

Stanisław Nagy\*

## KOMPUTEROWE PROGRAMY DO MODELOWANIA PROCESU EKSPLOATACJI I ZAGOSPODAROWANIA ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

### 1. WSTĘP

Celem referatu jest przedstawienie podstawowych możliwości stosowania nowych pakietów komputerowe w zakresie inżynierii złożowej i powierzchniowego zagospodarowania gazu i ropy. Cechą wyróżniającą obecne pakiety programowe jest ich dążenie do **integracji procesu zarządzania złożem węglowodorowym**<sup>1)</sup> (rys. 1–5), co sprowadza się do planowania poszukiwania, rozpoznawania, rozwiercania, zintegrowanego interpretowania własności struktur, oceny zasobów, oceny wydajności poszczególnych odwiertów, szacowania ryzyka geologicznego, ryzyka inwestycyjnego etc.

Najważniejszym celem zarządzania złożowego<sup>2)</sup> z wykorzystaniem pakietów programowych jest ekonomiczna optymalizacja wydobycia ropy i gazu. Cele te zwykle można osiągnąć poprzez działania zintegrowane obejmujące następujące zagadnienia:

- identyfikacja i ustalenie wszystkich elementów złoża i ich fizycznych właściwości,
- wariantowe określenie przyszłej wydajności złoża,
- minimalizacja tworzenia niepotrzebnych odwiertów,

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

<sup>1)</sup> Należy odróżnić pojęcie integracji procesu zarządzania złożem od procesu zarządzania przedsiębiorstwem. Ten drugi proces jest sterowany **zintegrowanymi systemami zarządzania**, które stanowią integrację kompleksowych systemów wspomagania zarządzania z systemami wspomagania wytwarzania; obejmuje szereg standardowych modułów obsługujących określone obszary działalności organizacji, tj.: obsługa finansowa, zarządzanie i rozliczanie kosztów, gospodarka środkami trwałymi, planowanie produkcji, obsługa gospodarki materiałowej, obsługa sprzedaży i dystrybucji, zarządzanie przedsięwzięciami (projektami), zarządzanie kadrami i płacami, kontrola i utrzymanie jakości, etc.

<sup>2)</sup> Jako definicję **zintegrowanego zarządzania złożem** przyjmuje się: „praktykę zarządzania złożem, przy użyciu zasobów ludzkich, technologicznych i ekonomicznych, służącą maksymalizacji zysków przy minimalizacji zaangażowania kapitałowego i kosztów operacyjnych” (Satter A., J. E. Varnan, M. T. Hoang, 1994).

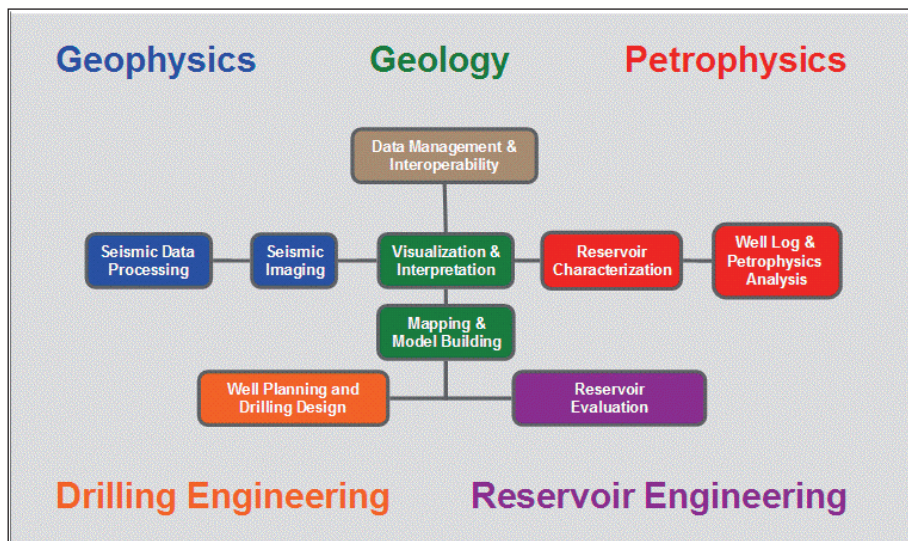
- określenie i modyfikacja odwiertów i instalacji powierzchniowej,
- zintegrowane sterowanie procesem eksploatacji w czasie eksploatacji,
- ocena wszystkich ekonomicznych i prawnych czynników wpływających na proces wydobycia węglowodorów.

Zrozumienie natury złoża węglowodorowego wymaga bardzo dobrej znajomości szeregu zagadnień geologii naftowej, termodynamiki (własności skał i płynów złożowych), inżynierii złożowej (dynamiki przepływów płynów w ośrodkach porowatych i szczelinowatych), wiertnictwa i udostępniania odwiertów, przepływów wielofazowych etc. Takie kompleksowe podejście do zagadnienia zarządzania wymaga w sposób oczywisty rozwiązania w sposób interdyscyplinarny (tab. 1) – wszystkich wymienionych wyżej zagadnień badawczych i projektowych.

**Tabela 1**

Dostępne technologie w poszukiwaniu i eksploatacji złóż (Siemek, Nagy, Rybicki 1995)

Geofizyka	Geologia	Eksploatacja	Inżynieria złożowa
sejsmika 2D	konwencjonalne metody oceny rdzeni	modelowanie optymalizacji kosztów	komputerowo wspomaganą analizą geofizyki wiertniczej
sejsmika 3D	mikroskopia elektronowa	automatyka zbierania danych eksploatacyjnych	interpretacja testów hydrodynamicznych
tomografia odwiertowa	analiza obrazów	symulacja dopływu do odwiertów	konwencjonalna analiza rdzeni
profilowanie VSP	analiza zdjęć roentgenowskich	symulacja pracy sieci powierzchniowej	metody rezonansu magnetycznego
	analiza izotopów trwałych	symulacja przepływów w odwiertach	analiza składu płynów złożowych
	tworzenie modeli depozycji minerałów	analiza węzłowa	analiza krzywej produkcji
	tworzenie modeli diagenetycznych		metody bilansu masowego
	modelownie strukturalne		symulacja przepływów masy i energii
	automatyczne korelowanie warstw		



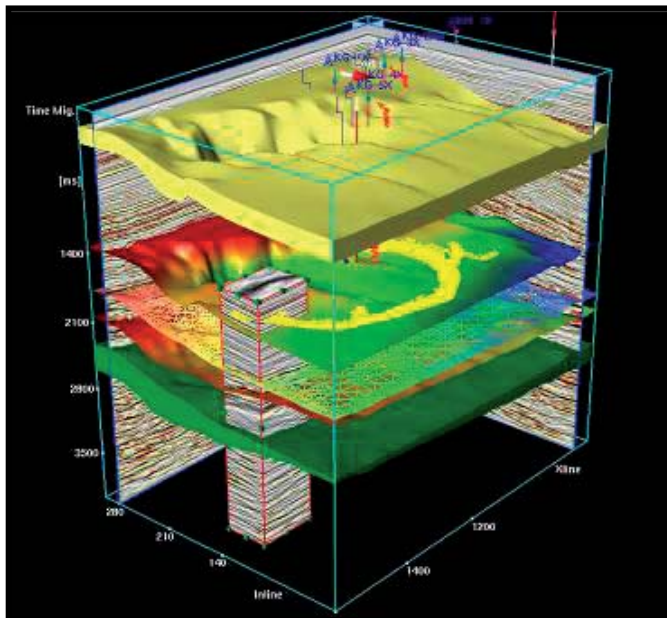
Rys. 1. Przykład integracji procesu zarządzania złożem węglowodorowym z wykorzystaniem zintegrowanych pakietów programowych (Weiss 2004)



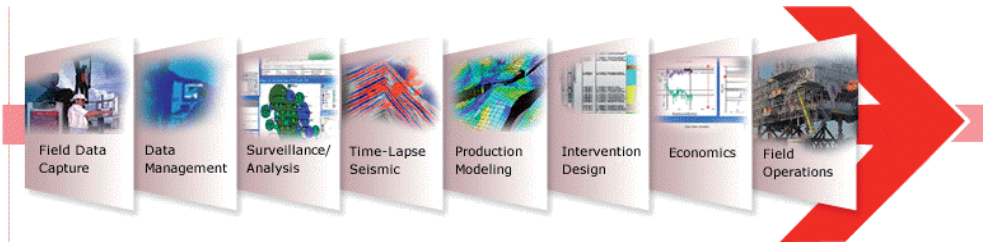
Rys. 2. Zakres prac i badań w procesie zintegrowanego zarządzania złożem węglowodorów (Weiss, 2004)



**Rys. 3.** Iteracyjny proces zintegrowanego zarządzania złożem ropy naftowej i gazu (Siemek, Nagy, Rybicki, 1995)



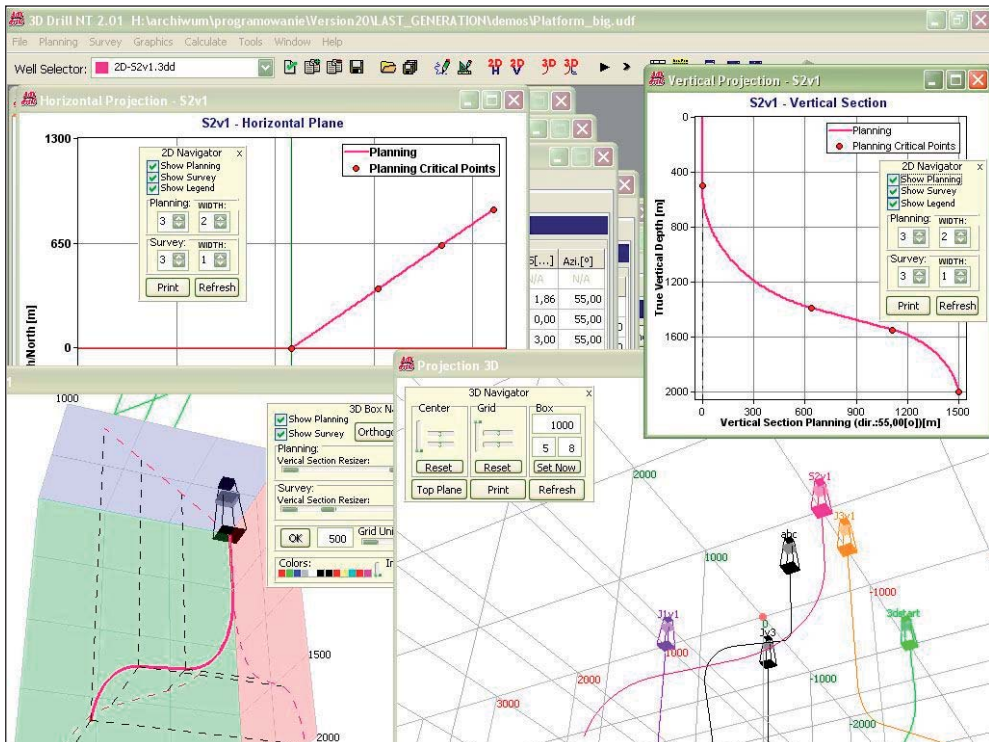
**Rys. 4.** Przykład pełnej wizualizacji informacji geofizycznej, geologicznej złoża węglowodorowego, jako podstawy do podejmowania decyzji w zakresie zagospodarowania złoża (Weiss, 2004)



Rys. 5. Przykład wykorzystania specjalistycznego oprogramowania w procesie podejmowania decyzji (Landmark 2006)

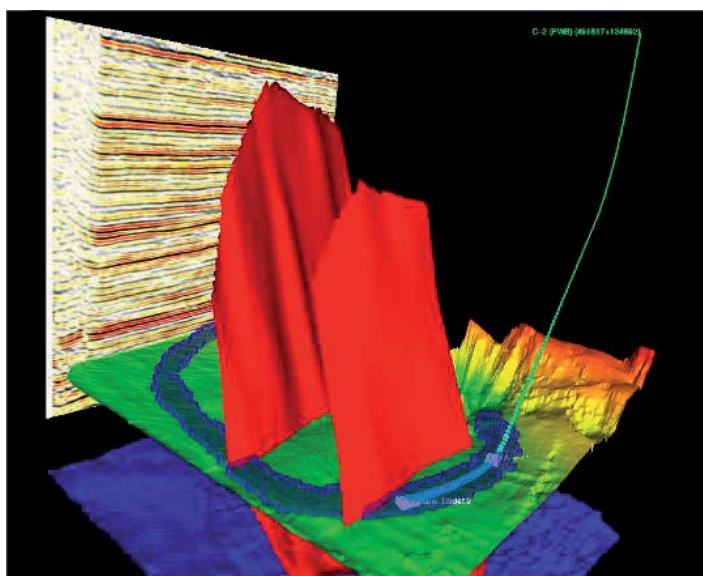
## 2. PROGRAMY WSPOMAGAJĄCE PROJEKTOWANIE WIERCEN KIERUNKOWYCH I POZIOMYCH

W Zakładzie Wiertnictwa i Geoinżynierii, Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie od wielu lat prowadzone są prace naukowo-badawcze,



Rys. 6. Przykład projektowania otworu kierunkowego w programie 3DDRILL (3DDrill, 2006)

zmierzające do optymalizacji procesu projektowania otworów kierunkowych. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń opracowano oryginalne algorytmy i metodyki obliczeniowe, oraz programy numeryczne, umożliwiające podejmowanie właściwych decyzji techniczno-technologicznych. Opracowane programy numeryczne (rys. 6.) związane z: projektowaniem trajektorii otworów wiertniczych (3DDRILL), przeprowadzaniem obliczeń wytrzymałościowych kolumn rur okładzinowych (CASING\_DESIGN), wyznaczaniem sił i momentów tarcia (DRAG&TORQUE), centralizacją kolumn rur okładzinowych (CENTRALIZATION), reologią płynów wiertniczych (RHEOSOLUTION), wykorzystywane są zarówno w pracach badawczych jak również w aplikacjach przemysłowych. (firmy Dalbis, Diament, RWE) (3DDrill, 2006). Innym przykładem Wykorzystanie pakietu Paradigm (Sysdrill DirectorGeo) do procesu planowania i sterowania wiercenia odwiertu kierunkowego/poziomego (zob. rys. 7), (Weiss, 2004).



**Rys. 7.** Wykorzystanie pakietu Paradigm (Sysdrill DirectorGeo) do procesu planowania i sterowania wiercenia odwiertu kierunkowego/poziomego (Weiss, 2004)

### **3. PROGRAMY KOMPUTEROWE DO OCENY ZASOBÓW GEOLOGICZNYCH ZŁÓŻ GAZU, ROPY NAFTOWEJ CZY GAZU Z POKŁADÓW WĘGLA**

Wśród programów przeznaczonych do określania zasobów gazu i ropy naftowej wyróżnić należy te, które zostały zbudowane do oceny zasobów metodami objętościowymi i te, które opierają się na klasycznym i zmodyfikowanym (dla złóż gazowo-kondensatowych) bilansie masowym.

### **3.1. Programy do określania zasobów metodami objętościowymi**

Do klasycznych programów obliczeniowych należą wszystkie programy zespolone do budowy i analizy modeli geologicznych w oparciu m.in. o sejsmikę, geofizykę wiertniczą, petrofizykę, pomiary hydrodynamiczne złożowe, pomiary PVT, itp. Do programów tego typu dostępnych w Polsce wyróżnić należy w pierwszej kolejności programy: Geographix (Landmark Graphics Co. (Halliburton)), Petroleum WorkBench (Paradigm), Eclipse Office (Schlumberger).

Wymienione programy oferują – jak wspomniano wyżej kompleksowe podejście do zagadnień złożowych – wymuszając pełną systematykę w zbieraniu informacji i jej przetwarzaniu, w sposób przygotowany i narzucony przez twórców oprogramowania. Oprócz wymienionych programów do obliczenia zasobów metodami objętościowymi używane są popularne programy takie jak Surfer (Golden Software, 2002.), Apprentice (Gemini SI, 2005), Rockware Utility (Rockware, 1999).

Wszystkie wymienione programy umożliwiają obliczanie zasobów poprzez budowę map strukturalnych i map własności (porowatości, miąższości efektywnej, nasyceń wodą, nasyceń gazem, nasyceń ropa naftową), a następnie, poprzez numeryczne przemnożenie wytworzonych modeli cyfrowych własności, określana jest sumaryczna zawartość węglowodorów w analizowanym horyzoncie.

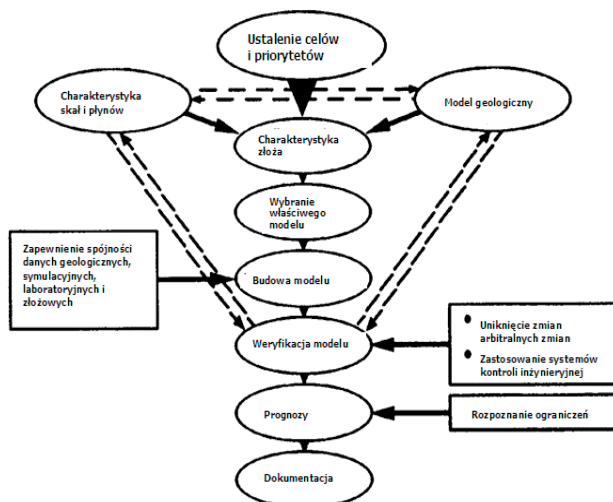
## **4. PROGRAMY DO BUDOWY MODELI GEOLOGICZNYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD GEOSTATYSTYCZNYCH**

Niektóre programy – specjalnie przeznaczone do obliczeń w oparciu o geofizykę wiertniczą – oferują automatyczne określanie parametrów odcięcia (cut-off). Nowością oferowana w ostatnich latach jest możliwość użycia geostatystyki do zobrazowania zmienności własności złożowych. Nowe programy posiadają wbudowane narzędzia do tworzenia wariogramów, ich weryfikacji, czy budowy siatki interpolacyjnej w oparciu o wyselekcjonowany model geostatystyczny. Pamiętać należy jednakże, że dla pełnego opisu geostatystycznego potrzeba większej ilości danych, które w przypadku małych złóż gazowych i naftowych nie występują w Polsce. Inną nowością jest francuski program (IFP) do ilościowej oceny niepewności własności modelu złożowego (Cougar (Schlumberger, 2006).

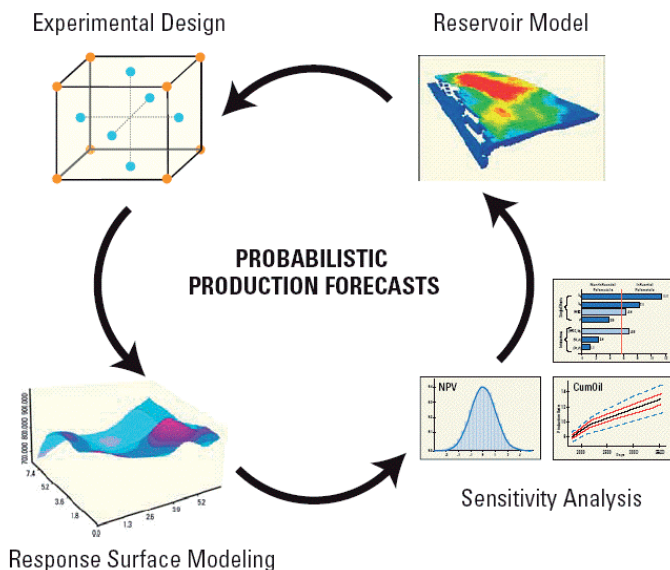
## **5. NIEPEWNOŚĆ OKREŚLANIA PARAMETRÓW MODELU GEOLOGICZNO-ZŁOŻOWEGO**

Zagadnienie wiarygodności modelu geologiczno-złożowego jest najważniejszym problemem geologiczno-geofizycznym wpływającym zarówno na sposób prowadzenia eksploatacji, ocenę zasobów – etc. Taka ocena – niejednoznaczna – jest wykonywana zwykle w procesie iteracyjnym (rys. 8) z wykorzystaniem symulatorów złożowych w trakcie procesu eksploatacji złoża. Stopień niepewności maleje w trakcie eksploatacji złoża osiągając zwykle minimum w momencie zaniechania produkcji węglowodorów. W zakresie wykorzystania jakości danych

geofizycznych i geologicznych do budowy modelu w ostatnich latach – głównie dzięki pracy Francuskiego Instytutu Naftowego (IFP) do dyspozycji inżynierów jest program Cougar (rys. 9) (Schlumberger, 2006).



Rys. 8. Proces tworzenia zintegrowanego modelu złożowego (Satter et al., 1994)



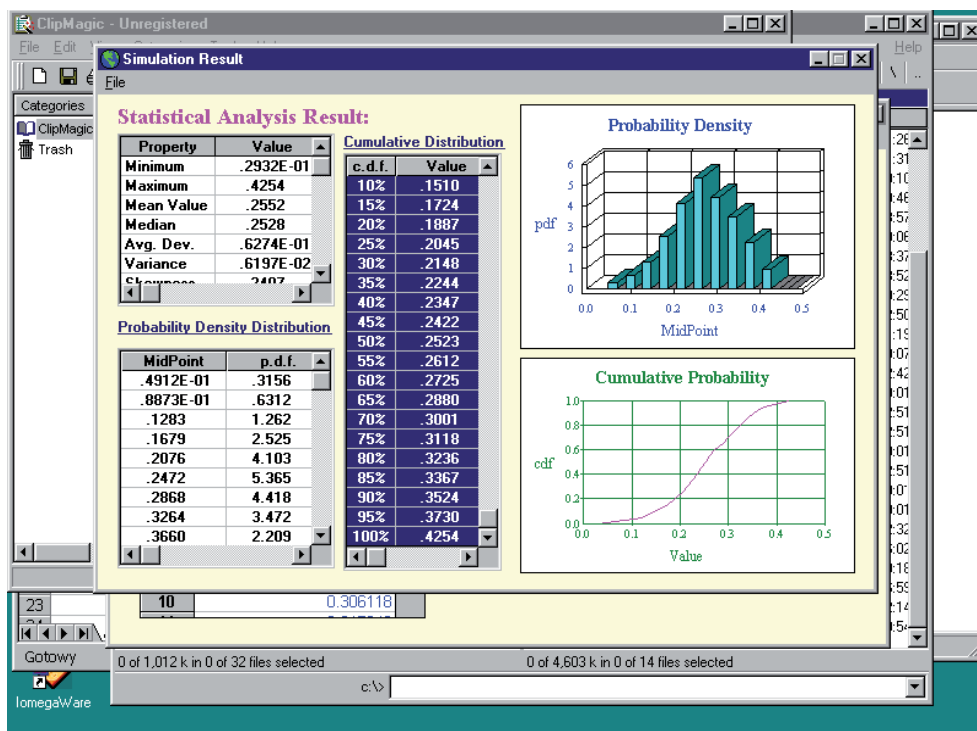
Rys. 9. Koncepcja budowy nowego systemu ilościowego szacowania niepewności modelowania złoża węglowodorowego zastosowana w IFP – program Cougar (Schlumberger, 2006)



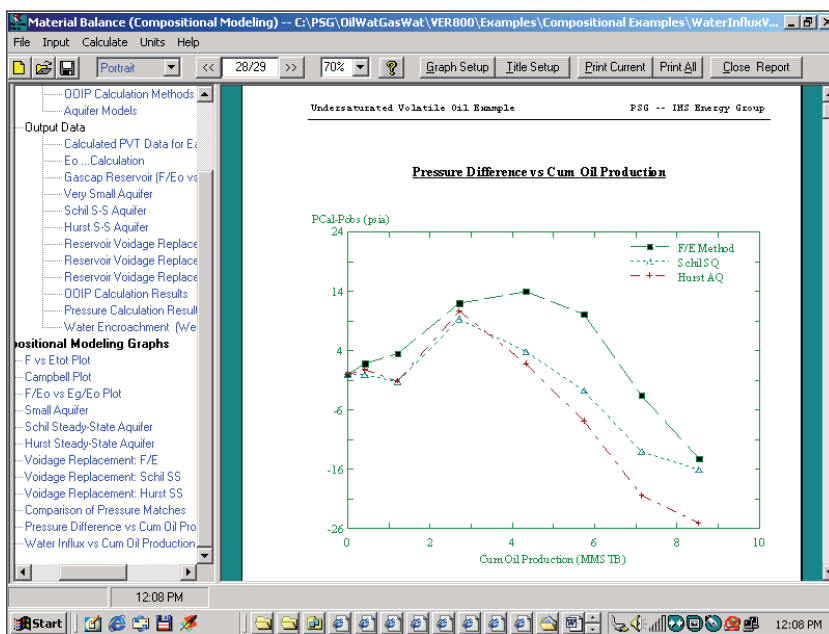
Program ten ilościowo określająca niepewność parametrów modelu geologiczno-złożowego zbudowanego np. w programie Petrel lub Flogrid (Schlumberger, 2006). Innym przykładem programu komputerowego jest PlanOpt – moduł optymalizujący wydobyć z odwiertów – element Eclipse Office (Schlumberger 2006) (rys. 9).

## 6. PROGRAMY DO OBLICZEŃ ZASOBÓW METODAMI BILANSU MASOWEGO

Dwa programy do obliczeń zasobów gazu i ropy naftowej (rys. 10 i 11) wyróżniają się zasadniczo. Są to GasWat/OilWat (PI/D HIS 1999a) (rys. 11) oraz MBA (F.A.S.T. MBA, Fekete 2004). Pierwszy oferuje szereg metod obliczeniowych do obliczeń zasobów dla złóż o stałej objętości i dla złóż z aktywną wodą (m.in. wg van Everdingena-Hursta, Hursta, Schilthiusa). Drugi umożliwia zastosowanie dynamicznych ciśnień otworowych (głowicowych czy dennych) oraz możliwość budowy modelu dla segmentów złóż z częściowym przepływem pomiędzy segmentami w oparciu o model Fetkovitcha czy Hursta czy Schilthiusa. W zakresie określania zasobów gazu z pokładów węgla wykorzystać można programy typu MonteCarlo (Risk v.2, Monte Carlo) umożliwiające probabilistyczną ocenę zasobów na podstawie znanych rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych losowych (rys. 10).



Rys. 10. Program do liczenia zasobów gazu ziemnego metodą MonteCarlo (Risk, 1997)



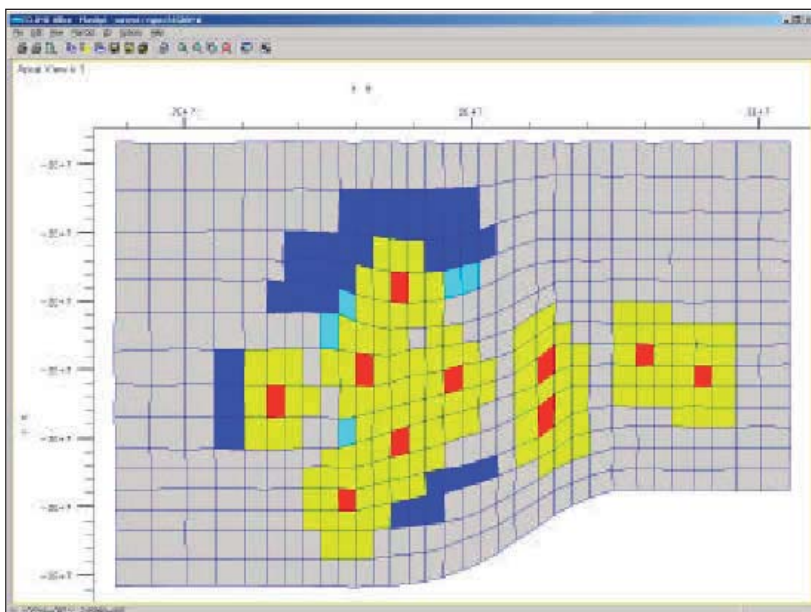
Rys. 11. Przykład obliczeń zmian ciśnienia w złożu ropy naftowej (program GasWat/OilWat v.8 PI/D HIS, 1999b)

## 7. PROGRAMY DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW HYDRODYNAMICZNYCH

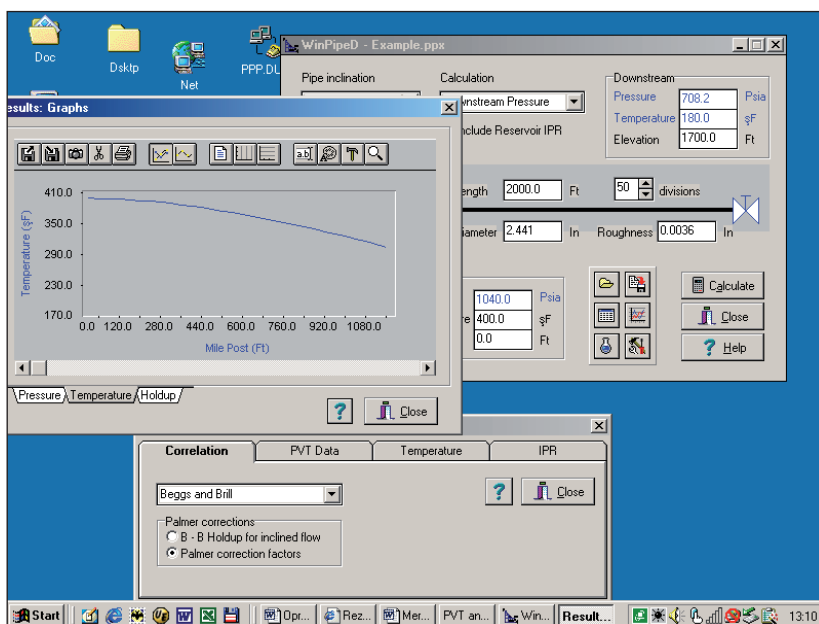
Można spotkać ogromną liczbę programów do wyznaczania parametrów hydrodynamicznych złoża oraz stanu fizycznego odwiertów ropno-gazowych. W Polsce używanych jest kilka programów: Kappa, Pansys, Weltest200 (Eclipse 2005), F.A.S.T. Weltest (Fekete 2004). Programy te różnią się interfejsem i sposobem zarządzania danymi wejściowymi. Wszystkie wykorzystują techniki opracowane głównie w latach osiemdziesiątych przez Gringartena/Bourdeta oraz wcześniejsze metody (np. Hornera). Nowością serii programów Pansys od ver. 2.6 (Pansystem, 2003) czy Weltest200 jest numeryczne określenie modelu złożowego w przypadku otworów poziomych. W przemyśle naftowym wykorzystywany jest także program Automate II (ver. 2.5 i wyżej) (autorstwa Horne'a).

Ciekawym programem oferowanym w zakresie optymalizacji wydobywania z odwiertów jest moduł PlanOffice- element Eclipse Office (Schlumberger 2006) (rys. 12)

W przypadku układów gaz-woda, gaz-kondensat, gaz-ropa naftowa, gaz-kondensat-ropa istnieje konieczność określenia rozkładu ciśnień w odwiercie w oparciu o jeden z wielofazowych modeli przepływu (np. „Olga”, Beggs-Brilla, Orkiszewskiego). Takie obliczenia w przypadku przepływu poziomego, skośnego czy pionowego wygodnie jest wykonywać przy użyciu programu WinPipeD (WinPipe 1996) (rys. 13). Innym ciekawym programem jest PipeSim firmy Schlumberger (PipeSim 2003) czy PipeFlo firmy Neotec (Pipeflo, 2003).



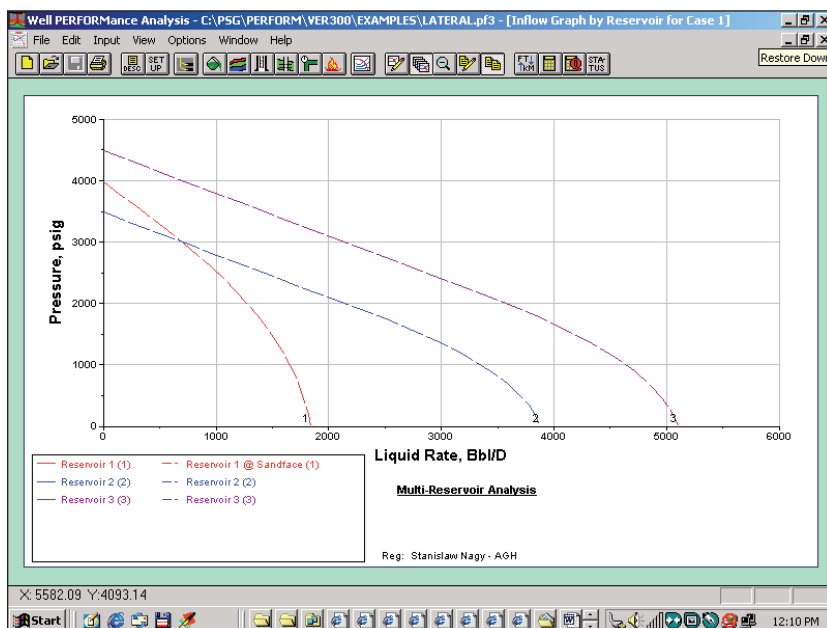
Rys. 12. PlanOpt – Moduł optymalizujący wydobywanie z odwiertów – element Eclipse Office (Schlumberger 2006)



Rys. 13. Program do obliczeń dwufazowych w odwiertach pionowych i poziomych (WinPipe 1999)

## 8. PROGRAMY DO ANALIZY WĘZŁOWEJ

Programy do analizy węzłowej (*nodal analysis*) służą do optymalnego powiązania powierzchniowych i otworowych instalacji z istniejącym złożem (np. program F.A.S.T. MBA (Fekete 2004). Program *Perform* (PI/D IHS 1999a) ). Oferują one m.in. możliwość powiązania aż pięciu złóż/warstw poprzez otwory pionowe lub poziome, co umożliwi analizę przyływu dla tradycyjnych złóż o pojedynczej porowatości jak i dla złóż szczelinowatych. Szczególnie użyteczna jest funkcja umożliwiająca badanie wpływu poszczególnych parametrów modelu na charakterystykę przyływu (rys. 14).



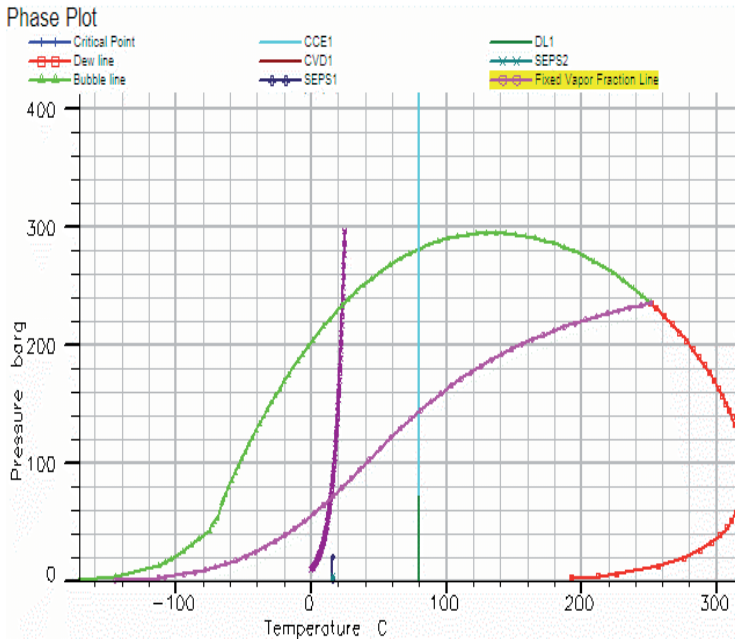
Rys. 14. Przykład obliczeń analizy węzłowej przy użyciu programu Perform ver. 3 PI/D HIS, 1999a

## 9. PROGRAMY DO OBLICZEŃ PVT – JEDNO- I WIELOFAZOWYCH

Dla oceny zasobów węglowodorów i dla procesu eksploatacji układów węglowodorowych konieczna jest znajomość własności PVT dla przypadków jednofazowych jak i wielofazowych (gaz kondensatowy, gazolinowy, ropa naftowa, ropa naftowa z czapą gazową). Do obliczeń takich wygodnie używać oprogramowania PVTLib (PI/D HIS, 2003) lub pakietu GCAP (GCap, 1999). Programy te umożliwiają określenie takich własności jak współczynnik Z (właściwie: współczynnik kompresji), współczynnik objętościowy  $B_g$ , własności pseudokrytyczne, współczynniki lepkości, gęstość masy i współczynnik ściśliwości izotermicznej przy użyciu 15 korelacji empirycznych. Program PVTLib umożliwia dopasowanie korelacji

na podstawie danych laboratoryjnych. Dodatkowo oba programy umożliwiają obliczanie własności na podstawie równań stanu Penga-Robinsona i Soave-Redlicha-Kwonga.

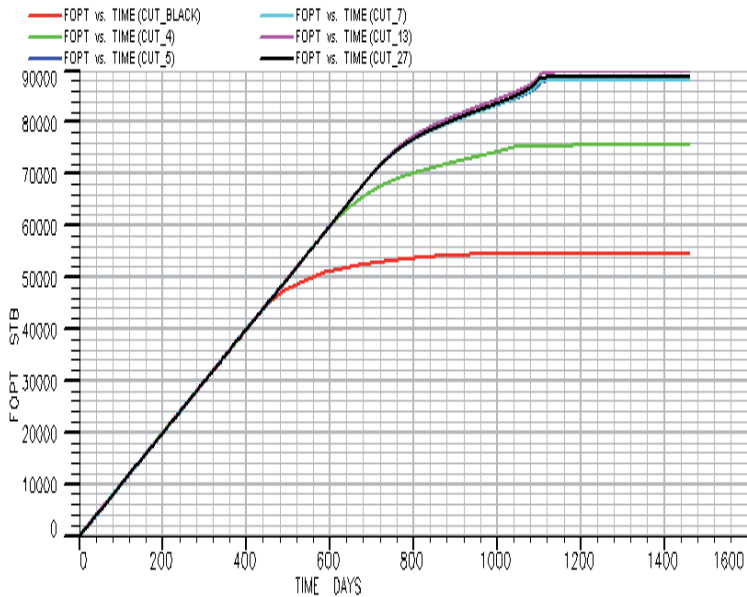
Pakiety firmowe – wymieniane wcześniej – np. Eclipse Office – posiadają wbudowane programy do obliczeń PVT, weryfikacji danych laboratoryjnych, pseudoizacji składu węglowodorowego, wyznaczania ciśnienia rosy i wrzenia układów węglowodorowych (rys. 15), czy wyznaczania ciśnienia dysocjacji hydratów (Eclipse 2005, Schlumberger 2006). Wpływ technik pseudoizacyjnych na wyniki symulacji w pakiecie kompozycyjnym jest istotny – niewłaściwie dobrane parametry PVT powodują zmniejszenie lub zmniejszenie całkowitego wydobycia lekkiej ropy naftowej lub kondensatu (rys. 16).



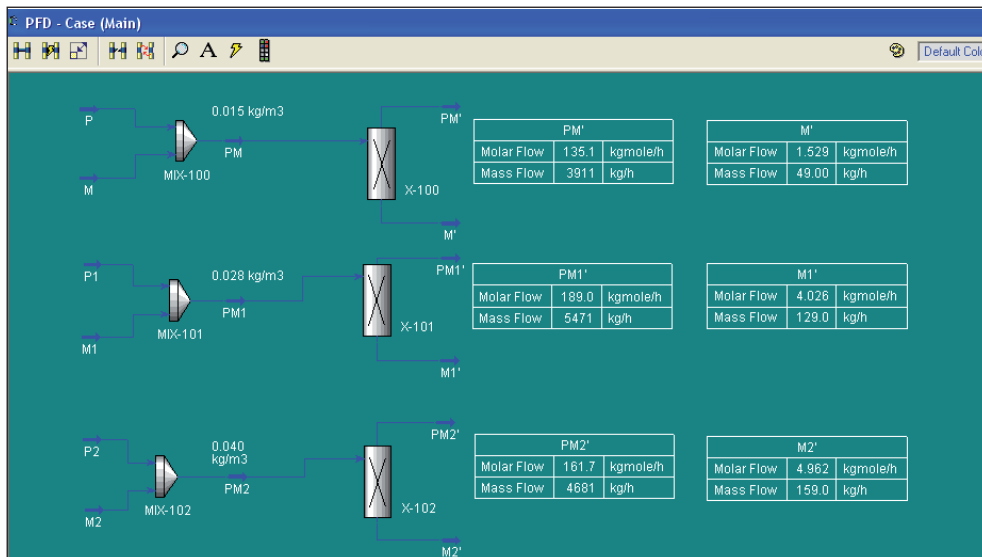
**Rys. 15.** Przykładowe krzywe ciśnienia nasycenia płynu złożowego, krzywe procesu CCE, CVD, DL, ciśnienia dysocjacji hydratów – wygenerowane w programie iPVT (Eclipse, 2005)

## 10. PROGRAMY ANALIZY PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

W odniesieniu do procesów uzdatniania gazu ziemnego i wstępnej separacji ropy naftowej wykorzystywanych jest zwykle kilka pakietów projektowych. Najbardziej reprezentatywnym pakietem jest program HYSYS (ASPEN 2006) wykorzystywany w szczególności do projektowania projektów zagospodarowania kopalń, instalacji do osuszania, usuwania zanieczyszczeń w gazie ziemnym (rys. 17). Innymi konkurencyjnymi programami są pakiety: Design II – firmy WinSim Inc. (2006) oraz pakiet ChemCad – firmy Chemstations (2006).



**Rys. 16.** Przykład symulacji całkowitego wydobywania lekkiej ropy. Pokazano wyniki modelowania: klasycznym modelem „black oil” (kolor czerwony ‘cut-black’) oraz modelami kompozycyjnymi zawierającymi 4, 5, 7, 13 i 27 pseudokładników (Eclipse, 2005)



**Rys. 17.** Widok ekranu w programie HySys – przykład projektowania instalacji do adsorpcji (Aspen 2006)

## 11. PODSUMOWANIE

- 1) Znaczny postęp techniki komputerowej – w szczególności w zakresie szybkości pracy komputerów pozwolił na przetwarzanie większej ilości informacji geologicznej w krótszym czasie. Nie znaczy to jednak, że rozwój programów wyeliminował problemy związane z istnieniem ryzyka geologicznego, ryzyka technologicznego czy ekonomicznego związanego z danym projektem złożowym.
- 2) Niezależnie od nowych możliwości obliczeniowych konieczna jest dobra znajomość zjawisk fizycznych występujących w złożu węglowodorowym kilkaset metrów czy kilka kilometrów pod ziemią.
- 3) Istniejące programy należy traktować jako narzędzia, coraz bardziej doskonałe, ale jednak zależne od aktualnej wiedzy geologicznej. Różny stopień rozpoznania geologicznego powoduje, że otrzymane wyniki obliczeń, symulacji obciążone są niepewnością niezależnie od ilości informacji wprowadzonych. Właściwa ocena tych niepewności wyrażona zwykle poprzez ocenę wrażliwości obliczeń na wprowadzone parametry złożowe pozwala uchwycić rząd wielkości – margines niepewności obliczeń bilansowych czy oceny efektywności inwestycji w funkcji szybkości wydobycia węglowodorów
- 4) W dobie fetyszyzacji komputerów, odrobina zdrowego rozsądku jest konieczna do właściwej oceny wyników obliczeń komputerowych, które w skutek pogoni za nowym klientem rozwijają się szybko, jednak nie na tyle szybko, by wyeliminować błędy przypadkowe czy systematyczne. Niestety problem „wiary” w obliczenia komputerowe przeciwstawiane tradycyjnym technikom obliczeniowym w oparciu o proste formuły komputerowe będzie stwarzał w przyszłości coraz większe problemy. Związane jest to z zanikiem prowadzenia prostych wyliczeń, coraz większym zaufaniem do komputera. Ta ufność nie zawsze musi zostać potwierdzona w praktyce.

## LITERATURA

- [1] 3DDrill, 2006, [www.3ddrill.com](http://www.3ddrill.com)
- [2] ASPEN 2006, [www.aspentech.com](http://www.aspentech.com)
- [3] Chemstations 2006, <http://www.chemstations.net/>
- [4] Eclipse 2005, Eclipse 100, 300 (ver. 2005a) Reference Manual, Schlumberger Inc.
- [5] Fekete, 2004, F.A.S.T. MBA & WellTest, 2004 User Guide, Fekete Inc.
- [6] GCap, 1999, User Guide, Campbell & Co. Inc.
- [7] Gemini , 2005, Apprentice & Merlin User Guide, Gemini SI, Inc.
- [8] Geographix, 2000, User Guide, Landmark Inc.
- [9] Goldene Software, 2002, Surfer ver.8.0 User Guide, Golden Software Inc.
- [10] Landmark, 2006, <http://www.lgc.com/>
- [11] Pansystem, 2003, Pansys v.3.0 User Guide, Pansystem, Inc.
- [12] Paradigm, 2006, <http://www.paradigmgeo.com>
- [13] Petrel, 2004, User Guide, Schlumberger Inc.
- [14] Petroleum WorkBench v.1.8, 1999, UserGuide, Baker Inc.

- [15] PI/D HIS, 1999a, Perform v.3.0 User Guide, Petroleum Information/Dwights LLC d/b/a IHS Energy Group
- [16] PI/D HIS, 1999b, OILWAT™/GASWAT™ 8.00 User Guide, Petroleum Information/Dwights LLC
- [17] PI/D HIS, 2003, PVTLib v. 5 User Guide, Petroleum Information/Dwights LLC, IHS Energy Group
- [18] Pipeflo, 2003, Pippelo v. 7.0, User Guide, Neotechnology Consultants Ltd.
- [19] PipeSim 2003, User Guide, Schlumberger Inc.
- [20] Procone, 1999, Procone v. 3.0 User Guide, Joshi, Inc.
- [21] Risk, 1997, *Risk Analysis And Decision-Making Software Package (1997 Version)* User Manual DOE US
- [22] Rockware, 1999, Rockware Util. Suite, ver. 4.0 User Guide, Rockware Inc.
- [23] Satter A., J. E. Varnon, M. T. Hoang, 1994, Integrated Reservoir Management, JPT, December, p. 1057
- [24] Schlumberger, 2006, <http://www.slb.com>
- [25] Siemek J., Nagy S., Rybicki C.: *Modelowe podejście do budowy, modernizacji i zarządzania podziemnym magazynem gazu*, Materiały XXIII Zjazdu Gazowników Polskich, Mikołajki 1995
- [26] Weiss, E.: 2004, *Paradigm – Innovation for a Changing E&P Industry*, POSC, November 2004
- [27] WinPipe, 1996, WinPipe Professional User Guide, Neosoft., Inc.
- [28] WinSim Inc., 2006, <http://www.winsim.com/>