

Zbigniew FAŃFARA  
Kazimierz TWARDOWSKI  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## MOŻLIWOŚĆ PREDYKCJI WILGOTNOŚCI NATURALNEJ WĘGLI BRUNATNYCH

**Streszczenie.** Wilgotność naturalna węgla brunatnych należy do najbardziej istotnych parametrów technologicznych węgla, w szczególności węgla energetycznego. Literatura obfituje w wiele przykładów modeli pozwalających na ocenę tej wielkości na podstawie znanej wartości innych standardowo oznaczanych własności węgla brunatnego. Mają one jednak z reguły specyfikę wybitnie lokalną.

W niniejszej pracy podjęto próbę stworzenia uniwersalnego modelu regresyjnego do predykcji wilgotności naturalnej węgla brunatnego w oparciu o jego zapopielenie i głębokość zalegania. Skonstruowano model nieliniowy asymptotyczny, którego weryfikacja wskazuje na wysoką efektywność geologiczną.

## PREDICTION OF NATURAL HUMIDITY IN LIGNITES - POSSIBILITIES

**Summary.** The natural humidity of lignites belongs to the most important technological parameters of coal, especially power coal. The literature abounds in numerous models for assessing the parameter based on the known values of other parameters which were determined in a standard way. As a rule, they are generally of local character.

An attempt was made to create a universal regression model for predicting the natural humidity of lignites based on ash content and depth of deposition. A nonlinear asymptotic model was elaborated. Its verification shows to a high geological efficiency.

## Wstęp

Wilgotność naturalna węgla brunatnych należy do najważniejszych parametrów technologicznych charakteryzujących węgiel, szczególnie wykorzystywany do celów energetycznych. Zazwyczaj jednak laboratoryjne oznaczenia wilgotności złożowej węgla prowadzone są rzadko. Osoby zainteresowane wartością tego współczynnika skazane są wówczas na jej szacowanie. Pomocne okazują się wtedy zależności wiążące parametr  $W_t^r$  z innymi wielkościami, znanymi ze standardowych badań laboratoryjnych próbek węgla. Zależności te mają najczęściej charakter równań regresyjnych o wysokich współczynnikach korelacji, jednak zazwyczaj są ściśle związane z konkretnym miejscem występowania węgla brunatnego. Z tego względu nadają się one najczęściej do rozwiązywania problemów regionalnych. Badania nad dopasowaniem równania ogólnego (niezależnego od warunków lokalnych panujących w obrębie danego złoża czy rejonu występowania węgla brunatnego) prowadzono z pewnym powodzeniem od szeregu lat [1,2,3,4,5,6]. Analizowano regresyjne modele do predykcji wilgotności naturalnej w różnej postaci (liniowej i nieliniowej: wielomianowej, logarytmicznej, wykładniczej i mieszanej). W niniejszej pracy dokonano pewnych uogólnień na ten temat.

## Wyniki oznaczeń laboratoryjnych

W trakcie rozważań przygotowano zbiór danych obejmujący 1149 wyników laboratoryjnych pomiarów wilgotności złożowej i zawartości popiołu próbek węgla brunatnego pobranych na określonej głębokości. Zebrane informacje pochodzą z 17 rejonów występowania węgla brunatnego [1,2,5,6]. Utworzony plik dotyczy bardzo zróżnicowanych próbek węgla pod względem głębokości zalegania pokładów (od kilku do prawie 200 m) i ich jakości. Można tutaj wyróżnić zarówno próbki bardzo dobrych węgli brunatnych o niskiej zawartości popiołu (poniżej 5%), jak i utwory zawęglone, w których popiół stanowi ponad 50% całości. Wilgotność całkowita cechuje się bardzo dużą zmiennością, od około 15% do prawie 70%.

## Analiza regresji

Metodą regresji wielokrotnej dopasowano zależność wiążącą wilgotność złożową węgla brunatnego z jego zapocieniem i głębokością zalegania pokładów dla modelu liniowego (1), nieliniowego mieszanego (2) i wykładniczego (3) w następujących postaciach:

$$\text{model liniowy: } W_t^r = a + b * A^r + c * H \quad (1)$$

$$\text{model nieliniowy mieszany: } \log(W_t^r) = a + b * A^r + c * \log(H) \quad (2)$$

$$\text{model wykładniczy: } \log(W_t^r) = a + b * A^r + c * H \quad (3)$$

gdzie:  $W_t^r$  - zawartość wilgoci całkowitej w węglu w stanie roboczym próbki,

$A^r$  - zawartość popiołu w węglu w stanie roboczym próbki,

$H$  - średnia głębokość opróbowanego interwału.

Wyniki analizy regresji zamieszczono w tabeli 1. Każda z dopasowanych zależności cechuje się wysokim współczynnikiem korelacji  $R$  od około 0,88 do 0,89 (opisują prawie 80% zmienności parametrów) przy stosunkowo niewielkim odchyleniu standardowym  $S_{y/x}$ . Współczynnik korelacji równania liniowego jest nieznacznie niższy (o około 0,1) w porównaniu z modelami nieliniowymi, co sugeruje ze statystycznego punktu widzenia, że wszystkie uzyskane równania oferują zbliżoną dokładność opisu. W poprzednich pracach wykazano [2,3,6], że wartości współczynników regresji dopasowanych dla modelu liniowego (1) w obrębie poszczególnych złóż węgla brunatnego i dla całości danych różnią się w sposób istotny w około 50% przypadków. Oznacza to, że ta droga postępowania nie daje możliwości uzyskania uniwersalnej formuły. Równanie nieliniowe mieszane (2) zapewnia nieco większą dokładność, natomiast zgodność wartości odpowiednich współczynników regresji równań lokalnych i dla całości danych kształtuje się na poziomie 80% [4,5,6]. Testy istotności prowadzono dla poziomu ufności  $p = 0,95$ .

Tabela 1

Wyniki analizy regresji w celu określenia modelu prognostycznego do oceny wilgotności naturalnej węgla brunatnego

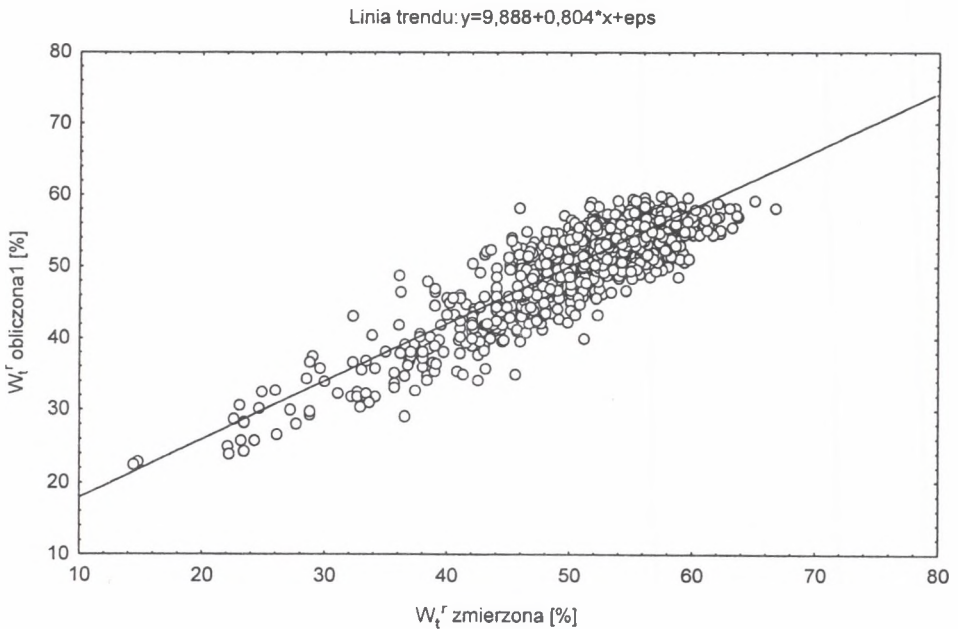
Nazwa modelu	Liniowy	Nieliniowy mieszany	Wykładniczy
Równanie regresji	$W_t^r = a + b * A^r + c * H$	$\log W_t^r = a + b * A^r + c * \log H$	$\log W_t^r = a + b * A^r + c * H$
Cechy równania:			
N	1149	1149	1149
R	0,877	0,890	0,889
F	1905,7	2192,9	2153,9
$S_{y/x}$	3,229	0,031	0,031
Współ. równania			
a	60,72	1,894	1,800
b	-0,5308	-0,00552	-0,00553
$t_b$	-60,99	-65,68	-65,21
c	-0,0371	-0,0662	0,00033
$t_c$	-18,06	-17,09	-16,49

Z przedstawionych rozważań wynika, że nieliniowe równanie mieszane (2):

$$\log(W_i^f) = 1,89 - 0,0055 * A^r - 0,066 * \log(H) \quad (4)$$

które po przekształceniu ma postać:

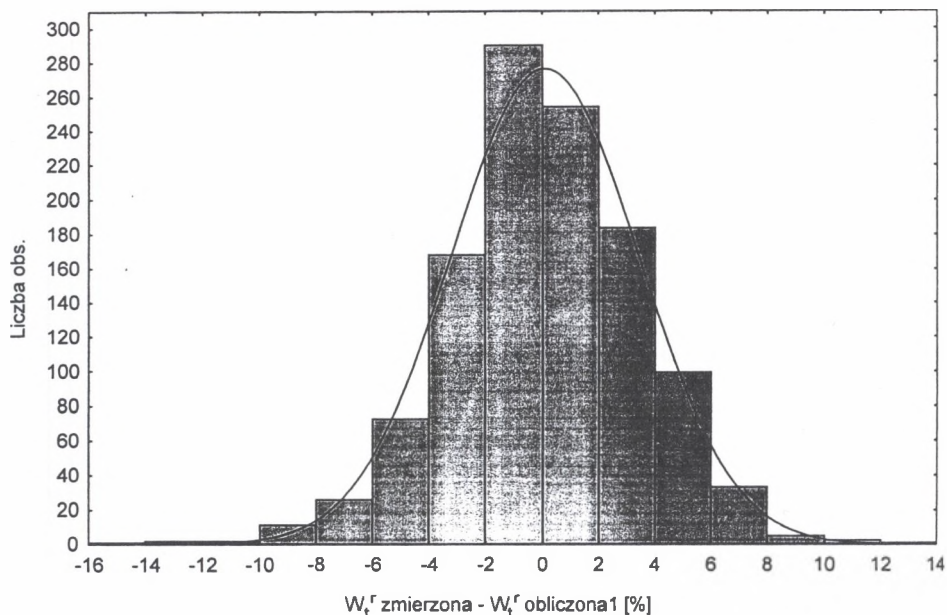
$$W_i^f = \frac{78,43}{1,013^{A^r} * H^{0,066}} \quad (5)$$



Rys. 1. Zestawienie korelacyjne prognozowanych wartości  $W_i^f$  według mieszanego równania regresji oraz oznaczeń laboratoryjnych

Fig. 1. Correlation of prognosed value of  $W_i^f$  based on a mixed regression equation and laboratory determinations

można z powodzeniem traktować jako uniwersalny model do prognozowania wartości - wilgotności złożowej węgla brunatnych. Na rys. 1 zamieszczono zestawienie korelacyjne prognozowanych wartości  $W_i^f$  według nieliniowego mieszanego równania regresji oraz oznaczeń laboratoryjnych. Rysunek wskazuje na dobre skupienie punktów pomiarowych, szczególnie w obszarze typowym dla polskich węgla brunatnych, dla wilgotności od 40% do 55%. Rys. 2 przedstawia histogram różnic pomiędzy wynikiem badania laboratoryjnego i prognozą wilgotności. Histogram jest symetryczny i w ponad 95% przypadków wartość bezwzględna różnicy nie przekracza 4%, co daje błąd względny prognozy dla typowych węgla brunatnych ( $W_i^f$  równe około 50%) na poziomie 8%.



Rys. 2. Histogram różnic wartości  $W_t^r$  pomiędzy oznaczeniami laboratoryjnymi i prognozą według mieszanego równania regresji

Fig. 2. Histogram of differences between laboratory and prognosed values of  $W_t^r$ , based on a mixed regression equation

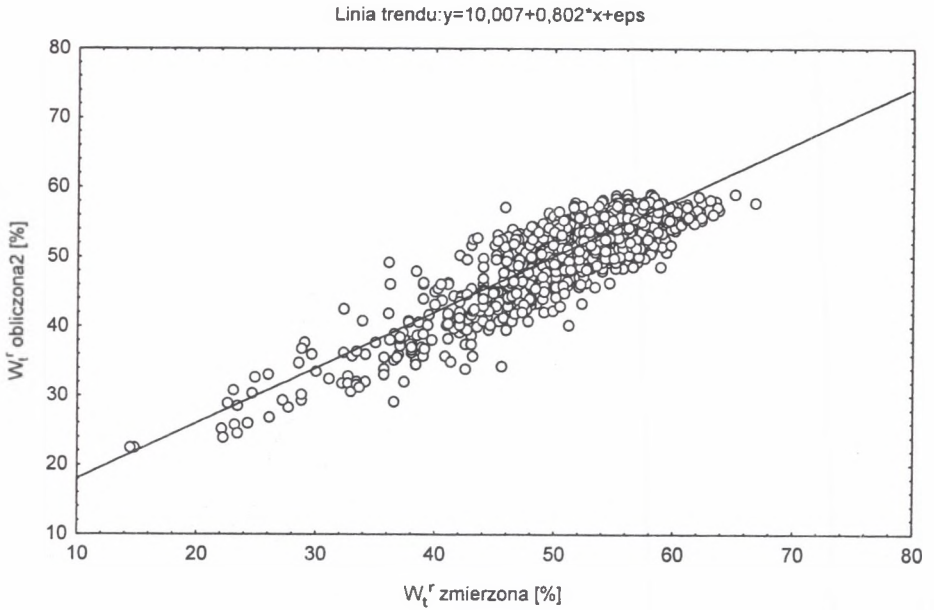
Model wykładniczy (3):

$$\log(W_t^r) = 1,80 - 0,0055 * A^r - 0,00033 * H \quad (6)$$

który po przekształceniu ma postać:

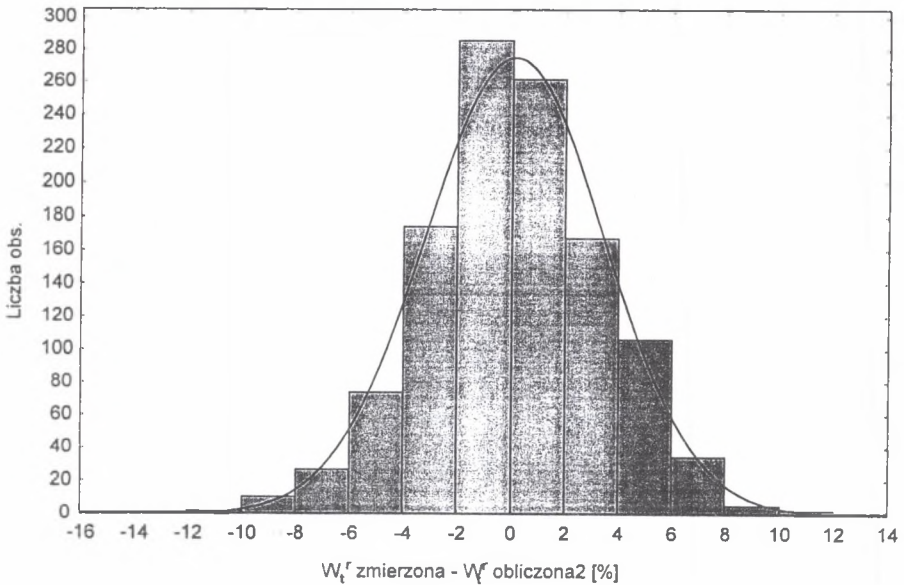
$$W_t^r = \frac{63,04}{1,013^{A^r} * 1,00076^H} \quad (7)$$

daje zbliżoną dokładność opisu w porównaniu z modelem mieszanym i ze statystycznego punktu widzenia nie różni się od niego w sposób istotny. Także zestawienie korelacyjne z rys. 3 i histogram różnic pokazany na rys. 4 niewiele odbiega od analogicznych rysunków dla nieliniowego modelu mieszanego. Model wykładniczy jest jednak korzystniejszy z matematycznego (bardziej zwięzła postać) i fizyczno-geologicznego punktu widzenia (uzasadniony fizycznie kształt zależności pomiędzy parametrami). Na rys. 5 pokazano dla wykładniczego



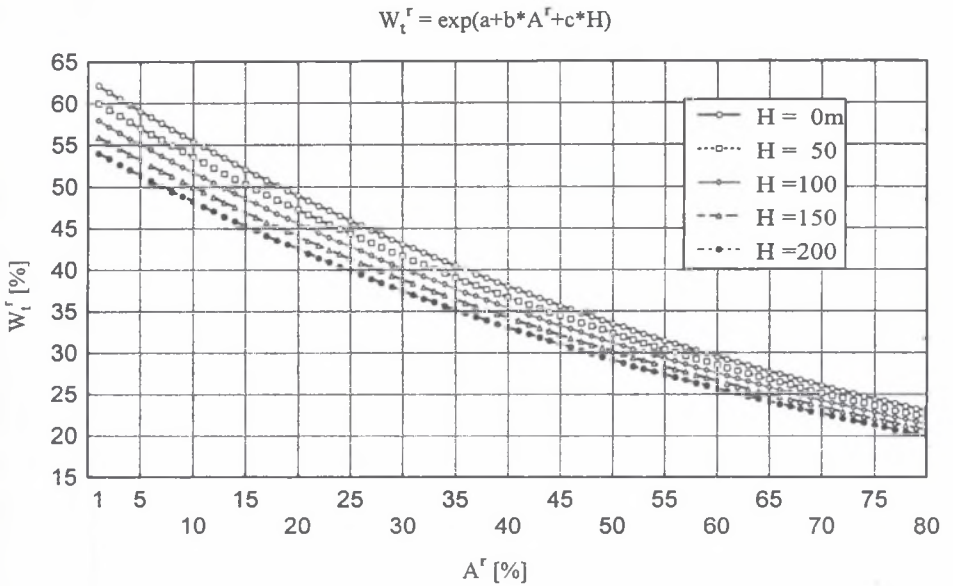
Rys. 3. Zestawienie korelacyjne prognozowanych wartości  $W_t^f$  według wykładniczego równania regresji oraz oznaczeń laboratoryjnych

Fig. 3. Correlation of prognosed values of  $W_t^f$ , based on an exponential regression equation and laboratory data

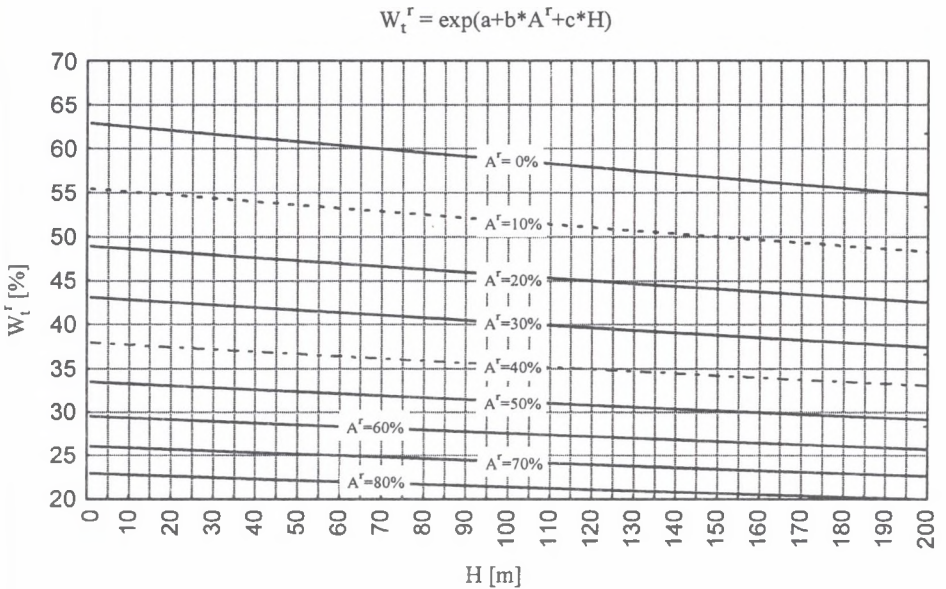


Rys. 4. Histogram różnic wartości  $W_t^f$  pomiędzy oznaczeniami laboratoryjnymi i prognozą według wykładniczego równania regresji

Fig. 4. Histogram of differences between laboratory and prognosed  $W_t^f$  values, based on an exponential regression equation



Rys. 5. Wykładniczy model regresyjny zależności wilgotności naturalnej  $W_t^r$  od popielności  $A^r$  i głębokości zalegania  $H$  węgla brunatnych  
 Fig. 5. Exponential regression model of dependence of natural humidity  $W_t^r$  on ash content  $A^r$  and depth of deposition  $H$  in lignites



Rys. 6. Wykładniczy model regresyjny zależności wilgotności naturalnej  $W_t^r$  od głębokości zalegania  $H$  i popielności  $A^r$  węgla brunatnych  
 Fig. 6. Exponential regression model showing dependence of natural humidity  $W_t^r$  on depth of deposition  $H$  and ash content  $A^r$  in lignites

modelu regresyjnego zależność wilgotności naturalnej od zapopielenia przy różnych głębokościach zalegania węgla brunatnego, natomiast rys. 6 obrazuje zależność wilgotności naturalnej od głębokości zalegania węgla dla różnych zawartości popiołu.

Wstawiając do równań regresji (5) i (7) zerową zawartość popiołu i zerową głębokość zalegania pokładów uzyskuje się wartość wilgotności odpowiadającą stanowi suchemu i bezpopiołowemu węglu ( $W_t^{raf}$ ). Wynosi ona odpowiednio:

$$\text{dla modelu mieszanego: } W_t^{raf} = 78,43\%$$

$$\text{dla modelu wykładniczego: } W_t^{raf} = 63,04\%$$

Wartość wilgotności w stanie suchym i bezpopiołowym powinna się zawierać w przedziale 60 - 70% [7]. Model mieszany stanowczo zawyża wilgotność przy niskiej zawartości popiołu, natomiast wartość  $W_t^{raf}$  uzyskana dla modelu wykładniczego zdecydowanie mieści się w zwykle obserwowanych granicach. Z tego powodu również model wykładniczy wydaje się bardziej adekwatny.

## Wnioski

Analiza zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnych pozwoliła na dopasowanie metodami statystycznymi regresyjnego modelu wykładniczego prognozującego ten ważny parametr w oparciu o inne standardowo oznaczane wielkości. Uzyskane równanie charakteryzuje się stosunkowo wysokim współczynnikiem korelacji  $R = 0,89$  (współczynnik determinacji  $R^2 = 0,79$ ). Jego postać i generowane wartości graniczne wydają się posiadać pełne uzasadnienie fizyczno-geologiczne. Dopasowane współczynniki równania regresji dla całości danych różnią się w sposób nieistotny w 80% przypadków z ich analogicznymi wartościami otrzymanymi dla równań lokalnych, dopasowanych w obrębie poszczególnych złóż i rejonów występowania węgla brunatnego. Otrzymany model regresyjny spełnia więc warunek ogólności, pozwalając na ocenę wilgotności złożowej węgla niezależnie od rejonu jego występowania. Rezultaty badań z powodzeniem mogą być wykorzystane w praktyce.

Praca wykonana w ramach badań własnych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH.



## LITERATURA

1. Twardowski K., Fąfara Z.: "Uniwersalny model statystyczny objaśniający zmienność wilgotności naturalnej węgla brunatnych". Materiały VI Krajowego Zjazdu Górnictwa Odkrywkowego, tom 2, Konin 1995, s. 223-236.
2. Fąfara Z.: "Analiza porównawcza zależności regresyjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnego od ich popielności". Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN, Tom XXXIX/2, lipiec-grudzień 1995 r. Wydawnictwo "Secesja", Kraków 1996, s. 113-117.
3. Fąfara Z.: "Badanie istotności różnic lokalnych zależności regresyjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnego z uwzględnieniem głębokości zalegania pokładów". Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN, Tom XLI/1, styczeń-czerwiec 1997 r. Wydawnictwo "Secesja", Kraków 1998, s. 228-232.
4. Fąfara Z.: "Analiza istotności różnic lokalnych nieliniowych modeli regresyjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnego". Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN, Tom XLII/1, styczeń-czerwiec 1998 r. Wydawnictwo "Secesja", Kraków 1999, s. 192-195.
5. Fąfara Z.: "Badanie nieliniowych modeli regresyjnych przy ocenie wilgotności naturalnej węgla brunatnego". Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN za 1999 rok, w druku.
6. Fąfara Z., Twardowski K.: "Analiza zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnych". III Konferencja nt. "Zagadnienia ekologiczne w geologii i petrologii węgla". Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 243, Gliwice 1999, s. 45-53.
7. Gabzdyl W.: Petrografia węgla. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1337, Gliwice 1987.

Recenzent: Dr hab. inż. Bronisława Hanak  
Prof. Politechniki Śląskiej

## Abstract

Natural humidity of lignites belongs the most important technological parameters, especially power energy coals, as it is the case in Poland. Literature abounds in numerous examples of models enabling the assessment of natural humidity based on known value of other parameters, usually determined for lignites in laboratory conditions. However, they are of local character and cannot be used for other areas.

It has been attempted in this paper to make a universal regression model of natural humidity prediction for lignites based on ash content and depth of deposition. A very large set of laboratory data from over 1100 measurement series has been prepared. A linear model was assumed but it failed to meet the generality condition of the fit equations. Then various forms of non-linear equations have been analysed. A non-linear asymptotic model has been constructed. It has a simple and compact construction. Its verification shows to a high geological efficiency and practical applicability.