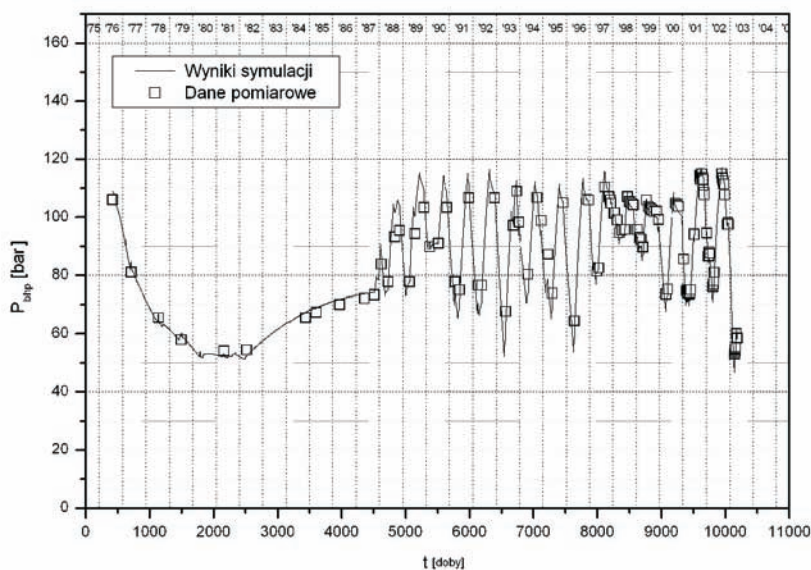
Rys. 2. PMG Wierzchowice. Ciśnienie na spodzie przykładowego odwiertu  $P_{BHP}$ . Porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi



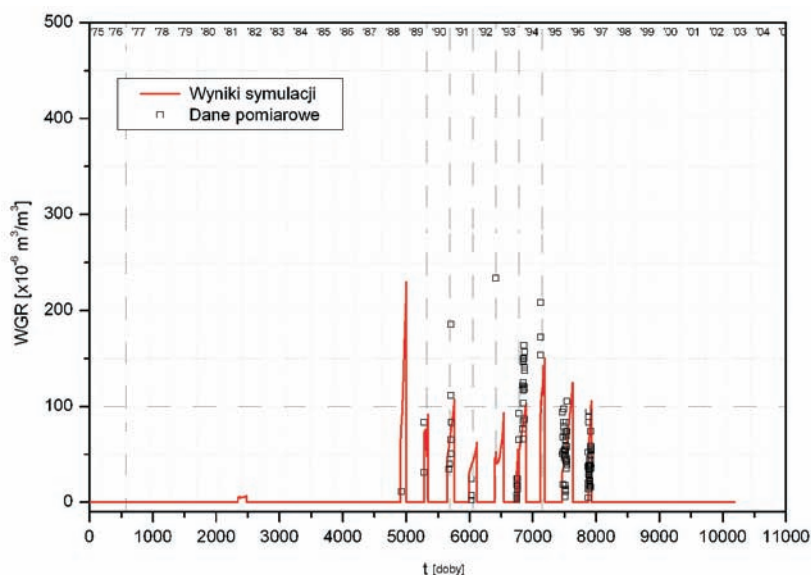
Rys. 3. PMG Wierzchowice. Koncentracja azotu w odbieranym gazie. Porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi

ją konieczność modyfikacji elementów modelu.

W INiG zagadnieniami tymi zajmuje się interdyscyplinarny zespół specjalistów, grupujący geologów, inżynierów złożowych, specjalistów od metod numerycznych oraz informatyków. Przykłady uzyskanych wyników w zakresie weryfikacji modeli złoża dla PMG Wierzchowice i Husów pokazują rysunki 2, 3, 4 i 5, na których przedstawiono wyniki dopasowania przebiegu ciśnień, składu odbieranego gazu (zawartości azotu) i wykładników wodnych. Widoczna dobra jakość dopasowania świadczy o poprawności modelu złożowego, w zakresie objętości i struktury porów złoża, jego własności hydrodynamicznych, aktywności wód złożowych i charakteru przepływów fazowych w złożu.



Rys. 4. PMG Husów. Ciśnienie na spodzie przykładowego odwiertu  $P_{BHP}$ . Porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi

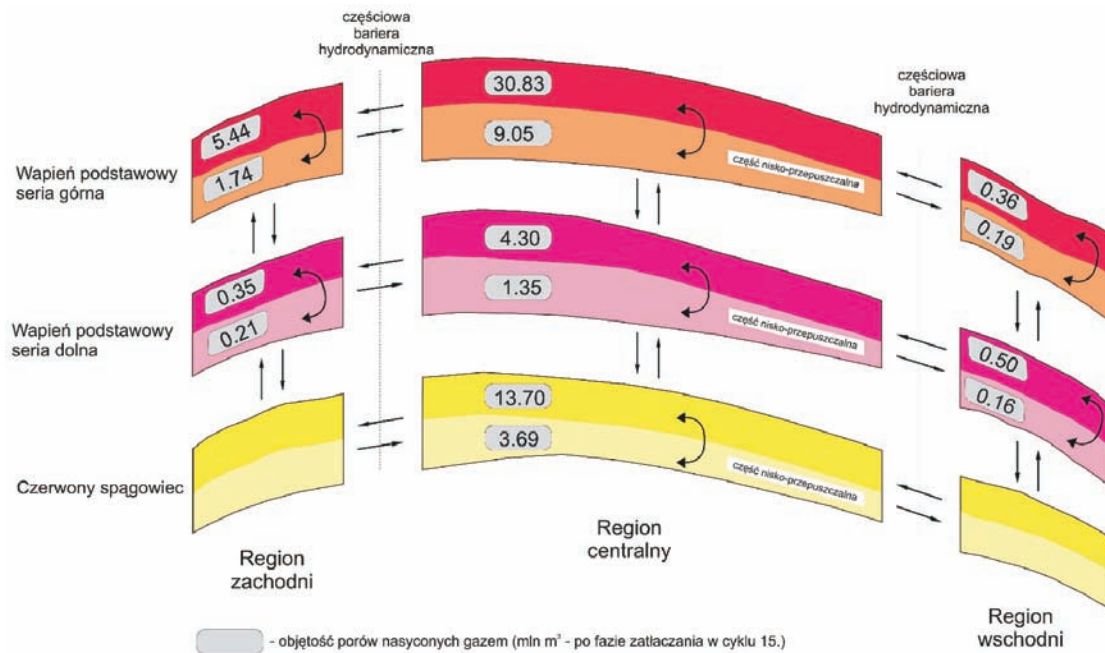


Rys. 5. PMG Husów. Wykładnik wodny, WGR w przykładowym odwiercie. Porównanie wyników symulacji z danymi pomiarowymi

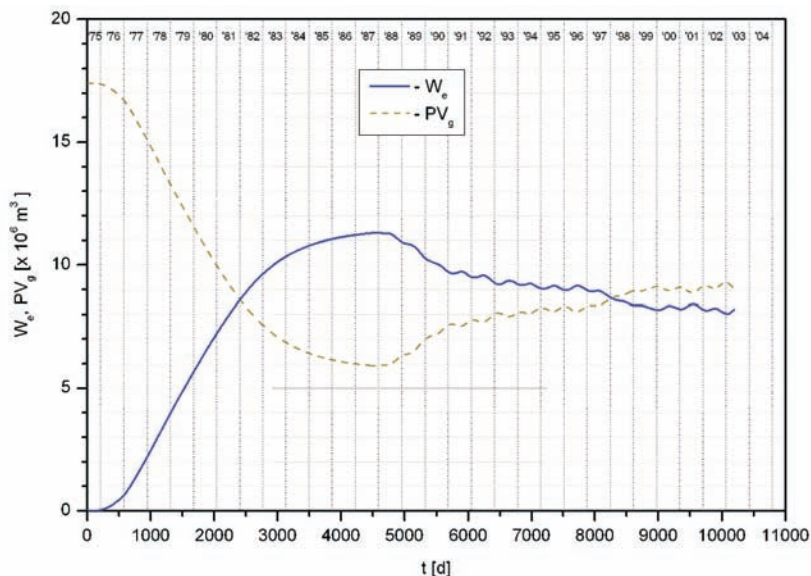
### Podstawowe zagadnienia funkcjonowania PMG – zastosowanie modeli symulacyjnych

Zweryfikowany i skalibrowany model złoża PMG pozwala na rozwiązanie podstawowych zagadnień projektowania i budowy magazynu gazu. Do zagadnień tych należy określenie zależności pomiędzy zakresem ciśnień pracy magazynu, a jego objętością czynną i buforową. Jest to szczególnie ważne w przypadkach skał zbiornikowych o złożonym systemie porów, szczelin i mikrokawern. Przykładem takiej złożonej struktury hydrodynamicznej jest struktura PMG Wierzchowice, pokazana na rysunku 6. Dodatkowy wpływ na omawianą zależność objętości magazynowej od ciśnień panujących w złożu wywiera

obecność aktywnej wody, przemieszczającej się w trakcie funkcjonowania magazynu. Ma to szczególne znaczenie dla długoterminowych prognoz pracy magazynu, ale wpływa również na dynamikę magazynu w okresie jego budowy. Symulacje modelu magazynu pozwalają śledzić omawiane wielkości na różnych etapach i dla różnych strategii wytwarzania magazynu. Rysunek 7 przedstawia przykładowe zmiany objętości porów nasyconych gazem, wynikające z przemieszczania się wód okalających magazyn, wywołanego zmianami ciśnień w nim. Jednym z trudniejszych zagadnień, pojawiających się w trakcie projektowania



Rys. 6. Schemat hydrodynamicznej struktury PMG Wierzchowice

Rys. 7. Złoże gazu ziemnego i PMG Husów. Sumaryczny dopływ wody do złoża ( $W_e$ ). Zmiany objętości porów gazonośnych w złożu ( $PV_g$ )

podziemnego magazynu gazu, jest optymalizacja liczby i rozmieszczenia odwiertów. Choć bardzo czasochłonne, symulacyjne analizy modeli złożowych są praktycznie jedynym sposobem przeprowadzenia takich procesów optymalizacyjnych.

W przykładowej procedurze wykonanej dla PMG

Wierzchowice uwzględniono ogólne założenia techniczno-eksploatacyjne, zgodne z intencjami operatora magazynu. Stosując te założenia oraz pewne wyniki wstępne – uzyskane z modelu uproszczonego i dotyczące przybliżonego oszacowania liczby odwiertów – wykonano wielokrotne symulacje na pełnym modelu złoża, obejmujące okres budowy i regularnej pracy magazynu, i różniące się: liczbą odwiertów, ich szczegółową lokalizacją oraz udziałem w całkowitym zatłaczaniu i odbiorze gazu. Zastosowano kryteria optymalizacji, uwzględniające minimalizację liczby odwiertów, ograniczenie maksymalnej depresji w nich (poniżej 10% średniego ciśnienia złożowego), równomierność w rozkładzie ciśnień złożowych i maksymalne ograniczenie niekorzystnych

przepływów wody złożowej. W wyniku przeprowadzenia procedury optymalizacyjnej znaleziono: minimalną liczbę odwiertów oraz harmonogram ich wprowadzenia do eksploatacji, szczegółową lokalizację odwiertów dla poszczególnych rejonów złoża oraz rozkład wydajności tłoczenia i odbioru gazu dla poszczególnych grup i odwiertów.

### Wybrane zagadnienia szczegółowe w zastosowaniu symulacyjnych modeli PMG

Oprócz wymienionych wyżej, typowych zastosowań symulacyjnych modeli PMG, narzędzia te są również

wykorzystywane do rozwiązywania ważnych zagadnień szczegółowych. Do zagadnień tych należą:

- problem analizy testów w odwiertach,
- problem mieszania się gazów w magazynie,
- zagadnienie wpływu niepełnej informacji o złożu na wyniki symulacji (*sensitivity study*).

W szczególności wytwarzanie PMG w strukturach zawodnionych lub wyeksploatowanych złożach gazowych często napotyka na problem mieszania się gazów. Pojawia się on w przypadkach:

- zróżnicowania składu gazu rodzimego i zatłaczanego,
- analizy możliwości zastosowania gazu inertnego jako buforu magazynu,
- selektywnego magazynowania w pojedynczym magazynie gazów o różnym składzie,

- korzystania ze znaczników chemicznych lub radioaktywnych – dla badania migracji gazów, a w szczególności potencjalnych dróg ucieczki gazu z magazynu.

Prognozowanie zachowania się magazynu pod wpływem mieszania się gazów jest możliwe praktycznie jedynie przy pomocy specjalistycznych programów symulacyjnych, zdolnych do uwzględnienia zjawisk dyspersji i dyfuzji w opisie przepływu gazów w złożu. W dotychczasowych pracach działającego w INiG zespołu do spraw symulacji analizowano szczegółowo problem zróżnicowania składu gazu rodzimego i zatłaczanego – posiadający bardzo istotne znaczenie dla projektowania PMG Wierzchowice [7].

### Podsumowanie

O potrzebie i korzyściach zastosowania symulacyjnych modeli złożowych w projektowaniu i sterowaniu pracą PMG świadczą szczegółowe informacje zamieszczone w niniejszym artykule. Konkludując, można stwierdzić, że symulacyjne modele złożowe przejawiają potrójny aspekt

ich znaczenia: poznawczy (opisany powyżej), finansowy (wymagania instytucji kredytujących) i kulturowy (standard światowy w PMG). INiG czynnie uczestniczy w realizowaniu programów zastosowania modeli symulacyjnych dla potrzeb PMG.

Artykuł nadesłano do Redakcji 21.04.2009 r. Przyjęto do druku 21.04.2010 r.

Recenzent: dr hab. inż. Maria Ciechanowska

### Literatura

- [1] Kwilosz T., Pańko A., Szott W.: *Zastosowanie metod geostatystycznej analizy danych dla potrzeb symulacji złóż węglowodorów*. Prace IGNiG Nr 126, Kraków 2003.
- [2] Kwilosz T., Szott W.: *Optymalna lokalizacja odwiertów na złożu gazowym ze względu na uzyskanie maksymalnego wydobywania gazu*. AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz, Rocznik 20/1, Kraków 2003.
- [3] Łętkowski P., Szott W.: *Szacowanie zasobów węglowodorów przy użyciu symulacyjnego modelu złoża*. Poster opublikowany na Konferencji Naukowo-Technicznej GEOPETROL 2004, pt.: „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów”, Zakopane 20-23.09.2004.
- [4] Łętkowski P.: *Praktyczne aspekty weryfikacji modelu symulacyjnego*. Referat opublikowany na Seminarium/Warsztatach na temat: „Zastosowanie symulacyjnych modeli złożowych dla efektywnego projektowania, budowy i zarządzania PMG”, GEOPETROL 2004, Zakopane 21.09.2004.
- [5] Pańko A., Łętkowski P.: *Metody analizy statystycznej i geostatystycznej danych wykorzystywanych w modelowaniu złóż węglowodorowych*. Poster opublikowany na Konferencji Naukowo-Technicznej GEOPETROL 2004 pt.: „Efektywne technologie poszukiwania i eksploatacji złóż węglowodorów”, Zakopane 20-23.09.2004.
- [6] Symulator ECLIPSE (BlackOil i Compositional) Release 2009 firmy GeoQuest, Schlumberger; Symulator OMEGA + Fully Implicit, Miscible Gas-Gas-Water Reservoir Simulator, Scientific Software-Intercomp, Inc., Denver USA, 1994.
- [7] Szott W. i zespół INiG: *Konstrukcja i aktualizacje symulacyjnych modeli złożowych PMG Wierzchowice z ich wykorzystaniem do prognozowania pracy magazynu*. Opracowania z lat 1997–2009.
- [8] Szott W. i zespół INiG: *Wykonanie symulacji komputerowych PMG Husów dla celów zapewnienia bezpieczeństwa i optymalizacji eksploatacji magazynu*. Krosno, październik 2003.
- [9] Szott W.: *Simulation Studies of Gas-Gas Mixing Processes in Wierzchowice UGS Reservoir*. Proceedings of 21st World Gas Conference, Nice VI 2000.
- [10] Szott W.: *Symulacje złożowe – ich rola i znaczenie w nowoczesnym, zintegrowanym zarządzaniu złożami naftowymi*. Referat z okazji 60-lecia Instytutu Nafty i Gazu, Nafta-Gaz, maj 2005.
- [11] Szott W.: *Znaczenie symulacji złożowych w podziemnym magazynowaniu gazu*. Wprowadzenie – Referat opublikowany na Seminarium/Warsztatach na temat: „Zastosowanie symulacyjnych modeli złożowych dla efektywnego projektowania, budowy i zarządzania PMG”, GEOPETROL 2004, Zakopane 21.09.2004.



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. Od ponad 20 lat zajmuje się problematyką modelowania i symulacji złożowych. Autor ponad 30 prac naukowych i licznych opracowań, głównie z zakresu powyższej tematyki.