

ZBIGNIEW FAŁARA, KAZIMIERZ TWARDOWSKI

Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, AGH, Kraków

ANALIZA ZMIENNOŚCI WILGOTNOŚCI NATURALNEJ WĘGLI BRUNATNYCH

Streszczenie. Praca poświęcona jest analizie zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnego, jednego z jego najistotniejszych parametrów klasyfikacyjnych. Autorzy poszukują modelu prognostycznego pozwalającego na ocenę zawartości wilgoci w oparciu o standardowo mierzone wskaźniki węgla (zawartość popiołu i głębokość zalegania pokładów). Przedstawiają szereg liniowych zależności regresyjnych charakteryzujących się wysokimi współczynnikami korelacji, ale różniącymi się w sposób istotny ze statystycznego punktu widzenia wartościami odpowiadających sobie współczynników regresji. Równania te mogą więc mieć tylko znaczenie przy badaniach regionalnych. Dopiero zaprezentowany model nieliniowy, przewyższający precyzją opisu zjawiska równania liniowe, posiada cechy zależności uniwersalnej, niezależnej od rejonu występowania węgla brunatnego.

CHANGEABILITY ANALYSIS OF BROWN COAL WATER SATURATION

Summary. This paper concerns changeability analysis of brown coal water saturation, one of the most important coal classification parameter. The authors search for water saturation prognostic model which uses ash content and brown coal depth. The paper presents some linear and nonlinear regression models. The nonlinear water saturation prognostic model is more precise than linear models. It may be used to develop the universal water saturation prognostic model, which does not depend on brown coal place.

Wstęp

Wilgotność naturalna węgla brunatnych może się zmieniać w bardzo szerokich granicach - od ok. 10 do ok. 75 % wag. (odpowiednio dla wysokouwęglonych węgla twardych i węgla torfopodobnych). Właściwy, niskouwęglony węgiel brunatny, nazywany węglem miękkim (typowy dla złóż krajowych z obszaru Nizy Polskiego), zawiera od 40 do 70 % wilgoci złożowej.

Wilgotność całkowita węgla brunatnych w stanie roboczym jest jednym z głównych wskaźników najlepiej charakteryzujących stopień uwęglenia substancji organicznej i jakość węgla. W związku z tym wskaźnik ten generalnie wykorzystywany jest do oceny właściwości fizycznych i chemiczno-technologicznych węgla, oraz jako jedno z głównych kryteriów klasyfikacyjnych węgla brunatnego dla celów technologicznych [7].

W Polsce ogromna większość wydobywanego węgla brunatnego wykorzystywana jest w energetyce, dlatego obowiązuje jego klasyfikacja dla celów energetycznych według

PN-91/G-97050. Głównymi parametrami tej klasyfikacji są wartość opałowa węgla w stanie roboczym Q_i^r oraz zawartość popiołu w węglu suchym A^r . Jako jeden z parametrów uzupełniających uwzględnia ona zawartość wilgoci całkowitej w stanie roboczym W_t^r . Pomimo tej sytuacji oznaczenia laboratoryjne wskaźnika W_t^r węgla brunatnych prowadzone są rzadko. W pracach dokumentacyjnych geologiczno-złożowych przyjmuje się stałą normatywną wartość $W_t^r=50$ %, zbliżoną do wartości przeciętnej tego parametru dla kenezoicznych miękkich węgla brunatnych eksploatowanych w kraju [6,7,10]. Założenie to znacznie upraszcza analizę, lecz uzyskiwane rezultaty mają niejednokrotnie charakter szacunkowy.

W niniejszej pracy omówiono wyniki badań autorów nad możliwością prognozowania wilgotności złożowej węgla brunatnego w oparciu o parametry standardowo mierzone lub oznaczane laboratoryjnie w polskiej praktyce, tzn. na podstawie zapopielenia i głębokości zalegania pokładów węgla brunatnego. Wykorzystano metodę regresji wielokrotnej liniowej i nieliniowej. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że statystyka matematyczna oferuje jedyne właściwe środki do rozwiązania tego problemu. Zamieszczone w tabelach przewidywane wyniki dla złóż węgla brunatnego Nowej Zelandii mają na celu pokazanie ogólnego charakteru obserwowanych tendencji zmian wartości analizowanych parametrów.

Wyniki badań laboratoryjnych

Na potrzeby prowadzonych badań utworzono zbiór danych obejmujący 1413 wyników laboratoryjnych pomiarów wilgotności złożowej i zawartości popiołu próbek węgla brunatnego pobranych na określonej głębokości. Zebrane informacje pochodzą z 20 rejonów występowania węgla brunatnego [6]. W tab. 1 podano podstawowe charakterystyki statystyczne rozważanych parametrów. Utworzony plik dotyczy bardzo zróżnicowanych próbek węgla pod względem jakości i głębokości zalegania pokładów (od kilku do prawie 200 m). Obejmuje on zarówno próbki bardzo dobrych węgla brunatnych o niskiej zawartości popiołu (poniżej 10 %), jak i utwory zawęglone, w których popiół stanowi ponad 50 % całości. Dane charakteryzują się również bardzo dużą zmiennością wilgotności całkowitej (od kilkunastu do 80 %). Rozkłady poszczególnych parametrów są zgodne z rozkładami normalnymi.

Tabela 1

Podstawowe charakterystyki statystyczne analizowanych parametrów

Lp.	Symbol	Jednostka	N	x_{\min}	x_{sr}	x_{\max}	S(x)	A	E
1	H_{sr}	m	1462	7,50	74,79	199,50	46,41	1,17	0,40
2	W_t^r	%	1593	14,40	50,36	80,00	7,16	-1,38	3,19
3	A^r	%	1665	1,75	13,44	79,32	11,13	2,04	5,15

- gdzie: H_{sr} - średnia głębokość opróbowanego interwału,
 W_t^r - zawartość wilgoci całkowitej w węglu w stanie roboczym próbki,
 A^r - zawartość popiołu w węglu w stanie roboczym próbki,
N - liczebność populacji,
 x_{\min} - minimalna wartość parametru,
 x_{sr} - średnia wartość parametru,
 x_{\max} - maksymalna wartość parametru,
S(x) - odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru,
A - współczynnik asymetrii rozkładu parametru,
E - współczynnik ekscentryczności rozkładu parametru.

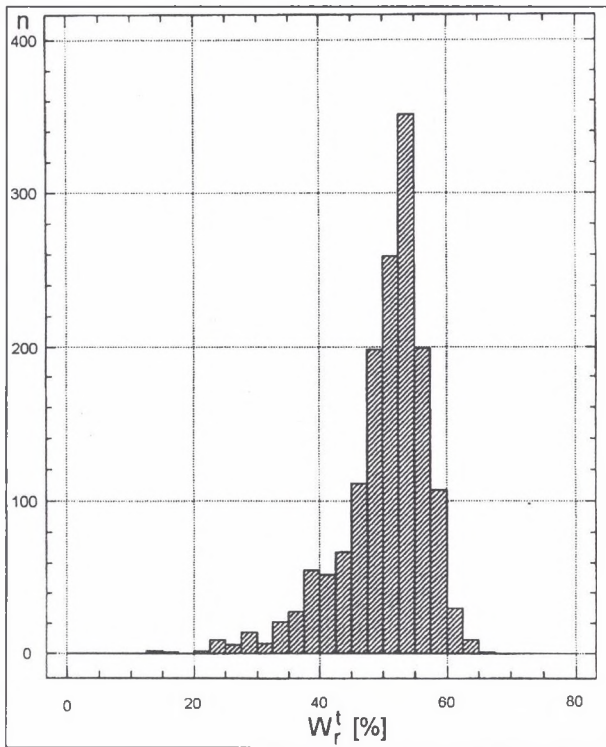
Na rys. 1 przedstawiono histogram częstości zebranych oznaczeń laboratoryjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnego. Rozkład wykazuje ostre maksimum w pobliżu wartości 50%, przyjmowanej w Polsce jako normatywne zawilgocenie. Wartość średnia parametru wynosi 50,36%.

Liniowe jednokrotne modele regresyjne

W pierwszym etapie metodą regresji liniowej jednokrotnej podjęto próbę dopasowania zależności wiążącej wilgotność złożową węgla brunatnego z jego zapozieleniem:

$$W_r^t = a + b * A^t \quad (1)$$

Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 2 [6].



Rys. 1. Histogram częstości analiz laboratoryjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnych
Fig. 1. Frequency histogram laboratory measurements of brown coal water saturation

Otrzymane równania charakteryzują się stosunkowo wysokimi współczynnikami korelacji od 0,60 do 0,99, po pominięciu modeli o wyraźnie odbiegających wartościach parametrów regresji (np. złoża Adamów, Bogdałów, Lubań i Turów). Rozbieżności te spowodowane są najprawdopodobniej niewłaściwą metodą pobierania lub przechowywania próbek, co analizowano we wcześniejszych pracach [np. 6]. Innym mankamentem

opracowanych zależności są istotne różnice na poziomie ufności $p=0,95$ w wartościach odpowiadających sobie współczynników regresji (w odniesieniu do poszczególnych złóż i całości danych). Wartości dopasowanych współczynników zależą silnie od rejonu, z którego pobrano materiał do analizy. Nie ma więc możliwości opracowania uogólnionego modelu postaci (1), niezależnego od miejsca występowania węgla brunatnego [2].

Liniove wielokrotne modele regresyjne

Obserwacje poczynione w trakcie poprzednich badań [5,6] pokazały, że zgodność wartości wyrazów wolnych analizowanych równań regresji była uwarunkowana zbliżoną głębokością zalegania pokładów węgla brunatnego. Wpływ głębokości na wilgotność naturalną węgla jest znany od dawna i określa go między innymi reguła Schürmanna. Zagadnienie to ilościowo próbowano opisać we wcześniejszych pracach [np. 5,6].

Tabela 2

Postać uzyskanych zależności regresyjnych dla modelu: $W_i^r = a + b \cdot A^r$

Lp.	Rejon/złoże	N	H_{\min}	H_{sr}	H_{\max}	a	b	R
1	Adamów	16	44,25	47,5	50,75	51,05	0,28	0.51
2	Bełchatów	124	80	80	80	61,87	-0,63	-0.88
3	Bogdałów	24	35,5	39,056	42,5	58,08	-0,38	-0.67
4	Brzezcie	49	61,8	73,416	93,9	57,56	-0,57	-0.94
5	Drzewce	83	26,05	39,973	52	60,35	-0,56	-0.90
6	Głowaczów	32	23,8	34,359	43,8	59,59	-0,56	-0.93
7	Kaławsk	106	30,8	39,481	51,45	60,22	-0,55	-0.90
8	Konin	65	70	70	70	53,72	-0,60	-0.90
9	Koźmin	17	26,8	33,679	39,5	60,03	-0,55	-0.99
10	Legnica Wschód	193	83,05	145,949	191,7	53,58	-0,54	-0.60
11	Lubań	24	73,3	80,779	89,8	57,09	-0,39	-0.45
12	Lubstów	100	27,35	52,947	90,4	59,28	-0,52	-0.93
13	Mosty	10	48,85	99,505	153,85	64,69	-0,61	-0.63
14	Pątnów	190	43,35	59,819	81,25	56,85	-0,54	-0.94
15	Rzepin	81	79,55	160,048	199,5	56,36	-0,54	-0.76
16	Sieniawa	174	17,25	69,486	107	58,10	-0,54	-0.73
17	Smogóry	10	24,7	32,97	37,7	58,12	-0,51	-0.92
18	Trzcianka	27	25,5	43,848	60,8	58,40	-0,56	-0.61
19	Turów	57	120	120	120	53,21	-0,45	-0.97
20	Nowa Zelandia	31	17,9	55,084	95,35	60,28	-0,52	-0.94
21	Całość danych	1413	17,25	78,15	199,5	60,66	-0,53	-0.88

gdzie: H_{\min} - minimalna głębokość opróbowanego interwału,
 H_{\max} - maksymalna głębokość opróbowanego interwału,
 N - liczebność populacji,
 R - współczynnik korelacji równania regresji.

Generalnie stwierdzono wówczas wyraźne polepszenie jakości opisu zjawiska przez skonstruowane regresyjne liniowe modele interpretacyjne o postaci:

$$W_t^r = a + b * A^r + c * H_{sr} \quad (2)$$

Wyniki zamieszczono w tab. 3.

Tabela 3

Postać uzyskanych zależności regresyjnych dla modelu: $W_t^r = a + b * A^r + c * H_{sr}$

Lp.	Rejon, złóże	Liczebność N	Współczynniki równania regresji			Współ. korel. R	Błąd resztowy S(y)
			a	b	c		
1	Drzewce	83	59,79	-0,57	-0,0273	-0,91	3,47
2	Legnica Wschód	193	58,43	-0,50	-0,0351	-0,78	2,73
3	Pątnów IV	190	59,23	-0,53	-0,0355	-0,96	2,06
4	Rzepin	81	62,37	-0,54	-0,0382	-0,82	3,48
5	Sieniawa	174	61,32	-0,54	-0,0412	-0,85	3,13
6	Trzcianka	27	58,01	-0,50	-0,0269	-0,70	3,38
7	Nowa Zelandia	31	61,90	-0,51	-0,0316	-0,96	1,76
8	Całość	1143	60,66	-0,53	-0,0357	-0,88	3,17

gdzie: S(y) - błąd standardowy resztowy równania regresji.

Liczba uzyskanych modeli uległa zmniejszeniu z powodu niepełnej informacji dotyczącej głębokości pobrania próbek w odniesieniu do części danych oraz nieistotności ze statystycznego punktu widzenia niektórych z otrzymanych zależności. W porównaniu z modelami (1) obserwuje się teraz znacznie wyższe współczynniki korelacji równań (wzrost R o 0,1 do 0,18). Równocześnie wartości odpowiednich współczynników regresji poszczególnych równań są bardziej zbliżone do siebie. Widać zatem wyraźną poprawę z punktu widzenia możliwości uogólnienia modelu regresyjnego.

W wyniku przeprowadzonej na poziomie ufności $p=0,95$ analizy statystycznej istotności różnic wartości współczynników regresji poszczególnych równań [3] ustalono zgodność wartości współczynników kierunkowych (b i c) w prawie 90 % przypadków, (podobnie jak dla modelu (1)). Zdecydowanie poprawiła się natomiast zgodność wartości wyrazów wolnych uzyskanych równań regresji (wzrost z 17% poprzednio do 54% obecnie). Generalnie jednak, typowane do roli uniwersalnego modelu równanie otrzymane dla całości danych nie spełnia warunku ogólności. Konieczne są dalsze poszukiwania.

Nieliniowe wielokrotne modele regresyjne

W trakcie badań wzięto pod uwagę różne wersje nieliniowych modeli regresyjnych [1,4]. Najkorzystniejsze rezultaty otrzymano dla modelu następującej postaci:

$$\ln(W_t^r) = a + b * A^r + c * \ln(H_{sr}) \quad (3)$$

Wartości dopasowanych współczynników regresji zamieszczono w tab. 4.

Tabela 4

Postać uzyskanych zaleźności regresyjnych dla modelu: $\ln(W_r')=a+b \cdot A^r+c \cdot \ln(H_{gr})$

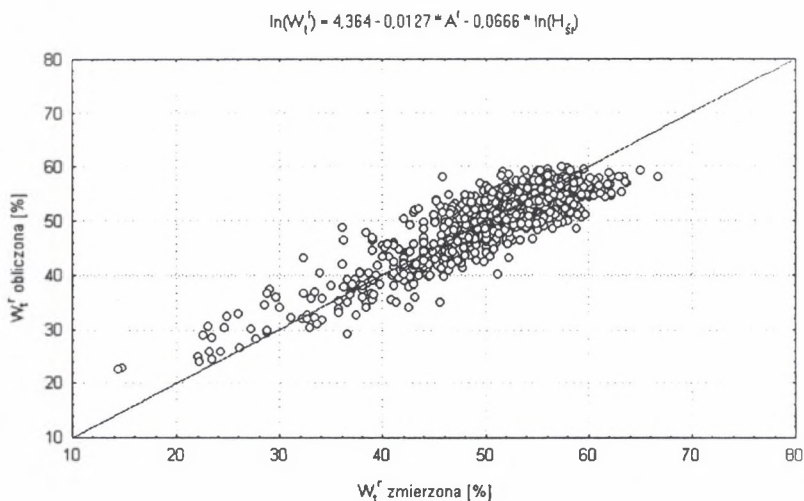
Lp.	Rejon, złóże	Liczebność N	Współczynniki równania regresji			Współ.korel. R	Błąd resztowy S(y)
			a	b	c		
1	Drzewce	83	4,281	-0,0119	-0,0736	-0,94	0,071
2	Legnica Wschód	193	4,419	-0,0109	-0,0770	-0,81	0,058
3	Pątnów IV	190	4,278	-0,0122	-0,0595	-0,97	2,06
4	Rzepin	81	4,472	-0,0127	-0,0717	-0,88	0,078
5	Sieniawa	174	4,341	-0,0119	-0,0632	-0,86	0,061
6	Trzcianka	27	4,493	-0,0138	-0,0672	-0,72	0,070
7	Nowa Zelandia	31	4,234	-0,0115	-0,0623	-0,96	0,032
8	Całość	1143	4,364	-0,0127	-0,0666	-0,90	0,072

Otrzymane równania charakteryzują się jeszcze wyższym współczynnikiem korelacji (w porównaniu z modelem liniowym (2) wzrost współczynnika R o 0,1 do nawet 0,6), a przez to większą dokładnością ocen wilgotności naturalnej. Zmniejszeniu uległy ponadto różnice w wartościach odpowiednich współczynników regresji dla poszczególnych równań. Testy statystyczne wykazują ich zgodność dla prawie 80% przypadków (poprzednio 54%), co może pozytywnie rokować na przyszłość co do możliwości opracowania uniwersalnego modelu interpretacyjnego do prognozowania wilgotności złóźowej węgla brunatnych niezależnie od rejonu jego występowania.

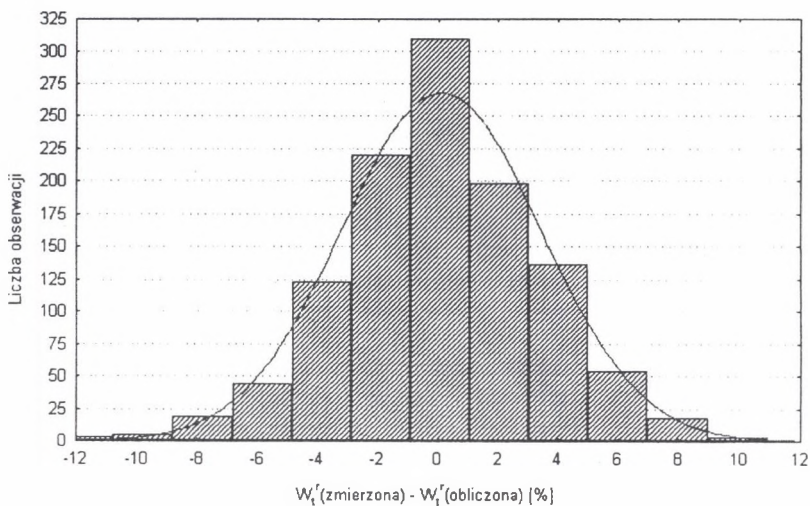
Na rys. 2 przedstawiono rozrzut punktów w układzie wilgotność naturalna prognozowana według modelu (3) od zmierzonej laboratoryjnie. Na rys. 3 zamieszczono histogram częstości różnic pomiędzy wartością wilgotności zmierzoną i obliczoną. Oba rysunki zostały przygotowane dla zaleźności regresyjnej uzyskanej dla całości danych, czyli bardzo obszernej próby nauczającej obejmującej 1143 obserwacje.

Z rys. 2 wynika, że oceny wilgotności otrzymane na podstawie modelu (3) są w dużym stopniu zbieżne z wartościami zmierzonymi (bardzo dobre skupienie punktów na diagramie). Można mieć jedynie drobne zastrzeżenia do tendencji rozkładu punktów. Dla niewielkich zawartości wilgoci (do ok. 30%) wartość obliczona jest nieco zawyżona w stosunku do otrzymanej laboratoryjnie, natomiast przy dużym zawilgoceniu próbek (powyżej ok. 55%) prognoza wydaje się być nieznacznie zaniżona. W obszarze typowym dla polskich złóź węgla brunatnego (od ok. 40% do ok. 55%) punkty układają się symetrycznie względem prostej oznaczającej równość wilgotności zmierzonej i obliczonej.

Na rys. 3 pokazano, że różnice pomiędzy wartościami wilgotności złóźowej obliczonej według modelu (3) i zmierzonej laboratoryjnie są niewielkie i generalnie nie przekraczają 10%, natomiast w 95% przypadków nie przekraczają 4%. Przedstawiony histogram jest symetryczny względem różnicy równej 0%.



Rys. 2. Rozrzut zmierzonej i obliczonej wilgotności naturalnej węgla brunatnego
 Fig.2. Crossplot of measured and predicted brown coal water saturation



Rys.3. Histogram częstości różnic pomiędzy wartością zmierzoną i obliczoną wilgotności naturalnej węgla brunatnych

Fig.3. Frequency histogram differences between measured and predicted brown coal water saturation

Wnioski

Analiza zmienności wilgotności naturalnej węgla brunatnych pozwoliła na opracowanie metodami statystycznymi regresyjnymi modeli prognozujących ten ważny z punktu widzenia klasyfikacji węgla brunatnego parametr w oparciu o inne standardowo oznaczane wielkości. W pierwszym kroku wiązano wilgotność złożową liniowo jedynie z zawartością popiołu. Uzyskano równania regresyjne o wysokich współczynnikach korelacji, różniące się jednak istotnie wartościami współczynników regresji (regionalizacja problemu). Wprowadzenie do liniowego równania regresji dodatkowo głębokości pobrania próbki doprowadziło do polepszenia opisu (wzrost współczynników korelacji równań regresji) i zwiększenia podobieństwa zależności otrzymanych dla poszczególnych przypadków. Nie udało się jednak uzyskać uniwersalnego modelu niezależnego od rejonu występowania węgla brunatnego. Precyzja opisu wzrosła dodatkowo (wyższe wartości R) przy wykorzystaniu zaprezentowanego nieliniowego modelu regresyjnego. Ponadto uzyskano większą zbieżność wartości odpowiednich współczynników regresji (równania nie różnią się od siebie w sposób istotny ze statystycznego punktu widzenia w prawie 80% rozważanych przypadków). Krok do otrzymania uniwersalnej zależności regresyjnej pozwalającej na ocenę wilgotności naturalnej węgla brunatnych niezależnie od rejonu jego występowania wydaje się niewielki. Otrzymane wyniki z powodzeniem mogą być wykorzystane w praktyce.

Literatura

1. Fąfara Z.: Analiza istotności różnic lokalnych nieliniowych modeli regresyjnych wilgotności naturalnej węgla brunatnego. Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN za 1998 rok, w druku.
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.
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.
4. Fąfara Z.: Badanie nieliniowych modeli regresyjnych przy ocenie wilgotności naturalnej węgla brunatnego. Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN za 1999 rok, w druku.
5. Fąfara Z.: Badanie zależności zawartości wilgoci złożowej węgla brunatnego od zawartości popiołu i głębokości zalegania pokładów. Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN, Tom XXXVIII/1, styczeń-czerwiec 1994 r. Wydawnictwo „Secesja”, Kraków 1995.
6. Fąfara Z.: Opracowanie metody kompleksowej interpretacji danych geofizyki wiertniczej w otworach na złożach węgla brunatnych. Praca doktorska, Wydział Wiertniczo-Naftowy AGH, Kraków 1993.
7. Gabzdyl W.: Petrografia węgla. Skrypt Uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1337, Gliwice 1987.

8. Twardowski K., Fąfara Z.: Badanie prawidłowości zmian zawartości wilgoci złożowej w węglu brunatnym. Sprawozdanie z Posiedzeń Naukowych PAN, Tom XXXVIII/2, lipiec-grudzień 1994 r. Wydawnictwo „Secesja”, Kraków 1995.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Wiesław Gabzdyl