

KAZIMIERZ TWARDOWSKI, STANISŁAW RYCHLICKI
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

OCENA METANONOŚNOŚCI WĘGLI KAMIENNYCH GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO NA PODSTAWIE STANDARDOWYCH DANYCH GEOLOGICZNO - GEOFIZYCZNYCH

Streszczenie. Praca przedstawia metodykę ilościowej oceny metanonośności węgla kamiennych Górnosląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) w warunkach *in situ* na podstawie wyników pomiarów geofizyki wiertniczej.

Źródłowy materiał empiryczny wykorzystywany do prac metodycznych dotyczył ponad tysiąca pokładów węglowych z 48 otworów wiertniczych z całego obszaru GZW. Obejmował on wyniki badań laboratoryjnych oraz geofizycznych pomiarów otworowych charakteryzujących węgle kamienne o bardzo dużym zróżnicowaniu ich właściwości.

Końcowym efektem wykonanych prac było skonstruowanie statystycznych modeli do klasyfikacji pokładów węglowych na metanowe i niemetanowe (z wykorzystaniem analizy dyskryminacyjnej) oraz ilościowej oceny parametrów gazowych pokładów węglowych metanowych (z wykorzystaniem analizy wielokrotnej regresji nieliniowej).

Uzyskane wyniki wraz z oceną geologicznej efektywności opracowanych modeli statystycznych potwierdzają generalnie możliwość ilościowej oceny szeregu parametrów gazowych, w tym metanonośności pokładów węglowych GZW, z wykorzystaniem podstawowych charakterystyk geologicznych oraz danych geofizyki wiertniczej.

APPLICATION OF THE LABORATORY TEST AND GEOLOGICAL DATA TO COALBED METHANE CONTENT EVALUATION FOR UPPER SILESIA COAL BASIN

Summary. In the paper is presented the methodics of an *in-situ* quantitative evaluation of the methane content in coal seams of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) based on well logs.

The empirical source material used for methodic works embraced over a thousand coalbeds from 48 wells from the whole USCB area. It consisted of the results of the laboratory tests and well logs characterising varying properties of hard coals.

The final effect was a construction of statistical models for the classification of coalbeds into methaneous and non-methaneous (with discrimination analysis) and the quantitative evaluation of gaseous parameters in methaneous coalbeds (with the multiple non-linear regression method).

The obtained results and the geological evaluation of efficiency of the elaborated statistical methods generally prove the possibility of a quantitative evaluation of a number of gaseous parameters, in that coalbed methane content in the USCB with the use of basic geological characteristics and well logs.

Badania metanonośności (gazonośności) pokładów węgla mają na celu określenie:

- jakościowego składu gazów, co umożliwia ustalenie głębokości zalegania strefy gazów metanowych,
- ilościowej zawartości głównych składników gazów w tej strefie w odniesieniu do jednostki masy węgla.

Z punktu widzenia sposobu realizacji tych badań wyróżnia się [3, 4, 11] **metody bezpośrednie i pośrednie**.

Metody bezpośrednie polegają na określeniu naturalnej gazonośności pokładów węglowych na podstawie pomiarów zawartości gazu w próbkach węgla pobranych z rdzeni wiertniczych. Podstawowym problemem w tych metodach jest pobranie reprezentatywnej próbki węgla ze złoża i jak najszybsze umieszczenie jej w hermetycznym pojemniku.

Metody pośrednie generalnie polegają na wykorzystywaniu w celu określania gazonośności pokładów węglowych różnorodnych fizycznych lub fizykochemicznych właściwości węgla związanych z ich gazonośnością, zwykle potencjalną, takich jak np. pojemność sorpcyjna, szybkość degazacji, itp. Metody pośrednie można dodatkowo podzielić na dwie grupy:

- **metody pomiarowe** - laboratoryjne lub otworowe,
- **metody analityczne** - obliczeniowe (rachunkowe).

Z metod pośrednich pomiarowych najbardziej znane i rozpowszechnione są metody wykorzystujące do określania gazopojemności (potencjalnej pojemności gazowej) węgla **izotermę sorpcji**, określane w warunkach laboratoryjnych w funkcji ciśnienia dla danej temperatury [11]. Przy tym w praktyce najczęściej stosowana jest izoterma Langmuira.

Z innych metod pośrednich pomiarowych należy zwrócić uwagę przede wszystkim na sposoby oceny zawartości gazu w węglu w warunkach *in situ* lub metody określania izoterm sorpcji gazów przez węgle w oparciu o **dane geofizyki wiertniczej**. Wcześniej duże nadzieje wiązano z profilowaniem gazowym otworów (*PGaz*) polegającym na ciągłym śledzeniu zawartości węglowodorów w płucze wiertniczej [3]. W ostatnich latach prowadzone są intensywne prace badawczo-metodyczne, mające na celu jak najszersze wykorzystanie wyników pomiarów geofizyki wiertniczej do określania szeregu właściwości węgla, w tym w szczególności ich gazonośności (metanonośności) [1, 2, 5-10]. W Polsce tego typu badania w odniesieniu do węgla kamiennych GZW, w tym ich metanonośności, również były prowadzone [13, 15, 16].

Metody pośrednie analityczne polegają na opracowaniu i następnie wykorzystywaniu empirycznych zależności gazonośności (metanonośności) węgla od różnych czynników, w szczególności parametrów geologicznych pokładów węgla, właściwości fizykochemicznych węgla, itp. Najczęściej mają one charakter modeli prognostycznych statystycznych, w związku z czym z reguły mogą być wykorzystywane tylko lokalnie w warunkach, dla których zostały opracowane i przy ściśle określonych ograniczeniach, dotyczących między innymi zakresu zmienności wykorzystywanych parametrów [3, 12, 15].

Z uwagi na użyteczny charakter badań główną uwagę w trakcie prac metodycznych skoncentrowano na części GZW o potencjalnym znaczeniu złożowym dla metanu pokładów węgla. Z rozważań w porozumieniu z oddziałem Górnośląskim Państwowego Instytutu Geologicznego w Sosnowcu wyłączono rejony o słabym rozpoznaniu metanonośności węgla, rejony intensywnej eksploatacji górniczej (siodło główne) oraz peryferyjne części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

W oparciu o analizę charakteru głębokościowej zmienności metanoności pokładów węgla oraz budowę geologiczną Zagłębia wydzielono cztery rejonów modelowe - rys. 1 [14]. Dwa z wydzielonych rejonów, rejon północno-zachodni (1) oraz rejon północno-wschodni (2) są częścią *północnego regionu geologiczno-gazowego*. Wydzielono je w oparciu o zasięg występowania utworów krakowskiej serii piaskowcowej. Rejon przejściowy (3) oraz rejon południowy (4) przedstawiają model *południowego rejonu geologiczno-gazowego*. Podział regionu południowego na dwa rejonów został dokonany w oparciu o metanoność węgla strefy obniżonej metanoności pokładów węglowych.

W odniesieniu do każdego z rejonów wytypowano otwory wiertnicze do szczegółowych badań metodycznych. Przy wyborze *otworów* kierowano się:

- jakością i ilością oznaczeń metanoności pokładów węgla;
- zakresem i wiarygodnością badań geofizyki wiertniczej.

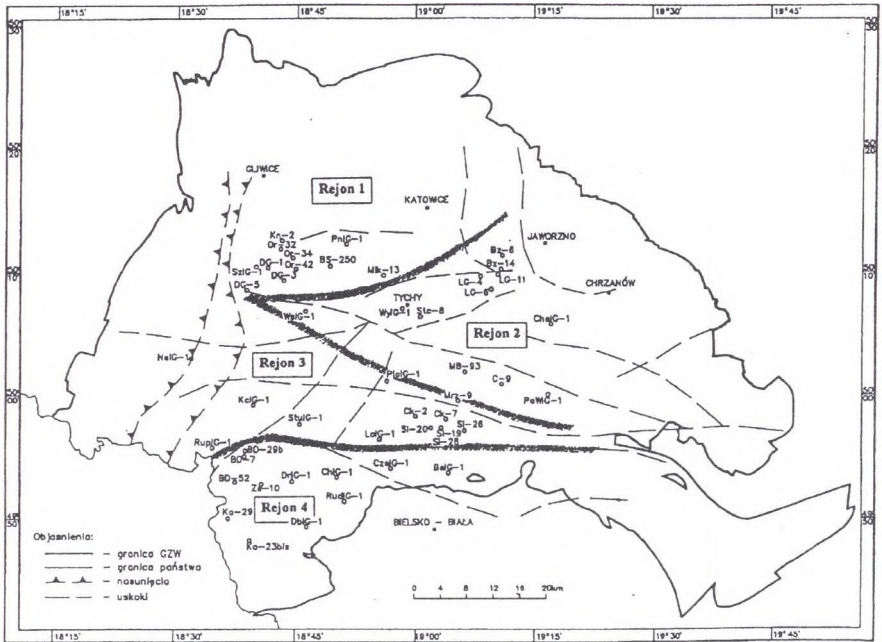
Przy typowaniu konkretnych *pokładów węgla* do prac metodycznych brano pod uwagę przede wszystkim:

- ich *miąższość* - co najmniej 0.4 m,
- *reprezentatywność rdzenia wiertniczego*, z wykorzystaniem którego prowadzone były badania laboratoryjne węgla,
- *uzysk rdzenia* - jak największy, w skrajnych przypadkach co najmniej 50%.

Ilość wytypowanych otworów w poszczególnych rejonach wynikała z konieczności posiadania odpowiednio dużej liczby zweryfikowanych oznaczeń metanoności węgla w celu realizacji modelowych badań statystycznych (założono minimum 150-200 oznaczeń metanoności).

W sumie do prac metodycznych zostało wytypowanych N=1051 pokładów węglowych z 48 otworów (w tym 18 parametrycznych PIG) położonych w różnych częściach obszaru GZW.

Jednym z zasadniczych etapów realizowanych badań było przygotowanie źródłowej bazy zweryfikowanych danych laboratoryjnych, w szczególności parametrów gazowych, oraz danych geologiczno-geofizycznych dotyczących pokładów węglowych w otworach wiertniczych wytypowanych do prac metodycznych. Objęła ona m.in. następujące ważniejsze charakterystyki geologiczne oraz gazowe pokładów.



Rys. 1. Mapa lokalizacji otworów wiertniczych uwzględnionych w pracach metodycznych (wraz z granicami czterech wydzielonych rejonów GZW)

Fig. 1. Location map of the boreholes taken into consideration during the research work (together with the borders of 4 distinguished areas of the USC B)

Do szczegółowej analizy wybrano następujące dane geologiczno – geofizyczne:

- H_{sp} - głębokość spągu pokładu względem powierzchni terenu w setkach m ,
- H_C - głębokość stropu pokładu względem stropu karbonu w setkach m ,
- H_n^C - miąższość nadkładu nad utworami karbonu (bez czwartorzędu) w setkach m ,
- h - miąższość pokładu w m ,
- GAZ_{tw} - sumaryczna skorygowana gazoność (zawartość różnych gazów z niewęglowodorowymi włącznie) w m^3 na tonę węgla surowego,
- CH_{4tw} - zawartość metanu CH_4 , ściślej sumy węglowodorów, w m^3 na tonę węgla surowego,
- Mt_{csw} - wynikowa (skorygowana) metanoność pokładu węgla w $m^3 CH_4$ na tonę czystej substancji węglowej (t_{csw}),
- ΔI_{gn}^C i ΔI_{gc}^C - średnie wartości względnego parametru ΔI_g określanego wg krzywej PG dla nadkładu odpowiednio nadkarbońskiego i wewnątrzkarbońskiego,
- $\Delta H_{il,n}^C$ i $\Delta H_{il,c}^C$ - efektywne miąższości utworów ilastych w obrębie nadkładu odpowiednio nadkarbońskiego i wewnątrzkarbońskiego w setkach metrów,
- ΔH_{il} - sumaryczna (ogólna) efektywna miąższość utworów ilastych zalegających nad pokładem, w setkach metrów,
- T_w - naturalna temperatura węglębna w $^{\circ}C$,
- ρ_{pl} - oporność elektryczna właściwa płuczki wiertniczej w omm ,

- t_{pom} - czas pomiędzy przewierceniem pokładu i zasadniczymi pomiarami geofizycznymi w *dziesiątkach dób*,
 d - charakterystyczna wartość rzeczywistej średnicy otworu w *cm*,
 d/d_n - względna rzeczywista średnica otworu w odniesieniu do średnicy nominalnej d_n ,
 I_{gC} - charakterystyczna wartość wskazań PG w $\mu R/h$,
 $\Delta I_g, \Delta I_{gg}, \Delta I_{PN}$ - charakterystyczne wskazania w formie względnych podwójnych parametrów różnicowych w odniesieniu odpowiednio do krzywych PG, PGG i PN ,
 Δt - charakterystyczna wartość czasu interwałowego wg wskazań PA w $\mu s/m$,
 $\rho_{g2.63}, \rho_{g0.55}, \rho_{POst}$ - charakterystyczne wartości właściwej oporności elektrycznej pozornej wg wskazań odpowiednio $PO_{g2.63}, PO_{g0.55}$ i $POst$ w *omm*.

Końcowym etapem realizowanych prac metodycznych mających na celu opracowanie statystycznych modeli do oceny parametrów gazowych, w tym w szczególności metanoności pokładów węglowych GZW na podstawie danych geofizyki wiertniczej, była konstrukcja:

- reguł klasyfikacji pokładów na metanowe przemysłowe oraz pozostałe,
- regresyjnych modeli predykcyjnych do ilościowej oceny parametrów gazowych, w szczególności metanoności pokładów węglowych,
- ocena efektywności opracowanych modeli statystycznych.

Za graniczną wartość metanoności pokładów węgla, po przekroczeniu której można uznać je za w pełni nasycone metanem, przyjmuje się $4.5 m^3 CH_4/t_{csw}$. Wartość ta równocześnie definiuje granicę rozdziału strefy gazowej metanowej na podstrefy górną (przejściową) oraz dolną (głębinową), a także stanowi od 1994 roku brzeźną (dolną) wartość przy obliczaniu zasobów przemysłowych metanu pokładów węgla.

W związku z powyższym, wykorzystując zebrane dane geologiczno-geofizyczne, opisujące pokłady węglowe GZW, przeprowadzono obliczenia, których celem była konstrukcja liniowych funkcji dyskryminacyjnych do klasyfikacji pokładów węglowych na metanowe przemysłowe oraz pozostałe. Posługiwano się przy tym programami obliczeniowymi opisanymi w pracy [14] w celu:

- wyboru optymalnych kombinacji informatywnych parametrów - program DMT2;
- konstrukcji liniowych funkcji dyskryminacji z wykorzystaniem wybranych optymalnych kombinacji informatywnych parametrów - program COVAR.

Zasadnicze wnioski, jakie wynikają z przeprowadzonych obliczeń, można sformułować następująco.

- Optymalne kombinacje informatywne parametrów, minimalizujące prawdopodobieństwo błędów klasyfikacji pokładów węglowych GZW na metanowe przemysłowe i pozostałe z wykorzystaniem liniowych funkcji dyskryminacji, obejmują z reguły szeroki kompleks (od 11 do 16) analizowanych parametrów geologiczno-geofizycznych.
- Prawdopodobieństwo ogólnego błędu klasyfikacji $P(e)$ jest stosunkowo wysokie. Przy analizie dotyczącej całego obszaru GZW niezależnie od nieco różniących się zestawów wykorzystywanych parametrów geofizycznych (dodatkowo uwzględniane Δt i ρ_{POst}) kształtuje się ono na poziomie 19-23 %. W przypadku klasyfikacji realizowanej odrębnie dla poszczególnych rejonów GZW prawdopodobieństwo to wyraźnie się różnicuje i generalnie maleje - najpewniej, z błędami rzędu 8-9 %, można ją prowadzić

w rejonach drugim i czwartym, z błędem rzędu 16% - w rejonie pierwszym, oraz z najwyższym błędem rzędu 24% - w rejonie trzecim GZW.

- Zwraca uwagę dominujące znaczenie parametrów geologicznych w rejonach pierwszym i drugim (w szczególności dotyczących efektywnych miąższości utworów ilastych w nadkładzie) oraz ich duże znaczenie w pozostałych rejonach. W przypadku rejonów trzeciego i czwartego najbardziej informatywnym parametrem okazała się temperatura węglana T_w ; większe znaczenie, szczególnie w rejonie trzecim, posiadają też inne parametry geofizyczne.

W celu zbadania możliwości ilościowej oceny parametrów gazowych, w szczególności metanonośności pokładów węglowych GZW w oparciu o ich charakterystyki geologiczno-geofizyczne, zrealizowano analizę regresji wielokrotnej nieliniowej z wykorzystaniem programu REGA [14].

Generalnie z przeprowadzonych obliczeń wynikają następujące ważniejsze wnioski.

- Potwierdzają się zasadnicze prawidłowości dotyczące roli i wpływu parametrów geologicznych pokładów węgla na ich parametry gazowe. Szczególne znaczenie z punktu widzenia metanonośności pokładów posiadają charakterystyki związane z uszczelniającymi właściwościami ich nadkładu.
- Jakość równań regresji dotyczących całego obszaru GZW w odniesieniu do zasadniczych parametrów gazowych pokładów CH_4 i M_{tcsw} zmienia się przy poszerzaniu podstawowego zestawu argumentów o dodatkowe parametry geofizyczne w zasadzie w sposób nieznaczny.
- Równania regresji opisujące zmienność zasadniczych parametrów gazowych pokładów węgla w odniesieniu do poszczególnych wydzielonych rejonów cechują się generalnie lepszą jakością aniżeli odpowiednie równania dotyczące całego obszaru GZW. Wyraźnie widać to na przykładzie najważniejszego parametru gazowego - metanonośności M_{tcsw} (np. współczynniki korelacji wielokrotnej R wynoszą odpowiednio - dla całego obszaru 0.71 i dla kolejnych rejonów od pierwszego do czwartego odpowiednio 0.83, 0.89, 0.75 i 0.85).
- Generalnie przy prognozowaniu najważniejszych parametrów gazowych, w tym metanonośności pokładów węgla, istotną rolę, poza parametrami geologicznymi, charakteryzującymi w szczególności cechy uszczelniające utworów nadkładu, odgrywają również charakterystyki geofizyczne pokładów - przede wszystkim temperatura węglana, wskazania profilowań neutronowych, średnicy, gamma-gamma i innych.

Ocenę efektywności uzyskanych rozwiązań przeprowadzono w odniesieniu do opracowanych ilościowych modeli predykcyjnych - regresyjnych modeli dotyczących prognozowania metanonośności pokładów węglowych GZW. Jakość wyników prognozowania oceniano na podstawie analizy porównawczej wartości metanonośności pokładów węgla GZW określonych laboratoryjnie oraz prognozowanych wg opracowanych statystycznych modeli regresyjnych. W analizie uwzględniono pokłady węgla ze źródłowej bazy danych empirycznych z wykluczeniem pokładów znajdujących się w strefach gazowych azotowo-dwutlenkowej i azotowej ($M_{tcsw} < 0.02 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/t_{csw}$).

Uwagi końcowe

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było opracowanie metodyki ilościowej oceny metanonośności węgla GZW w warunkach *in situ* na podstawie wyników pomiarów geofizyki wiertniczej.

Cel ten w świetle uzyskanych wyników, w szczególności w kontekście wykazanej adekwatności i poprawności opracowanych ilościowych modeli predykcyjnych, można uznać za osiągnięty (w tych konkretnych warunkach, związanych z jakością i ilością źródłowych materiałów empirycznych, w jakich działali Autorzy).

Literatura

1. Ahmed U., Johnston D., Colson J.L., 1991 - An advanced and integrated approach to coal formation evaluation. SPE Paper No. 22736, Society of Petroleum Engineers, 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE, Dallas.
2. Colson J.L., 1991 - Evaluating gas content of Black Warrior Basin coalbeds from wireline log data. SPE Paper No. 21489, Society of Petroleum Engineers, SPE Gas Technology Symposium, Houston.
3. Dmitrev A.M., Kulikova N.N., Bodnia G.V., 1982 - Problemy gazonosnosti ugodnych mestorozhdenij. Izd. Nedra, Moskva.
4. Hampton G.L., Schwochow S., 1994 - Analiza zawartości gazu w węglu: porównanie metody bezpośredniej, stosowanej przez U.S. Bureau of Mines, z metodą stosowaną w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”. Mat. Międzyn. Konf. nt. „Wykorzystanie metanu pokładów węgla”, t.II, Katowice.
5. Hawkins J.M., Schraufnagel R. A., Olszewski A. J., 1992 - Estimating coalbed gas content and sorption isotherm using well log data. SPE Paper No. 24905, Society of Petroleum Engineers, 67th Annual Technical Conference and Exhibition, Washington.
6. Johnston D.J., Gales R.H., Ahmed U., 1991 - New logging method for enhanced coal grading. SPE Paper No. 21810, Society of Petroleum Engineers, Rocky Mountain Regional Meeting and Low-Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado.
7. Mavor M.J., Close J.C., Mc Bane R.A., 1992 - Formation evaluation of exploration coalbed methane wells. SPE Reprint Series, No. 35, Coalbed Methane, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas.
8. Mullen M.J., 1989a - A review of wireline logging techniques and evaluation of coalbeds in the San Juan Basin. Malliburton Logging Services, Farmington, New Mexico.
9. Mullen M.J., 1989b - Coalbed methane resource evaluation from wireline logs in the northeastern San Juan Basin: A case study. SPE Paper No. 18946, Society of Petroleum Engineers, Low Permeability Reservoir Symposium and Exhibition, Denver, Colorado.
10. Scholes P.L., Johnston D., 1993 - Coalbed methane applications of wireline logs. W: *Hydrocarbons from coal*, B.E. Law, D.D. Rice (ed.), AAPG Studies in Geology # 38, Tulsa, Oklahoma.

11. Seidle J.P., 1993 - Metody określania zawartości metanu w pokładach węgla. Metan Pokładów węgla, Biuletyn Centrum Informacji, nr 7, Katowice.
12. Sklarov L.A., Krivickaja R.M., Strukovskaja T.V., 1982 - Opređenje metanosnosti plastov rascotnym metodom. Ugol Ukrainy, No. 7.
13. Twardowski K., 1985 - Stan aktualny i perspektywy wykorzystywania materiałów geofizyki wiertniczej do geologicznego dokumentowania otworów węglowych na obszarze GZW. Mat. I Kraj. Konf. Nauk.-Techn. nt. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalin stałych”, Wyd. AGH, t. I, Kraków.
14. Twardowski K. (red.), 1997 - Ocena metanonośności węgla kamiennych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w oparciu o wyniki pomiarów otworowych. Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków.
15. Twardowski K., Rychlicki S., 1994 - Wykorzystanie metod geofizyki wiertniczej do geologicznego dokumentowania otworów węglowych. Mat. I Branżowego Spotkania Geofizyków i Geologów nt. „Problematyka współpracy między geofizykami i geologami w świetle współczesnych technologii”, Złockie k. Muszyny.
16. Twardowski K., Rychlicki S., 1995 - Evaluation of gas content in coals of the Upper Silesian Coal Basin by using well logging. Preprints of the 1995 International Gas Research Conference, vol. II: Exploration and Production, Cannes.

*Recenzent: Dr hab.inż. Krystian Probiez
Prof. Politechniki Śląskiej*