

Modelowanie i symulacja złóż ropy naftowej i gazu ziemnego

Michał Myśliwiec*

W ostatnich latach, w metodyce poszukiwań naftowych, dzięki powszechnemu stosowaniu techniki komputerowej, nastąpiła prawdziwa rewolucja. Co prawda stosowanie komputerów w geologii nie jest już niczym nowym, szczególnie tam gdzie zjawiska geologiczne w łatwy sposób poddają się matematycznej parametryzacji, jednak nowością jest charakter stosowanej w poszukiwaniach naftowych interpretacji materiałów geologicznych i geofizycznych. Można ją określić jako **zintegrowaną i kompleksową**, tzn., że obejmuje wszystkie dostępne dane i charakteryzuje się pełnym zintegrowaniem danych geologicznych z geofizycznymi. Spełnienie takich warunków pozwala na uzyskanie najlepszego wyniku na podstawie aktualnych informacji (Myśliwiec i in., 1995).

Jedną z dziedzin, gdzie taki sposób magazynowania, przetwarzania i interpretacji danych znalazł szczególnie ważne zastosowanie jest modelowanie i symulacja złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Wymaga on przechowywania informacji w dużych i szybko dostępnych bazach oraz dostępu do nich dla wielu pakietów oprogramowania. Poprzez bazę danych możliwa jest także automatyczna wymiana uzyskanych wyników między poszczególnymi programami. Programy komputerowe do modelowania i symulacji złóż są już bardzo powszechne w wielu firmach naftowych. Wymagają one jednak wykonania wielu specjalistycznych pomiarów terenowych i laboratoryjnych oraz właściwego opracowania ich wyników.

Czym jest modelowanie i symulacja złóż?

Symulacja złożowa jest formą matematycznego modelowania, które ma na celu opisanie i interpretację zjawisk fizykochemicznych zachodzących w złożach węglowodorów z możliwością jego rozszerzenia na zjawiska, które będą zachodzić w złożu w przyszłości. Wykonywana jest dla optymalizacji wydobycia przez przewidywanie zachowania się złoża w trakcie eksploatacji. W szczególności obejmuje ona symulowanie zmian ciśnienia, nasycień węglowodorami i wodą złożową oraz wydajności odwiertów.

Zanim będzie to możliwe konieczne jest zbudowanie modelu, jak najlepiej opisującego geometrię złoża, występujące w nim media oraz zachodzące w nim procesy. Późniejsza obserwacja eksploatacji i korekta poszczególnych parametrów powoduje, że model staje się dokładnym matematycznym opisem złoża (Myśliwiec, 1996).

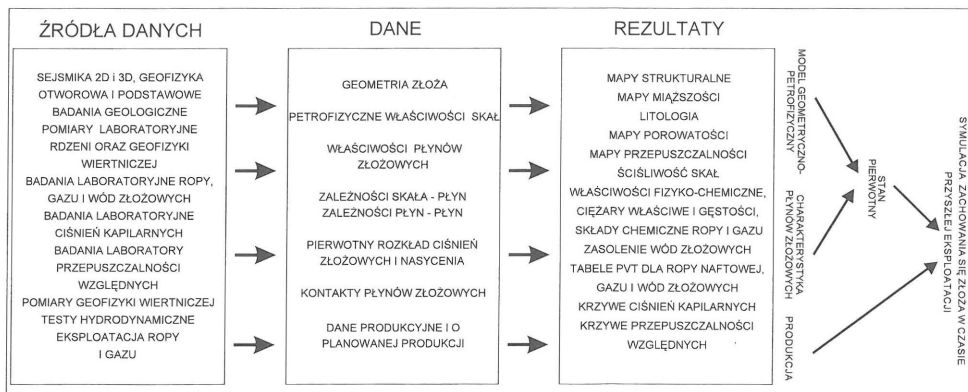
Stosowanie symulatorów złóż pozwala na:

— dokładne określenie zasobów złoża,

- prognozowanie wydobycia,
- określenie liczby otworów potrzebnych do wyeksploatowania złoża,
- określenie najlepszego sposobu udostępniania horyzontów w nowo wierconych otworach,
- określenie najlepszego rozmieszczenia otworów eksploatacyjnych,
- ocenę procesów zawadniania otworów i przeciwdziałanie temu,
- określenie technicznych warunków eksploatacji węglowodorów,
- określenie optymalnych ilości zatłaczanych płynów oraz czasu ich zatłaczania,
- określenie istniejących w złożu barier dla przepływu w celu identyfikacji rejonów złoża, z których nie jest możliwe wyeksploatowanie zasobów,
- określanie pojemności podziemnych magazynów gazu oraz możliwości ich eksploatacji.

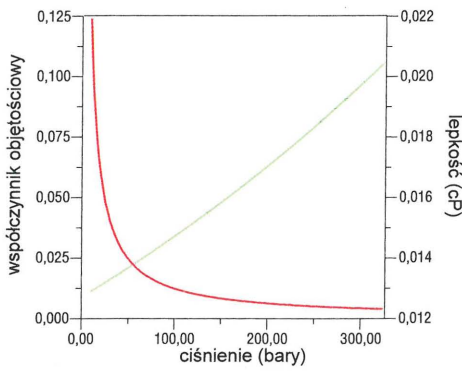
Proces przygotowania informacji w trakcie budowania modelu złoża obejmuje kolejno:

- opisanie geometrii złoża przez zebranie wszelkich danych geologicznych i geofizycznych, a następnie wykonanie na ich podstawie map strukturalnych i miąższościowych;
 - zbadanie zmienności właściwości petrofizycznych skał;
 - dokładne zmierzenie właściwości fizykochemicznych wszystkich mediów złożowych, tzn. ropy naftowej, gazu ziemnego i wody złożowej;
 - określenie relacji między skałą a medium złożowym (krzywe ciśnień kapilarnych) oraz wzajemnych relacji między poszczególnymi mediami (przepuszczalności względne);
 - przygotowanie danych z produkcji lub danych dla prognozowania optymalnej eksploatacji (ryc. 1).
- Źródłami danych do modelowania i symulacji złóż mogą być wyniki wszystkich wykonanych na złożu prac, zarówno terenowych, jak i laboratoryjnych. Zazwyczaj obejmują one:
- podstawowe terenowe badania geologiczne,
 - badania sejsmiki refleksyjnej,
 - badania geofizyki otworowej,
 - badania laboratoryjne skał i płynów złożowych,
 - testy hydrodynamiczne oraz wyniki eksploatacji.



Ryc. 1. Schemat przygotowania danych do modelowania i symulacji złóż

*BG Geonafsta, Oddział Regionalny Jasło, ul. Asnyka 6, 38-200 Jasło

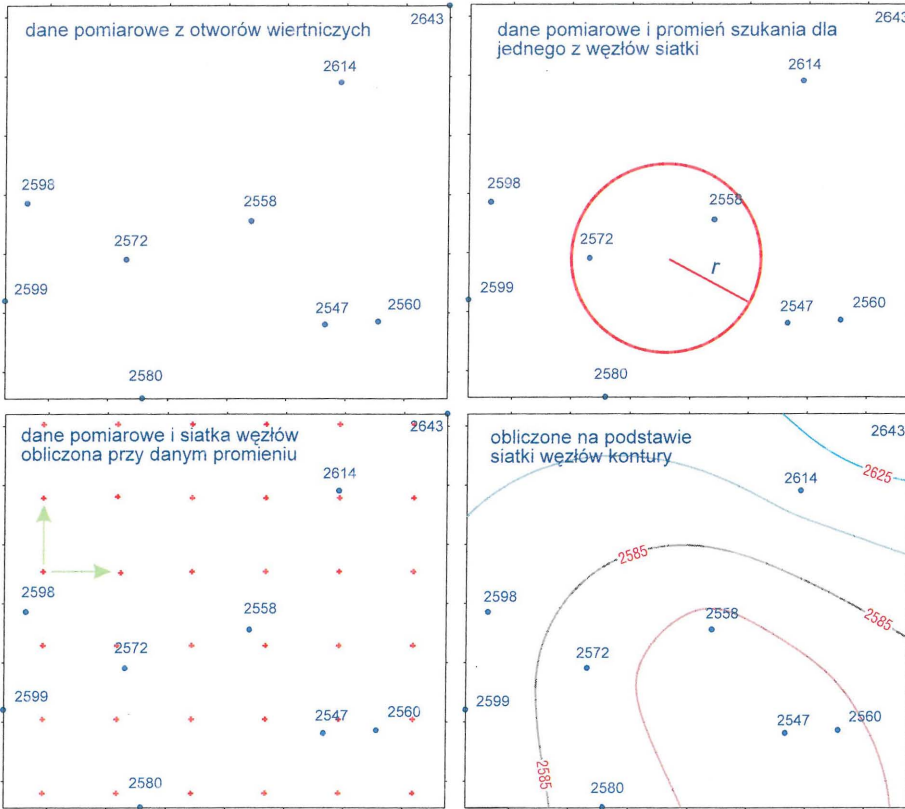


←
Ryc. 2. Wykres PVT dla gazu ziemnego złoża Jodłówka

Etapy modelowania

Geometria złoża

Właściwe opisanie geometrii złoża ma decydujące znaczenie dla poprawności budowanego modelu. W przypadku dostatecznej liczba otworów wiertniczych należy stosować dane z korelacji pomiarów geofi-



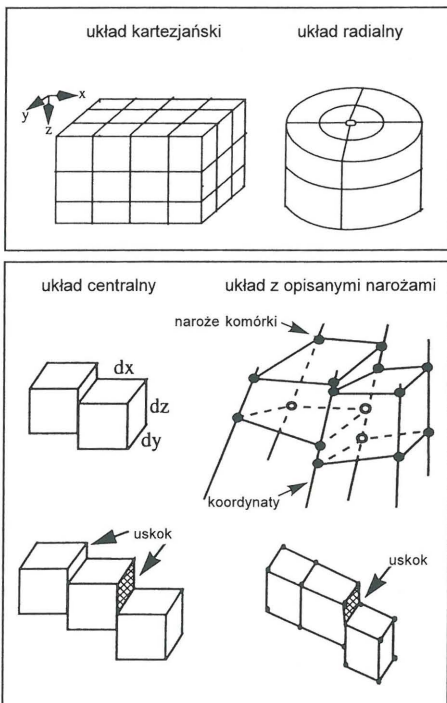
←
Ryc. 3. Kolejne etapy wykonywania map w programach komputerowych

zyki wiertniczej, uwzględniając etapy rozwoju geologicznego obszaru. Często jednak konieczne jest uściślenie położenia stropu złoża lub wyznaczenie jego miąższości pomiędzy otworami. Wtedy należy posłużyć się wynikami analizy strukturalnej materiałów sejsmicznych. Ze względu na możliwość bardzo szczegółowego odtworzenia ukształtowania badanych powierzchni strukturalnych, szczególnie są przydatne wyniki interpretacji zdjęć sejsmicznych 3D.

Charakterystyka petrograficzna i mineralogiczna skały zbiornikowej

W układach skał piaszczysto- ilastych w celu właściwej charakterystyki złożowej znaczenie ma nie tylko procentowo wyrażone

zapiaszczenie, ale także geometryczny stosunek warstw ilów i piaszczowców do siebie, grubość warstewek ilastych i piaszczystych, stopień zwięzłości osadów oraz sposób wewnętrznego zailenia warstw piaszczystych. Właściwe określenie tych cech ma również istotny wpływ na wyniki interpretacji profilowań geofizyki otworowej, a w konsekwencji na jakość dużej części stosowanych w modelowaniu danych. Niezwykle istotny jest rodzaj substancji ilastej i jej zachowanie się w trakcie następujących podczas udostępniania złoża i jego eksploatacji zmian nasycenia ropą, gazem i wodą. Wywołane przez te zmiany zaburzenie równowagi między minerałami ilastymi, a płynami występującymi w przestrzeni porowej może prowadzić do zmian jej charakterystyki przepuszczalnościowej. Rodzaj występujących minerałów ilastych ma szczególne znaczenie dla powodzenia zabiegów intensyfikacyjnych w czasie których jest zmieniana temperatura złoża.

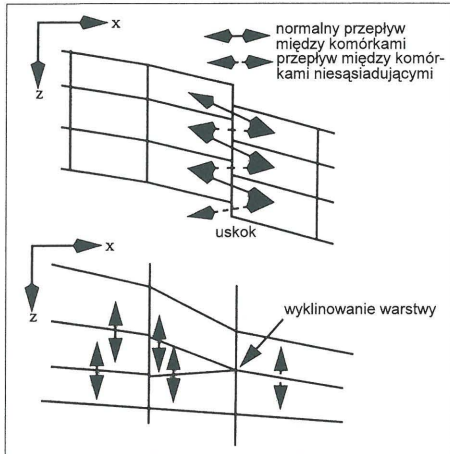


←
Ryc. 4. Typy układów geometrycznych symulatorów złóż (wg Eclipse 100 ..., 1996)

Charakterystyka przestrzeni porowej

Charakterystyka przestrzeni porowej skały zbiornikowej to już nie tylko prosty pomiar porowatości całkowitej oraz mniej lub bardziej dokładny pomiar przepuszczalności absolutnej. Na charakterystykę całego systemu porowatościowego składają się pomiary:

- porowatości całkowitej i efektywnej,
- przepuszczalności absolutnej,
- przepuszczalności względnych i fazowych dla wszystkich obecnych w skałe zbiornikowej mediów,
- ciśnień kapilarnych (badania porozymetryczne) oraz charakterystyka przestrzeni porowej wykonana w trakcie badania płytek cienkich i specjalnych badań



Ryc. 5. Schemat zasady symulowania złóż z uskokami (wg Eclipse 100..., 1996)

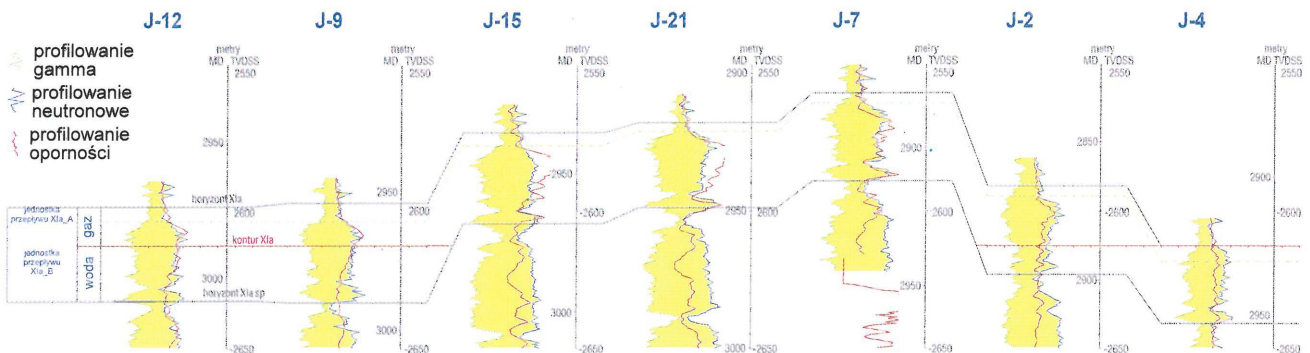
petrograficznych (np. obserwacji pod mikroskopem skaninowym).

Źródłem informacji o porowatości całkowitej i efektywnej oraz przepuszczalnościach mogą być zarówno pomiary laboratoryjne próbek pobranych z rdzeni, jak i interpretacja pomiarów geofizyki wiertniczej i testy otworowe. Szczególnie jest ważne rozpoznanie rozkładu przepuszczalności fazowych już na etapie udostępniania potencjalnych horyzontów złożowych. Znajomość ich wartości dla ropy, gazu i wody pozwala bowiem wykluczyć z opróbowań takie horyzonty, co do których przypuszczamy, że są nasycone węglowodorami, ale nie jest możliwe uzyskanie z nich przyływów przemysłowych.

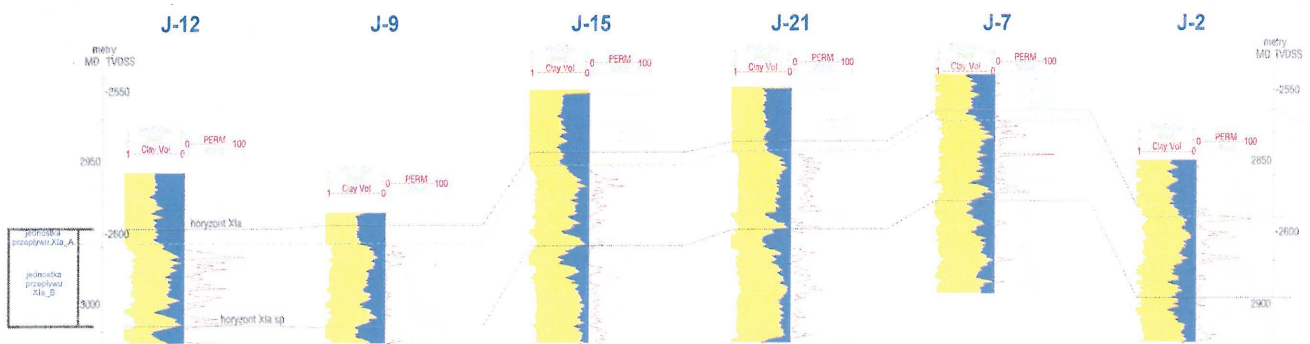
Jeżeli za przepuszczalność absolutną uznamy fizyczną właściwość skały, dzięki której możliwa jest migracja płynów przez połączone ze sobą pory bez przemieszczania cząstek skały przy 100% nasyceniu płynem, to za przepusz-



Ryc. 6. Mapa lokalizacyjna złoża gazu ziemnego Jodłówka



Ryc. 7. Korelacja strukturalna podhoryzontu XIa złoża Jodłówka. MD — głębokość mierzona według otworu wiertniczego; TVDSS — głębokość z uwzględnieniem wysokości npm i krzywizny otworu wiertniczego



Ryc. 8. Korelacja właściwości petrofizycznych podhoryzontu XIa złoża Jodłówka. PHIE — porowatość; Phie*Sw — porowatość efektywna; Clay Vol — zailenie; PERM — przepuszczalność absolutna; WSat — zawodnienie

czalność fazową dla danego płynu uważamy zdolność skały do przepuszczania tego płynu w obecności innych. Zależności dla określania wartości przepuszczalności absolutnej na podstawie pomiarów geofizyki wiertniczej opracowane zostały empirycznie dla określonych rejonów i formacji geologicznych. Aby uzyskać najbardziej prawdopodobny wynik jest konieczne opracowanie fizykalnego modelu, który jak najlepiej opisuje rozkład przepuszczalności w funkcji porowatości i nasycenia wodą związaną. Dla zapadliska przedkarpackiego modele dla obliczania przepuszczalności absolutnej i przepuszczalności fazowych zostały opracowane przez Zawiszę i in. (1995, 1996). Ze względu na wysoki koszt i długi czas trwania laboratoryjnego pomiaru przepuszczalności fazowych metoda ta znajduje coraz częstsze praktyczne zastosowanie. Konieczne jest jednak wcześniejsze powiązanie wyników badań laboratoryjnych zawartości wody związanej, przepuszczalności absolutnej i przepuszczalności fazowych z pomiarami geofizycznymi w otworach wiertniczych. Korelacja ta jest podstawą do kalibracji modeli fizykalnych dla danego złoża i w efekcie umożliwia ciągłą cyfrową prognozę nasycenia wodą związaną i ruchomą, przepuszczalności absolutnej oraz przepuszczalności względnych i fazowych dla wody, gazu i ropy na podstawie pomiarów karotażowych (Zawisza i in., 1996).

W celu ustalenia, jak zmienia się przepływ płynów złożowych w skale zbiornikowej niezwykle istotne znaczenie ma określenie kształtu i charakteru porów oraz sposobu ich połączenia. Takiej parametryzacji przestrzeni porowej skał zbiornikowych można dokonać za pomocą pomiarów ciśnień kapilarnych. Wykorzystuje się w nich zależność wielkości ciśnienia kapilarnego od wielkości promienia, jego kształtu i sieci połączeń między sobą porów o różnych promieniach (Kruczek i in., 1995; Zawisza i in., 1996). Pomiary są wykonywane przez wtlaczanie rtęci w przestrzeń porową skały zbiornikowej. Mierzymy ciśnienie i objętość wtłoczonej rtęci przy danej jego wartości. Jako rezultat otrzymujemy:

— krzywą kumulacyjną zależności objętości wtłoczonej rtęci od ciśnienia,

- rozkład średnicy porów,
- wielkość średnicy kapilary,
- porowatość z porozymetru,
- gęstość szkieletową,
- gęstość pozorną,
- powierzchnie właściwą skały.

Analiza kształtu krzywych kumulacyjnych pozwala określić największy rozmiar porów jakie występują w próbce oraz średnice porów zapewniających komunikację płynów w skale. Wielkość efektu histerezy między krzywymi uzyskanymi w trakcie wzrostu ciśnienia i przy ciśnieniu malejącym opisuje pośrednio kształt porów i połączeń między nimi. Na podstawie kształtu krzywych kumulacyjnych jest możliwe wydzielenie typów skał (przestrzeni porowych) oraz przyporządkowanie im określonych laboratoryjnie wartości przepuszczalności fazowych. Powiązanie ze sobą wyników pomiarów porozymetrycznych opisujących strukturę przestrzeni porowej oraz wyników pomiarów przepuszczalnościowych za pomocą matematycznego modelu jest prostą i efektywną metodą ograniczenia laboratoryjnych pomiarów przepuszczalności (Kruczek i in., 1995; Such, 1994).

Charakterystyka płynów złożowych

Charakterystyka płynów złożowych obejmuje analizę własności fizykochemicznych ropy naftowej, gazu ziemne-

go i wód złożowych. Szczególne znaczenie dla symulacji ma określenie zmian objętości mediów w temperaturze złożowej w zależności od zmian ciśnienia (tabele PVT, współczynniki objętościowe), (ryc. 2). Konieczne jest także określenie relacji między skałą, a medium złożowym (ustalenie krzywych ciśnień kapilarnych) oraz wzajemnych relacji między poszczególnymi mediami (ustalenie przepuszczalności względnych).

Istotą ciśnień kapilarnych jest między innymi regulowanie pierwotnego statycznego rozmieszczenia cieczy w nieeksploatowanym złożu. Wraz z nasyceniem skał węglowodorami i wodą określają one wzajemne rozmieszczenie cieczy w przestrzeni porowej. Są ściśle związane z typem skały, napięciem powierzchniowym na granicy powierzchni rozdziału, porowatością, przepuszczalnością, strukturą i teksturą przestrzeni porowej, kątem zwilżalności oraz granicy rozdziału cieczy i powierzchni skały.

Ciśnienia kapilarne wyrażone w postaci krzywych ciśnień kapilarnych (funkcji) otrzymujemy w wyniku wtlaczania rtęci pod ciśnieniem do skały porowatej. Wyniki otrzymane tą metodą można odnieść do ciśnienia kapilarnego, ale trzeba je przeliczyć z układu pomiarowego na układ rzeczywisty. W przypadku zmiany układu powietrze–rtęć–skała na powietrze–woda–skała współczynnik przeliczeniowy wynosi 5,1 (Mayer-Gurr, 1975).

Przepuszczalności względne to zależność między przepuszczalnością efektywną dla danej cieczy przy częściowym nasyceniu, a przepuszczalnością przy nasyceniu 100%. Tabele przepuszczalności względnych mają szczególne znaczenie dla ustalania rozkładu nasycenia ropą, gazem i wodą. Ogólnie rzecz biorąc rozmieszczenie ropy, gazu i wody w złożu jest uzależnione od wzajemnego oddziaływania wielu czynników: gęstości względnych płynów złożowych, nasycenia względnego przestrzeni porowej przez każdy z płynów, ciśnień kapilarnych i ciśnienia wypierania, warunków hydrodynamicznych złoża, porowatości i przepuszczalności. Dla matematycznego modelowania nasycenia konieczne jest jednak określenie pewnych krytycznych wartości nasycenia (tab. 1).

Dla układu gaz–woda są to:

— krytyczne nasycenia wodą S_{wcr} i gazem S_{gcr} , które są najwyższymi wartościami nasycenia dla których przepuszczalności względne dla wody k_{rw} i gazu k_{rg} równe są zero. Dla nasycenia większych od tych wartości woda lub gaz w złożu są mobilne. W przykładzie podanym w tab. 1 $S_{wcr}=0,3$ i $S_{gcr}=0,1$

— minimalne nasycenia wodą S_{wco} i gazem S_{gco} . Dla wody zazwyczaj jest to wartość równa ilości wody związanej, a dla gazu wartość 0. W czasie ustalania nasycenia program symulujący wartość podaną dla wody przyjmuje dla części modelu powyżej kontaktu gaz/woda lub strefy przejściowej, a wartość podana dla gazu poniżej. W przykładzie $S_{wco}=0,25$, a $S_{gco}=0,00$.

— maksymalne nasycenia wodą S_{wmax} i gazem S_{gmax} . Symulator ustala nasycenie wodą na tym poziomie poniżej kontaktu gaz–woda lub strefy przejściowej, a gazem powyżej. Wartość dla gazu równa jest $1-S_{wco}$. W przykładzie $S_{wmax}=1,0$, a $S_{gmax}=0,75$.

W przypadku starych złóż ze względu na małą dostępność laboratoryjnych pomiarów PVT, przepuszczalności względnych i ciśnień kapilarnych często jest konieczne ich aproksymowanie na podstawie właściwości fizykochemicznych gazu, wody, ropy i skał przy użyciu specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Programy te mogą obliczać krzywe pseudoprzepuszczalności względnych i pseudoprzepuszczalności względnych kierunkowych dla układów ropa–woda, ropa–gaz, ropa–woda–gaz oraz okre-

Tab.1. Przykład danych do skalowania przepuszczalności względnych

S_w (nasylenie wodą)	K_{rw}
0,25	0,0000
0,30	0,0000
	0,0020
	0,0120
–	–
1,00	1,0000
S_g (nasylenie gazem)	k_{rg}
0,00	0,0000
0,10	0,0000
	0,1020
	0,2120
–	–
0,75	0,8300

ślac ciśnienia kapilarne. Wykorzystują kilka metod opartych na różnych zależnościach matematycznych (pseudoprzepuszczalności dynamiczne, geometryczne).

Częściowym rozwiązaniem może stać się określanie przepuszczalności względnych poprzez powiązanie ich z innymi parametrami charakteryzującymi ośrodki skalny (porowatość, przepuszczalność absolutna, woda związana) obliczanych z krzywych geofizyki otworowej (Zawisza i in., 1995, 1996). Możliwe jest także opisanie danego typu skały (przestrzeni porowej) charakterystyką pomierzonych laboratoryjnie ciśnień kapilarnych oraz powiązanie jej z przepuszczalnościami względ-

nymi (Kruczek & Such, 1995; Such, 1994).

Dane o nasyceniach i dane produkcyjne

Po określeniu właściwości płynów złożowych analizujemy ciśnienia pomierzone w otworach wiertniczych, wyniki testów otworowych i prób złożowych. Określamy warunki energetyczne złoża i czynniki powodujące dopływ ropy lub gazu do otworu, zarówno naturalne (złoża wodnonaporowe, gazowonaporowe, grawitacyjne), jak i nienaturalne, takie jak zatłaczanie wody, CO_2 , pary wodnej lub gazu naturalnego. Najlepszym wskaźnikiem reżimu złoża, a także wielkości zasobów jest analiza spadku ciśnienia na jednostkę objętości wydobywanej ropy naftowej lub gazu ziemnego w czasie eksploatacji.

Określenie modelu geometryczno-petrofizycznego złoża — co między otworami?

Integracja danych geometrycznych, petrofizycznych oraz danych o płynach złożowych pozwala na wydzielenie jednostek przepływu (*flow units*). Każda **jednostka przepływu** charakteryzuje się podobieństwem litologii, mineralogii, właściwości petrofizycznych, podobną charakterystyką systemu porowatościowego i płynów.

Posiadane informacje geologiczne ściśle są związane z poszczególnymi otworami i do nich właśnie ogranicza się pierwszy etap wydzielenia jednostek przepływu. Po ustaleniu ich zasięgów pionowych opisujemy ich własności zbiornikowe za pomocą porowatości i przepuszczalności. W tym celu uśredniamy rozmieszczone w pionowym otworze wartości pomierzone laboratoryjnie lub policzone z pomiarów

geofizyki wiertniczej. Takie uśrednienie w przypadku pomiarów laboratoryjnych jest konieczne tylko jeśli mamy dostateczną liczbę pomiarów. Przyjęcie odpowiedniej metody uśrednienia jest uzależnione od wstępnej charakterystyki jednostek przepływu. I tak, dla jednostek względnie jednolitych litologicznie i przepuszczalnościowo możemy przyjąć, że zmienność pionową przepuszczalności poziomej kh odpowiada dystrybucji wartości pomiarowych. Natomiast przepuszczalność pionową kv dla każdego przypadku określamy z ustalonego pomiarowo stosunku kv/kh . Dla jednostek wybitnie piaszczystych właściwe jest przyjęcie średniej geometrycznej z wyników pomiarów wykonanych na rdzeniach lub uzyskanych z geofizyki otworowej.

O wiele trudniejsze jest określenie odpowiednich uśrednionych wartości dla jednostek przepływu z wyraźną nieregularną heterogenicznością, np. dla jednostek piaszczystych z soczewkowatymi wkładkami łupkowymi. W takich przypadkach dobór metody jest uzależniony od charakteru nieregularności. Dla poszukiwań naftowych w zapadlisku przedkarpackim szczególnie są interesujące warstwowane jednostki ilasto-piaszczyste. W takich przypadkach należy:

— poziomą przepuszczalność efektywną kh_{ef} liczyć jako średnią arytmetyczną wartości pomiarowych z rdzeni lub pomiarów geofizyki wiertniczej,

— pionową przepuszczalność efektywną kv_{ef} jako średnią harmoniczną,

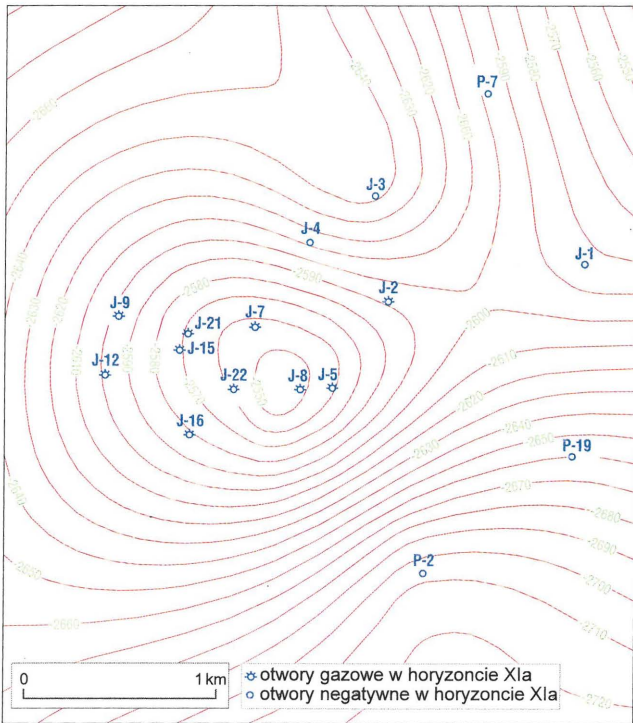
— porowatość jako średnią arytmetyczną z pomiarów rdzeni lub arytmetyczną średnią ważoną, gdzie wartości opisują interwał pomiarowy, np. co 0,25 μm w pomiarach karotażowych lub co 0,5 μm w interwałach rdzeniowych. Drugim etapem wydzielenia jednostek przepływu jest aproksymowanie posiadanych informacji na obszar złoża położony między otworami. W stosunku do danych pionowych z otworów, które są rozmieszczone gęsto (pomiar karotażowe zwykle co 0,25 μm , a czasem nawet gęściej) w przypadku aproksymacji poziomej odległości pomiędzy punktami pomiarowymi jakimi są otwory najczęściej nie są mniejsze niż kilkaset metrów. Możliwe jest zastosowanie tradycyjnych metod geologicznych lub matematycznych metod statystycznych. Etap ten jest szczególnie trudny w przypadkach z małą ilością danych (mała liczba otworów) lub ich nieregularną dystrybucją. Prosta i efektywna jest kombinacja tradycyjnego tworzenia map porowatości i przepuszczalności z zastosowaniem numerycznych metod ich obliczania. Możliwe jest dobranie odpowiedniego algorytmu obliczającego siatkę węzłów w zależności od dystrybucji danych. Siatka węzłów (popularnie zwana także gridem) pozwala na rysowanie konturów mapy w oparciu o regularną dystrybucję przetworzonych danych, mimo nieregularnej dystrybucji pierwotnych danych pomiarowych. Obliczana jest przez program komputerowy przy zadanych parametrach odległości między węzłami siatki (x i y) oraz zadany promieniu szukania (r), (ryc. 3). Program oblicza średnią wartości danych pomiarowych, znajdujących się

wewnątrz promienia szukania, według odpowiednio dobranego do ich dystrybucji algorytmu. W ten sposób następuje przejście z nieregularnego rozkładu danych pierwotnych na regularną siatkę węzłów, według której są rysowane kontury. Danymi pomiarowymi są wartości głębokości zalegania stropu lub spągu jednostki prze-

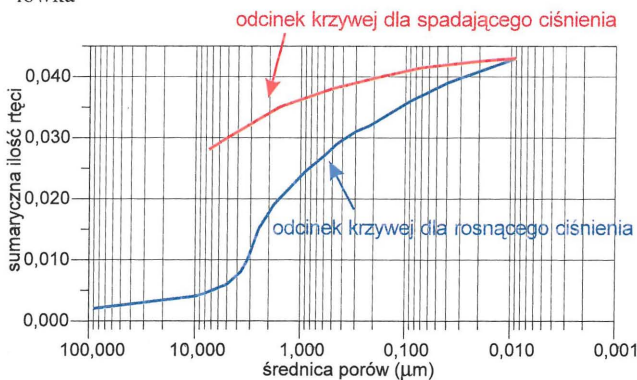
Tab. 2. Zestawienie wyników interpretacji parametrów petrofizycznych dla podhoryzontu XIa złoża gazu ziemnego Jodłówka

Horyzont	Miąższość (m)			Porowatość (%)			Porowatość efektywna (%)			Przepuszczalność (mDarcy)			Nasylenie wodą (%)	
	min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.	min.	maks.	śred.	min.	maks.
XIa_A	2,00	6,50	3,60	0,10	7,75	0,10	0,01	3,00	0,62	0,01	6,65	0,97	47	100
XIa_B	14,0	34,0	27,7	5,50	12,3	8,15	1,63	4,15	2,66	1,00	27,5	13,2	25	100

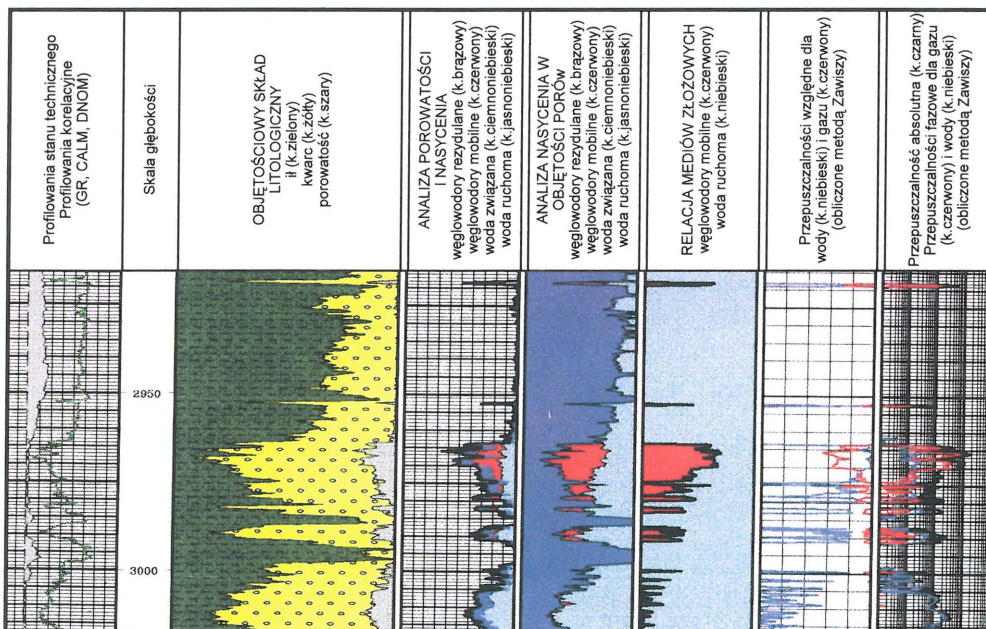
Dane w tabeli pochodzą z otworów Jodłówka 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 98, 12, 15, 16, 22 oraz Pruchnik 2, 77 i 19. Wartości średnie obliczono dla wszystkich 15 otworów. Porowatość efektywną obliczono jako różnicę porowatości całkowitej i przestrzeni porowej zajętej przez wodę



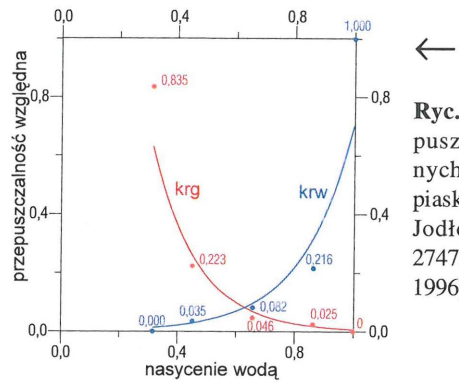
Ryc. 9. Mapa strukturalna stopu podhoryzontu XIa złoża Jodłówka



Ryc. 10. Krzywa kumulacyjna dla piaskowców złoża Jodłówka (otwór J-21, 2942 m), (Zawisza i in., 1996)



Ryc. 12. Interpretacja petrofizyczna wykonana w oparciu o skalibrowane modele fizyczne (Zawisza i in., 1996)



Ryc. 11. Krzywe przepuszczalności względnych dla gazu i wody piaskowców złoża Jodłówka (otwór J-21, 2747,7 m), (Zawisza i in., 1996)

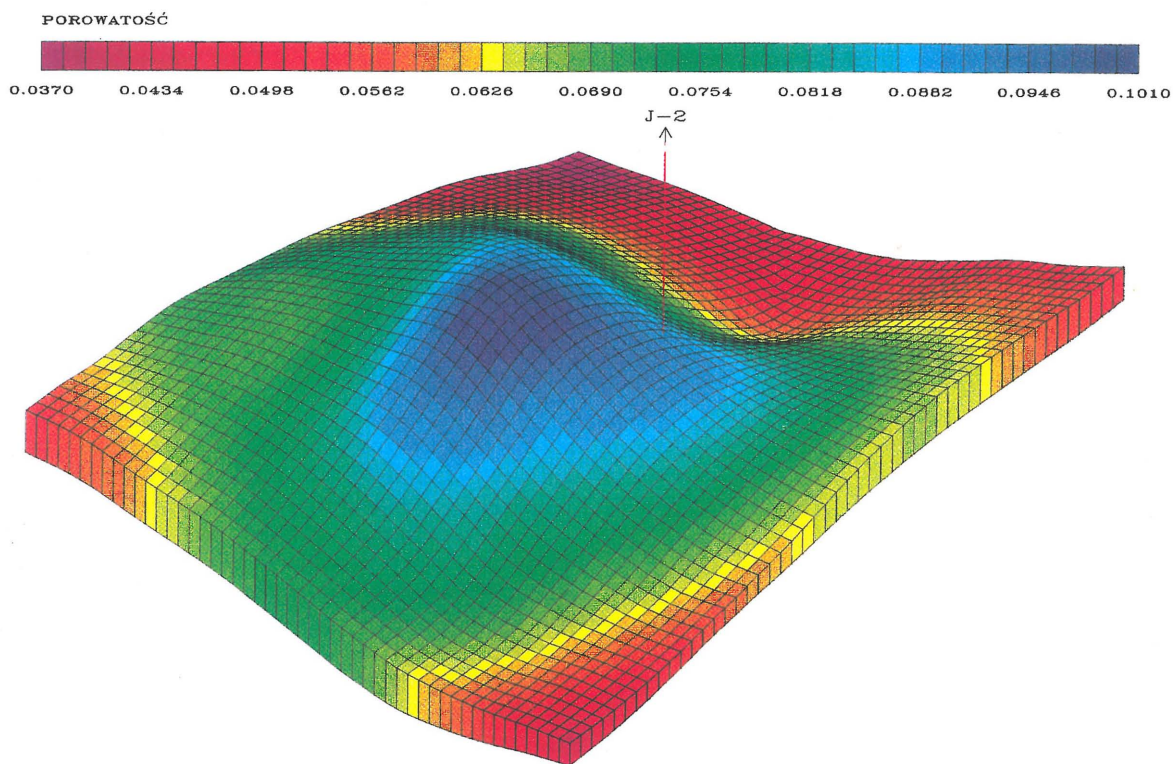
plywu, jej miąższość, wartości jej porowatości, przepuszczalności, nasycenia lub ciśnienia przyporządkowane do współrzędnych lokalizacyjnych otworów wiertniczych.

Analiza doświadczeń w stosowaniu programów do wykonywania map wykazuje, że zmieniają one podział czasu pracy. W metodach tradycyjnych przygotowanie danych zajmuje 60% całego czasu, tworzenie mapy 30, a jej interpretacja tylko 10%. Techniki numeryczne zmniejszają udział czasu przygotowania do 45%, a tworzenia i kontroli do 25%. Zaoszczędzony czas można przesunąć na merytoryczną interpretację wyników (30%).

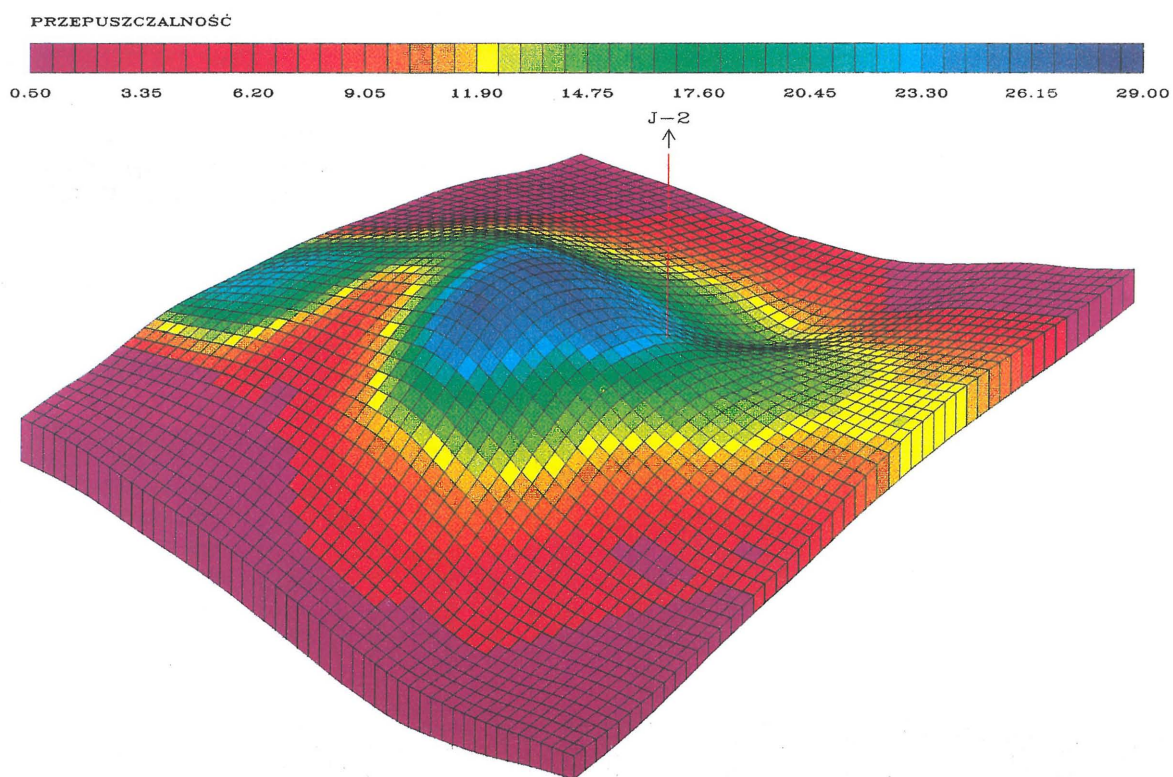
W celu doboru metody tworzenia mapy oraz określania jej parametrów decydujące znaczenie ma dystrybucja danych pomiarowych. W zależności od niej jest stosowana właściwa metoda i algorytm obliczania siatki węzłów. Dane punktowe mogą być rozrzucone przypadkowo w sposób regularny lub nieregularny (*point gridding*), na przykład tak jak dane z otworów wiertniczych. Dane zgrupowane wzdłuż linii to dane sejsmiczne, magnetyczne lub grawimetryczne (*line gridding*). Możliwe jest także zbudowanie siatki węzłów dla zcyfrowanych konturów mapy wcześniej narysowanej ręcznie (*contour gridding*).

Jednym z ciekawszych sposobów wykorzystania komputerowego tworzenia map jest identyfikacja lokalnych zmian danych na podstawie analizy trendu mapy podstawowej. Metoda ta polega na usunięciu z mapy ogólnego trendu zmian, np. strukturalnych lub petrofizycznych, w celu utworzenia mapy rezidualnej lokalnych zmian drugorzędnych (*trend gridding*).

Zbyteńne zagęszczenie siatki węzłów (małe odległości między węzłami x,y) oraz duża wartość promienia szukania r, powodują znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Natomiast zbyt duże odległości między węzłami i mała wartość promienia nie pozwalają na wyeksponowanie często istotnych szczegółów. Sędem właściwego dobrania



Ryc. 13. Przestrzenny obraz rozkładu porowatości w złożu gazu Jodłówka



Ryc. 14. Przestrzenny obraz rozkładu przepuszczalności w złożu gazu Jodłówka

parametrów jest określenie, kiedy wzrost komplikacji mapy jest wynikiem tylko matematycznego przetwarzania danych, a przestaje już odzwierciedlać rzeczywiste zmiany ich dystrybucji.

Ogromną zaletą stosowania siatki węzłów jest możliwość wykonywania na nich działań: dodawania, odejmowa-

nia, mnożenia i dzielenia jednej siatki przez drugą oraz działania na siatkach i liczbach. Niesie to za sobą wręcz nieograniczone możliwości wykonywania różnorodnych analiz, np. analiz paleostrukтурalnych.

Wykonanie map strukturalnych, miąższościowych, petrofizycznych i nasyceń płynami dla jednostek przepływu

musi być poprzedzone właściwą ich korelacją w otworach wiertniczych oraz w przypadku korzystania z danych sejsmicznych, powiązaniem danych otworowych z przekrojami czasowymi. Przy wykonywaniu korelacji posługujemy się wynikami pomiarów geofizyki wiertniczej, przede wszystkim krzywymi profilowań gamma, a dopiero w drugiej kolejności profilowaniami elektrycznymi i neutronowymi. Profilowanie gamma odzwierciedla litologię, natomiast te drugie także nasycenie (Brzeżański i in., 1995).

Do tworzenia map stosujemy również wyniki badań laboratoryjnych oraz dane uzyskane z testów otworowych. Pamiętać jednak należy o tym, że każdy z tych pomiarów inaczej opisuje skałę. Pomiar laboratoryjny ma zazwyczaj charakter punktowy i odnosi się do małej próbki skalnej. Największą wartość przedstawiają w przypadku złóż o małej zmienności mierzonych parametrów. Geofizyka otworowa daje zapis ciągły i opisuje dany parametr w nieco szerszym promieniu, zależnym od rodzaju pomiaru i typu sondy. Najbardziej uśrednione są pomiary uzyskane z testów hydrodynamicznych i dotyczą największego obszaru wokół otworu.

Podział złoża na jednostki przepływu odzwierciedla pionowe zróżnicowanie właściwości zbiornikowych lub obecność barier dla przepływów. Każda jednostka ma własną mapę strukturalną, miąższości, porowatości i przepuszczalności.

Aproksymacja rozkładu właściwości petrofizycznych powinna zostać poparta informacjami geologicznymi o ich zmienności uzyskanymi ze zdjęć sejsmicznych 3D. Analiza amplitudowa zdjęcia 3D może być podstawą określenia rozkładu własności zbiornikowych skał i rodzaju płynu wypełniającego ich pory. Zmienność map amplitudy może sugerować trendy zmian litologii, względnych zmian zapaszczenia, porowatości oraz nasycenia skał węglowodorami. W takim przypadku ekstrapolacja danych otworowych na obszar pomiędzy nimi może być ukierunkowana danymi uzyskanymi za pomocą pomiaru bezpośredniego. Dzięki sejsmice 3D jest możliwe także wyznaczenie kontaktów między płynami złożowymi (Sheriff & Geldart, 1995).

Wielokrotnie wykonanie trójwymiarowego zdjęcia sejsmicznego dla eksploatowanego złoża i porównanie z wynikami zdjęcia pierwotnego jest formą nowoczesnego monitoringu sejsmiczno-złożowego. Dla tego typu technologii przyjęto nowe określenie — sejsmika 4D, ponieważ określa zmianę charakterystyki sejsmicznej ośrodka w czasie. Zmiana ta jest następstwem ruchu płynów złożowych, zmian ciśnień oraz temperatury. Rejestrowane przez zdjęcie sejsmiczne 4D przesuwanie się kontaktów między gazem i wodą lub gazem i ropą w sposób unikalny opisuje zachowanie się złoża pomiędzy otworami. Efektywność tej technologii jest uzależniona od właściwości fizycznych skał i płynów złożowych, stopnia komplikacji budowy geologicznej oraz od jakości wykonanego zdjęcia sejsmicznego (Gawith & Gutteridge, 1996).

Końcowym etapem wydzielenia jednostek przepływu jest przetworzenie zbudowanego modelu geologicznego na model symulacyjny. **Model geologiczny** składa się z wielu powierzchni opisanych za pomocą map strukturalnych i map petrofizycznych, jest więc w pełni trójwymiarowy. Ma on charakter geostatystyczny, wybitnie statyczny, opisuje bowiem własności niezmiennące się w czasie. **Model symulacyjny** składa się z wielu komórek ułożonych w warstwy odpowiadające jednostkom przepływu. Każda komórka ma określone na podstawie map współrzędne naroży i centrum oraz przyporządkowane wartości parametrów petrofizycznych. Model symulacyjny jest

zwykle nieregularny dla oddania regionalnych trendów i uwzględnia uskoki. Ma charakter dynamiczny, ponieważ jest stosowany do przewidywania zachowania się złoża w przyszłości w celu optymalizacji eksploatacji.

W przestrzennym modelu symulacyjnym każda wydzielona komórka ma przyporządkowaną wartość porowatości, ciśnienia złożowego, przepuszczalności i nasycenia mediami złożowymi. Stopień komplikacji modelu zależy od budowy geologicznej, od naszych oczekiwań co do jego obiektywności oraz jakości posiadanych komputerów. Proste modele mogą składać się z 100–150 komórek, ale w zaawansowanej symulacji, przy dużych zmianach właściwości zbiornikowych i obecności uskoków, możliwe jest użycie nawet 20 000.

Modele symulacyjne mogą być umieszczone geometrycznie w układach radialnym lub kartezańskim oraz w zależności od sposobu opisanego układu komórek współrzędnymi w układzie centralnym (*blok centre geometry*) lub układzie z opisanymi narożami (*corner point geometry*), (ryc. 4). Układ radialny jest stosowany zazwyczaj w celu modelowania i symulacji złóż z pojedynczymi otworami. Jego początkiem jest otwór wiertniczy. W układzie centralnym (*blok centre geometry*) bloki mogą być tylko poziome, a wszystkie 8 naroży każdej komórki ma kąty proste. Każdy blok definiowany jest przez wymiary jego trzech boków oraz głębokość górnej powierzchni. W układzie z opisanymi narożami (*corner point geometry*) ich kąty nie muszą być prostymi, a komórka określona jest przez podanie współrzędnych aż 24 naroży.

Kartezański układ centralny szczególnie dobrze opisuje złoża pocięte uskokami. Dlatego mapy stosowane do budowania modelu powinny je zawierać w przypadku złóż zdyslokowanych. W konwencjonalnym modelu komórkowym każda komórka ma tylko jedną sąsiadującą w każdym kierunku. W ten sposób w układzie dwuwymiarowym może ich być maksymalnie 4, a w układzie trójwymiarowym sześć. Zaawansowane symulatory pozwalają na połączenie ze sobą wybranych par niesąsiadujących komórek i ustalenie między nimi bezpośredniego przepływu (ryc. 5). Jest to szczególnie istotne przy modelowaniu złóż zdyslokowanych, umożliwia bowiem określenie przepływu między częściami warstwy przeciętej uskokami.

Określone z pomiarów geofizyki wiertniczej początkowe nasycenia ropą, gazem i wodą złożową podlegają nieco innym zasadom pionowej aproksymacji. Uzależnione są od wybranego sposobu ustalania rozkładu nasycień przez symulator. Możliwe jest ich wczytanie z wyników wcześniejszej symulacji, zlecenie obliczeń symulatorowi według jednej z kilku dostępnych metod lub określenie ich z krzywych karotażowych i przyporządkowanie wartości dla każdej komórki modelu. W tym ostatnim przypadku stwierdzenie wyraźnych różnic nasycień lub wyraźnej stratyfikacji poszczególnych mediów jest podstawą dla wydzielenia odrębnych jednostek przepływu. Pamiętać należy, że nasycenia ropą, gazem i wodą powyżej i poniżej kontaktów lub stref przejściowych będą zdeterminowane przez podanie maksymalnych i minimalnych ich wartości.

W złożach do których jest zatłaczana woda o innym zasoleniu niż złożowa, w czasie symulacji uwzględnione jest ich mieszanie, ponieważ następstwem zmiany zasolenia jest zmiana gęstości i lepkości wody. Symulator bierze pod uwagę także mieszanie się różnych typów ropy oraz zmiany porowatości będące skutkiem spadku ciśnienia w złożu w wyniku eksploatacji oraz jego wzrostu w czasie zatłaczania.

Modelowanie i symulacja złoża Jodłówka

Wstępna charakterystyka złoża

Złoże gazu ziemnego Jodłówka znajduje się w osadach miocenu wschodniej części zapadliska przedkarpackiego (ryc. 6). Prace poszukiwawcze, które doprowadziły do jego odkrycia i udokumentowania rozpoczęto pod koniec lat siedemdziesiątych. Pierwszym otworem, z którego uzyskano przyływ gazu był otwór J-2. W latach 1982–1992 z horyzontu XIa wydobyto ponad 43 mln Nm³ gazu przy spadku ciśnienia dennego z 326 do 269 barów (wolny wypływ z 81,0 do 64,5 Nm³/min, dozwolony z 17,0 do 12,0 Nm³/min). Pierwotne zasoby geologiczne tylko w tym jednym podhoryzoncie określono na ponad 830 mln Nm³, a przemysłowe na ponad 650. Charakterystyczne dla złóż wielohoryzontowych jakim jest Jodłówka, są duże zasoby w przeliczeniu na jednostkę powierzchni złoża. Całkowita jego powierzchnia wynosi tylko ok. 3,3 km², natomiast sumaryczna miąższość poziomów gazonośnych aż ok. 500 metrów (Borys, 1996).

Geometria zbiornika

Na obecnym etapie badań, złożo Jodłówka jest uznawane za dość regularną formę antyklinalną ograniczoną stromym skrzydłem od południa i płytkimi strefami synklinalnymi od północy, wschodu i zachodu. Jej amplituda liczona od synklinalnych zamknięć do szczytu wynosi średnio ok. 40 m. Niższe horyzonty mają większą amplitudę zamknięć, wyższe zaś ulegają stopniowo rozplaszczeniu. Jest to charakterystyczne dla form o charakterze kompakcyjnym. Prowadzone obecnie prace interpretacyjne zdjęcia sejsmicznego 3D oraz prace wiertnicze powinny bardziej szczegółowo wyjaśnić budowę geologiczną, w tym między innymi dokładny obraz strukturalny poszczególnych horyzontów oraz rolę jaką pełni w nim tektonika dysjunktywna. Niestety, obecność charakterystycznej ciszy sejsmicznej w rejonie złoża bardzo utrudnia prawidłowe odwzorowanie strukturalne powierzchni horyzontów, a interpretacja właściwości petrofizycznych i nasyceń jest zupełnie niemożliwa do wykonania. Wiadomo już jednak, że złożo od strony południowej jest obciążone synsedymacyjną dyslokacją. Podobne, często jednak słabiej zarysowujące się nieciągłości widoczne są także w innych częściach rejonu okołozłożowego. Trudności w ich interpretacji wynikają z monotonnego charakteru litologii miocenu, ze stosunkowo niedużych ich zrzutów, być może przesuwczego ich charakteru oraz występującej tutaj małej czytelności zapisu sejsmicznego. Ta ostatnia jest związana z faktem, że w rejonie złożowym nasycone jest gazem prawie 500 m profilu skał miocenu.

W dokumentacji z 1993 r. w profilu warstw autochtonicznych miocenu wydzielono 7 zasadniczych poziomów piaskowcowych, od VI do XII. Uwzględniając wykształcenie poziomów piaskowcowych, wyniki opróbowań i ocenę gazonośności opartą o pomiary karotażowe, w trakcie rozpoznawania złoża, horyzonty rozdzielono na kolejne podhoryzonty. Dla większości z nich można ustalić odrębne kontury wody złożowej (Plezia & Gąsior, 1993, 1995).

Do modelowania złożowego wybrano horyzont XIa, jako jedyny z którego wyeksploatowano znaczącą ilość gazu. Jego szczegółowe położenie w obrębie horyzontu XI przedstawiono na ryc. 7. Skałą zbiornikową są tutaj drobnoziarniste, szare, o różnym stopniu zailenia piaskowce, mu-

łowce i łupki zapiaszczone. Uszczelnieniem dla poszczególnych poziomów są nieprzepuszczalne przewarstwienia szarych, ciemnoszarych i popielatych wapnistych łupków, czasem zapiaszczonych i laminowanych mułowcem i piaskowcem barwy jasnoszarej.

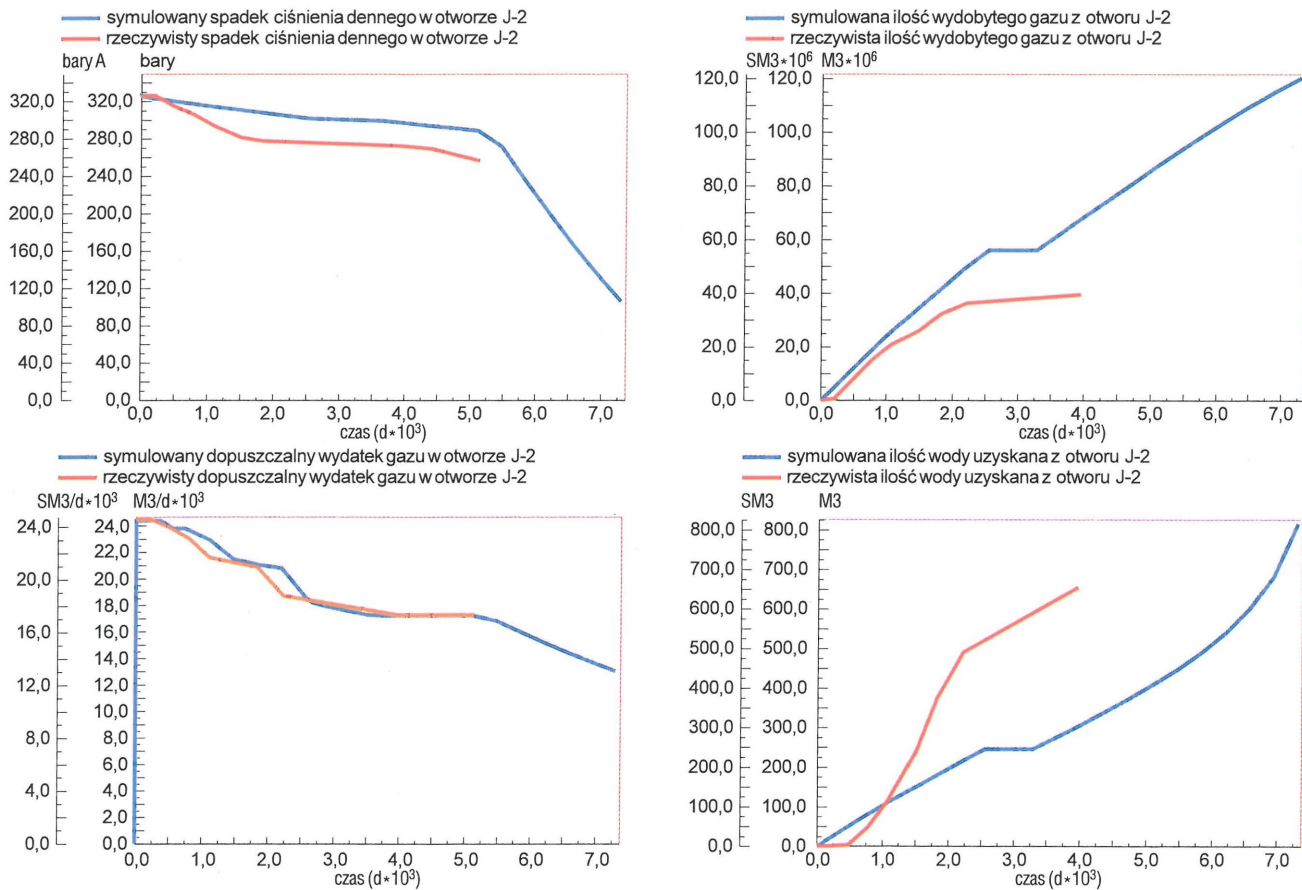
Charakterystyka modelu — zdefiniowanie jednostek przepływu

Dla celów symulacji podhoryzont XIa podzielono na dwie jednostki przepływu: wyższą, ilastą o mniejszej miąższości, dalej nazywaną XIa A i niższą, piaskowcową XIa B. Podział taki uzasadniają znaczne pionowe różnice zailenia, porowatości i przepuszczalności (tab. 2, ryc. 8). W związku z tym, początkowo model podhoryzontu składał się z dwóch warstw niezależnie opisanych przez mapy strukturalne, miąższościowe, porowatości, przepuszczalności i zawodnienia (ryc. 9). W pierwszym etapie analizy przyjęto wartości porowatości i przepuszczalności obliczone w programie PetroWorks, w drugim korzystano z obliczeń programu LogAn. Wartości obliczone z pomiarów geofizyki wiertniczej porównano z dostępnymi danymi laboratoryjnymi, a następnie policzono ich średnie wartości dla każdego otworu, innymi metodami dla każdej jednostki przepływu. I tak dla jednostki ilastej XIa A poziomą przepuszczalność efektywną obliczono jako średnią arytmetyczną, natomiast dla jednostki przepływu piaskowcowej XIa B jako średnią geometryczną. Stosunek przepuszczalności poziomej do pionowej przyjęto jako 0,5. Porowatość dla obu jednostek przepływu obliczono jako ważoną średnią arytmetyczną. Mapy strukturalne, miąższościowe i petrofizyczne wykonano w programie StratWorks po wprowadzeniu potrzebnych danych do bazy OpenWorks, poprawiono w programie do tworzenia i edycji map ZMAP Plus i przeniesiono do programu modelującego geometrię, należącego do zintegrowanego pakietu do symulacji złóż firmy Intera.

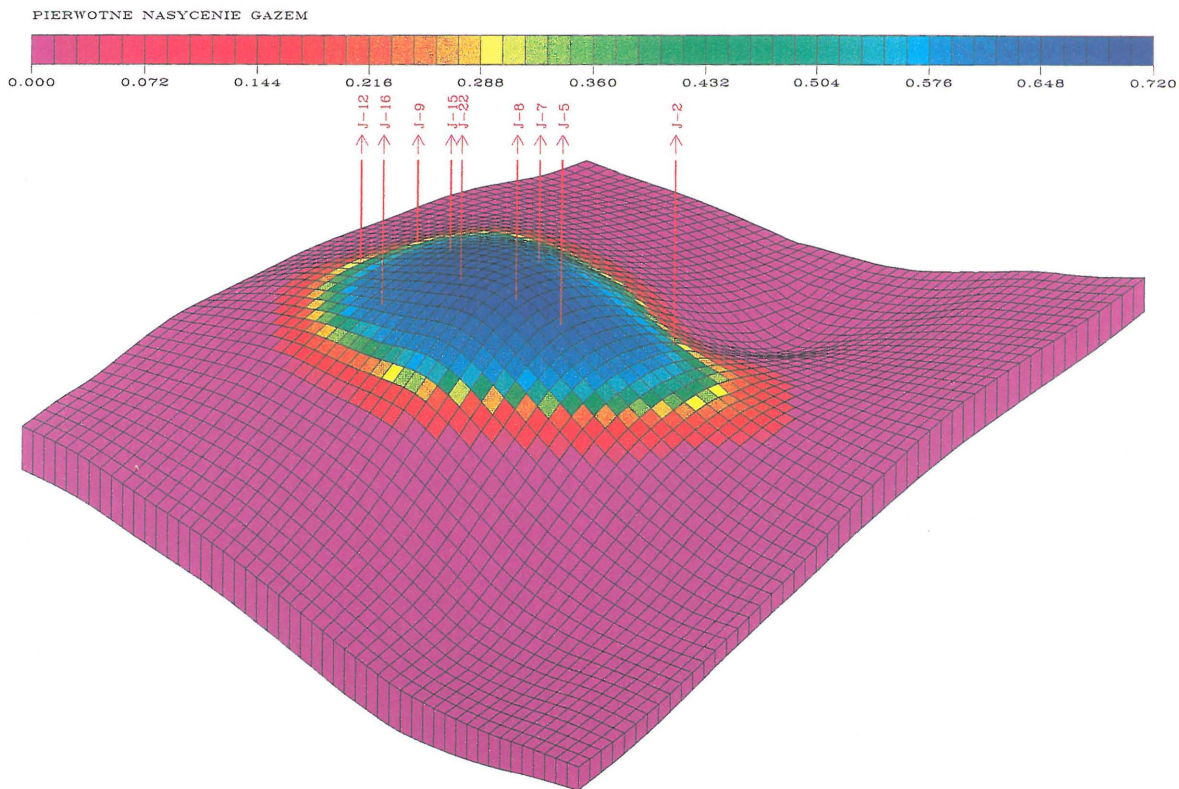
Model podhoryzontu XIa zbudowano w układzie kartezyjskim z opisanymi narożami komórek (*corner point geometry*). Składa się z 5000 komórek (dwa razy po 50 x 50). Każdej komórce przyporządkowano z map wartości porowatości, przepuszczalności, nasyceń wodą oraz ciśnienia złożowego.

Petrografia skał zbiornikowych i charakterystyka systemu porowatościowego

Skały zbiornikowe pod względem petrograficznym to wapniste waki mułowcowe o teksturze od średnio- i gruboaleurytowej do drobnopiaszczystej (opis wg P. Śmista). Szkielet ziarnowy jest zdominowany przez kwarc (30–60%), podrzędnie występuje muskowit, biotyt, chloryt, glaukonit, syderyt, krzemionka w postaci chalcedonu oraz skałenie. Matriks tworzą drobna frakcja ilasta, muł wapienny, drobny pył kwarcowy oraz wiele nieprzeźroczystych zanieczyszczeń. Zawartość kalcytu sięga 16–18%. Występuje on w postaci pierwotnego synsedymacyjnego mułu wapiennego, w postaci ścianek otwornic oraz jako autigeniczny minerał wytrącony z roztworu. Zarówno ten wytrącony z wód porowych, jak i zrekrystalizowany z mułu wapiennego tworzą jeden z rodzajów spoiwa. Drugim jest marglista pelitowo-tuseczkowa matriks złożona z mikrytu wapiennego, pyłu ziarnistego i ilastego pelitu. Spoiwo złożone z mułu wapiennego i pelitu ilastego wypełnia pory, natomiast ma-



Ryc. 15. Porównanie rzeczywistych i symulowanych wyników produkcyjnych z otworu J-2



Ryc. 16. Przestrzenny model podhorizontu XIa z rozkładem pierwotnego nasycenia gazem ziemnym

teriał łuseczkowy wyściela ich ścianki. Dominującym typem spoiwa jest jednak kalcyt wykształcony jako typowy międzyziarnowy cement krystaliczny. Minerale ilaste to głównie kaolinit i illit.

Na właściwości zbiornikowe skał złoża Jodłówka decydujący wpływ wywarły procesy diagenetyczne. W ich trakcie następowało rozpuszczanie glinokrzemianów i kwarcu, rekrystalizacja mułu wapiennego i powstawanie kaolinitu i illitu kosztem muskowitu. Dodatkowo zmniejszanie porów powodowała precypitacja kalcytu oraz wciskanie miękkich i elastycznych łuszczyków, glaukonitu i ilu w przestrzenie międzyziarnowe.

Interpretacja badań porozymetrycznych daje charakterystykę przestrzeni porowej o nie najlepszych zdolnościach do transportu płynów złożowych (Zawisza i in., 1996). Wskazują na to niska wartość średniej kapilary, w większości próbek pomiarowych nieprzekraczająca wielkości 0,36 μm , oraz niski udział porów większych od 1 μm . Udział w przewodzeniu płynów porów o średnicy mniejszej niż 0,2 μm jest minimalny. Złożowo mają one znaczenie przy przepływie płynów z mniejszych do większych porów, nie mają natomiast znaczenia przy transporcie płynów w kierunku odwiertów. Przebieg krzywej kumulacyjnej uzyskanej w wyniku pomiarów ciśnień kapilarnych jest w większości przypadków łagodny, ze słabo zaznaczoną średnicą progową (punktem przegięcia krzywej) i rozmytą wartością modalną średnicy porów. Charakterystyczne jest występowanie efektu histerezy, co świadczy o wykształceniu przestrzeni porowej w postaci wydłużonych porów o stożkowatych kształtach (ryc. 10).

Badania przepuszczalności fazowych dla gazu i wody wyraźnie wskazują, że już niewielkie zmiany nasycenia wodą powodują znaczne spadki przepuszczalności dla gazu. Wynika z tego stromość wykresów przepuszczalności względnych (ryc. 11).

W osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego, w obrębie lokalnych struktur, rozkład porowatości i przepuszczalności często wykazuje związek ich wartości z położeniem strukturalnym. Wyższe położenie strukturalne oznacza zazwyczaj niższe wartości zapiaszczenia, a co za tym idzie porowatości i przepuszczalności. Przeciwnie w piaszczystej części podhoryzontu XIa najwyższe porowatości i przepuszczalności stwierdzono w kulminacji strukturalnej, szczególnie po jej wschodniej stronie, natomiast najniższe w obniżeniach synklinalnych. Wskazuje to na to, że opisana wyżej zależność nie wynika z bezpośredniego związku porowatości i przepuszczalności z wysokością strukturalną, ale jest następstwem związku wysokości strukturalnej z określoną facją sedymentacyjną (ryc. 13, 14).

Nasycenie gazem i ciśnienia złożowe są najwyższe we wschodniej części struktury. Szczególnie interesujące jest zróżnicowanie ciśnień złożowych na dwa odrębne regiony: północno-wschodni i południowo-zachodni. Taki rozkład ciśnień oraz porowatości i przepuszczalności wydaje się wskazywać na większe zróżnicowanie lateralne modelowanego podhoryzontu.

Wyniki pomiarów laboratoryjnych zawartości wody związanej, porowatości, ciśnień kapilarnych, przepuszczalności absolutnej i przepuszczalności fazowych wykonane dla otworów J-15, 21 i 25 stały się podstawą do skalibrowania modeli fizycznych i podjęcia próby obliczenia zawartości wody związanej i przepuszczalności na bazie pomiarów geofizyki wiertniczej (ryc. 12) (Zawisza i in., 1996).

Charakterystyka symulacji

Po przeanalizowaniu wyników pierwszych symulacji stwierdzono, że wartości porowatości i przepuszczalności w jednostce ilastej podhoryzontu XIa są tak niskie, że dla uproszczenia modelu można ją pominąć (średnia miąższość 3,6 m, porowatość 1%, przepuszczalność 0,97 mDarcy, minimalne zawodnienie 40%). W związku z tym zweryfikowano model i pozostawiono jedynie drugą, piaszczystą warstwę podhoryzontu (wymiary 50 x 50 x 1).

W czasie modelowania i symulacji podhoryzontu XIa:

— założono stosunek przepuszczalności pionowej do poziomej 0,5;

— współczynniki objętościowe oraz tabele PVT dla gazu i wody wygenerowano w programie PVT na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych;

— krzywe przepuszczalności względnych najpierw aproksymowano zgodnie z posiadanymi danymi o nasyceniach i zasadami skalowania nasycen stosowanymi przez program, a następnie korzystano z badań laboratoryjnych,

— dla otworów pozytywnych jako promień drenażu przyjęto wartości od 200 do 500 metrów lub ekwiwalentny promień komórki modelu oraz określono, że w czasie symulowanej eksploatacji otwór zostanie automatycznie zamknięty, jeżeli zostaną przekroczone ustalone limity ciśnienia dennego lub dopuszczalnego wydatku gazu i ponownie otwarty przy wzroście ciśnienia.

W pierwszej fazie modelowania wykonano:

1) kalkulacje pierwotnych warunków nasycenia standardową metodą *hydrostatic equilibrium* oraz symulacje eksploatacji. Eksploatację kontrolowano przez ustalenie dopuszczalnych wydatków określonych na podstawie testów produkcyjnych oraz 5% spadku ciśnienia. Do kalibracji modelu użyto rzeczywistych danych produkcyjnych z otworu J-2 w latach 1982–1995. Następnie symulowano eksploatację z 9 otworów (J-2, 5, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 22) przez kolejnych 10 lat.

2) kalkulacje pierwotnych warunków nasycenia metodą *vertical equilibrium* oraz ponowną symulację eksploatacji i kalibrację modelu.

Zastosowane określanie rozkładu nasycen metodą *hydrostatic equilibrium* wymaga podania wielu danych, między innymi ciśnienia dla danej głębokości, pozycji kontaktu gaz/woda, wartości ciśnień kapilarnych na kontakcie, zawartości w gazie węglowodorów powyżej C^{3+} i tabel przepuszczalności względnych. W związku z brakiem lub niedoskonałością niektórych danych w drugim etapie określono rozkład nasycen na podstawie pomiarów geofizyki otworowej.

W drugiej fazie modelowania i symulacji:

3) wczytano wariantowo pierwotne nasycenia obliczone z pomiarów geofizyki otworowej i prób otworowych. Do kalibracji ponownie użyto rzeczywistych danych produkcyjnych z otworu J-2 w latach 1982–1995. Następnie symulowano eksploatację z 9 otworów (J-2, 5, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 22) przez kolejnych 10 lat.

4) porównano rzeczywiste krzywe spadku ciśnień złożowych, ilości wydobytego gazu i wody w otworze J-2 oraz te aproksymowane w czasie symulacji przy tych samych dozwolonych poborach w celu sprawdzenia poprawności modelu.

5) przeanalizowano krzywe produkcyjne dla otworu J-2 oraz krzywe spadku zasobów i spadku ciśnień obliczone dla całego złoża.

6) przeanalizowano uzyskane wyniki przestrzennego rozkładu nasycen oraz ciśnień, a także kierunki przemieszczania się płynów w złożu.

Wyniki symulacji i wnioski

Modelując złożę kierowano się trzema podstawowymi zasadami:

- model powinien być tak prosty, jak tylko jest to możliwe,
- jakość danych powinna być weryfikowalna,
- rezultaty powinny być do udowodnienia.

Dwa pierwsze warunki można uznać za spełnione. Model przyjęto odpowiednio prosty dla obecnie ustalonej zmienności geometrii złoża oraz parametrów petrofizycznych. Na tym etapie przebadania wydaje się on zupełnie adekwatny do posiadanych informacji. Być może, konieczne poprawki dotyczące zmienności regionalnej zbiornika zostaną określone na podstawie danych uzyskanych w trakcie prowadzonych prac interpretacyjnych oraz przyszłej eksploatacji kolejnych otworów.

Jakość posiadanych i użytych do symulacji danych w części dotyczącej geometrii złoża na dzień dzisiejszy jest zadawalająca. Pewne uproszczenia wynikają z oparcia się jedynie o dane otworowe. Wydaje się także, że przyjmowana hydrodynamiczna jednolitość zbiornika w obrębie poszczególnych horyzontów powinna być w przyszłości zweryfikowana. W przypadku modelowanego podhoryzontu XIa analiza rozkładu porowatości i przepuszczalności pokazuje, że mogą być one odpowiedzialne za znaczne poziome różnice ciśnień złożowych. Dokładniej, obecność dwóch regionów różniących się ciśnieniami, północno-wschodniego i południowo-zachodniego, może być następstwem istnienia bariery dla przepływu, na co wskazuje strefa obniżonych porowatości i przepuszczalności w rejonie otworu J-16.

Znacznym mankamentem modelu jest brak pomierzonych laboratoryjnie własności PVT dla gazu ziemnego, a przede wszystkim nadal słabo rozpoznana zmienność przepuszczalności względnych i ciśnień kapilarnych.

Zasadniczym pytaniem, które trzeba zadać na zakończenie jest, jaka jest wartość opracowanego modelu? Próbowano na nie odpowiedzieć poprzez porównanie rzeczywistych danych produkcyjnych z eksploatowanego otworu J-2 i danych uzyskanych w czasie symulacji przy założeniu tych samych dopuszczalnych wydatków. Porównano krzywe spadku ciśnienia, ilości uzyskanego gazu oraz wody (ryc. 15). We wszystkich przypadkach krzywe symulowane zachowują właściwy trend wzrostu lub spadku poszczególnych parametrów. Szczegółowa analiza wykazuje jednak, że rzeczywisty spadek ciśnienia jest nieco większy niż symulowany (rzeczywisty z 326 do 269 barów, symulowany do 290), natomiast ilość wyeksploatowanego gazu w czasie symulacji jest wyższa, a ilość wody niższa.

Końcowe odcinki symulowanych krzywych na wykresach produkcyjnych odpowiadają symulacji wydobycia z 9 otworów przez okres kolejnych 10 lat. Założono dopuszczalne wydatki gazu przy 5% spadku ciśnienia dennego. Dla części otworów typowy jest stosunkowo szybki spadek ciśnienia złożowego i podobny przyrost ilości wody, co sugeruje określenie niższych poborów. Szczególnie dotyczy to otworów ze strefy obniżonych ciśnień złożowych (J-9, 15, 22).

Różnice w wynikach symulowanych i rzeczywistych pokazują, że model nie jest w pełni zadawalający. Biorąc jednak pod uwagę lukę w użytym zespole danych, wydaje się być dość poprawny (ryc. 16). **W celu jego korekty jest konieczne:**

- ustalenie na podstawie zdjęcia sejsmicznego 3D dokładniejszego obrazu strukturalnego, w tym określenie ostatecznych granic złoża oraz roli jaką pełnią w jego budowie zaobserwowane dyslokacje,
- przeanalizowanie w czasie eksploatacji kolejnych otworów lokalnych poziomych różnic ciśnień złożowych,
- wykonanie dodatkowych kompleksowych badań zmienności właściwości petrofizycznych skał zbiornikowych, a w szczególności przepuszczalności względnych i ciśnień kapilarnych,
- wykonanie laboratoryjnych badań PVT dla gazu ziemnego z kilku otworów w celu ich uściślenia oraz określenia ich zmienności lateralnej.

Literatura

- BORYS Z. 1996 — *Prz. Geol.*, 44: 1019–1023.
 BRZEŻAŃSKI A., KARPIŃSKI J., MADEJ K., MYŚLIWIEC M. & SIUPIK J. 1995 — *Oil and Gas from Poland*, 5: 129–139.
 GAWITH D.E. & GUTTERIDGE P.A. 1996 — *Petroleum Geoscience*, 2: 97–103.
Eclipse 100 Technical description 1996 — Schlumberger, GeoQuest.
 KRAMERS J.W. 1993 — *Reservoir characterisation case study; the Provost Upper Mannville B Tool*. Edmonton, Canada, Alberta Oil Sands Technology and Research Authority.
 KRUCZEK J. & SUCH P. 1995 — *Prz. Geol.*, 43: 291–294.
 KRUCZEK J. & SUCH P. 1995 — [In:] *Conference and Exhibition Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods: 72–74*.
 MALISZEWSKA A. 1996 — *Prz. Geol.*, 44: 586–595.
 MAYER-GURR A. 1975 — *A Petroleum Engineering*. Wiley & Sons Ltd., New York.
 MYŚLIWIEC M., MADEJ K., KARPIŃSKI J. & SIUPIK J. 1995 — [In:] *Application of Mathematical Methods in Science and Technique*. Cracow: 463–489.
 MYŚLIWIEC M. 1996 — [In:] *The 2nd Conference on The Geochemical and Petrophysical Investigations in Oil and Gas Exploration*. Janowice by Cracow: 198–217.
 PLEZIA B. & GAŚSIOR S. 1993 — *Dokumentacja geologiczna złoża gazu ziemnego Jodłówka. Dodatek nr 1*. Arch. PNiG Jasło.
 PLEZIA B. & GAŚSIOR S. 1995 — *Dokumentacja geologiczna złoża gazu ziemnego Jodłówka. Dodatek nr 2*. Ibidem.
 SHERIFF R.F. & GELDART L.P. 1995 — *Exploration seismology*. Cambridge.
 SUCH P. 1994 — [In:] *I Konferencja Badania geochemiczne i petrofizyczne w poszukiwaniach naftowych*. Balice k. Krakowa: 195–204.
 ZAWISZA L., GADEK W., NOWAK J. & TWARÓG W. 1995 — [In:] *Conference and Exhibition Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods: 194–196*.
 ZAWISZA L., BRZEŻAŃSKI A., GADEK W., MYŚLIWIEC M., NOWAK J., SUCH P., TWARÓG W. & WOJNA-DYLAĞ E. 1996 — *Kalibracja modeli służących do określania własności skał zbiornikowych dla rejonu złoża Jodłówka (miocen) oraz fądu Potoka (warstwy istebniańskie)*. Arch. PNiG Jasło.