

Mojemu Promotorowi
doc. dr Rudolfowi Burkowi składam
bardzo serdeczne podziękowanie za
pomoc i opiekę podczas realizacji
tej pracy.

Wprowadzenie	1
1. Teoretyczne podstawy mikrofalowych metod oznaczania wilgotności	4
1.1. Płaskie fale elektromagnetyczne w jednorodnych ośrodkach obojętnych	4
1.2. Własności dielektryczne wody	8
1.3. Własności dielektryczne węgla kamiennego ...	14
1.4. Fale elektromagnetyczne w ośrodkach niejednorodnych	17
2. Modele ośrodków niejednorodnych	21
2.1. Efektywna przenikalność elektryczna ośrodków niejednorodnych	21
2.2. Tłumienie fal elektromagnetycznych w ośrodkach niejednorodnych wg Benzara	24
3. Stan badań nad wpływem własności fizyko-chemicznych węgla na przesunięcie fazy i tłumienie mikrofal	28
4. Tłumienie mikrofal w węglu kamiennym według ziarnowo-warstwowego modelu ośrodka niejednorodnego	35
4.1. Ziarnowo-warstwowy model próbki węgla kamiennego	35
4.2. Wyprowadzenie wzoru na stałą tłumienia niejednorodnego ośrodka ziarnistego	37
4.3. Wpływ własności próbki węgla kamiennego na stałą tłumienia dla ośrodków niejednorodnych i ziarnistych	41

	str.
Część doświadczalna	47
5. Aparatura	48
5.1. Mostkowy układ do pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal	48
5.2. Mikrofalowy miernik wilgotności	50
5.3. Układ pomiarowy do wyznaczania gęstości powierzchniowej węgla	50
6. Technika pomiarów	52
6.1. Badania zjawiska tłumienia promieniowania mikrofalowego	52
6.2. Badania nad wykorzystaniem zjawiska osłabienia promieniowania gamma do wyzna- czania gęstości powierzchniowej węgla	52
7. Metoda opracowywania wyników	54
8. Badania wpływu gęstości objętościowej, grubości warstwy oraz wilgotności węgla na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu	56
8.1. Wyniki	56
8.2. Dyskusja wyników i wnioski	76
9. Badania nad wpływem wielkości ziarna na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu	80
9.1. Wyniki	80
10. Porównanie wyników doświadczalnych z obliczonymi na podstawie modelu ziarnowo-warstwowego	88
11. Metody pomiaru wilgotności węgla kamiennego w warunkach zmieniającej się gęstości objętościowej	91
11.1 Metoda amplitudowo-fazowa	91

	str.
12. Metoda mikrofalowo-radiometryczna	99
13. Pomiar gęstości powierzchniowej węgla metodą osłabienia promieniowania gamma	102
13.1. Pomiar masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma	102
13.2. Dyskusja wyników i wnioski	106
14. Zastosowanie metody mikrofalowo-radiometrycznej do oznaczeń wilgotności węgla kamiennego	110
14.1. Krzywe wzorcowania przy stałej grubości warstwy węgla	110
14.2. Krzywe wzorcowania przy zmieniającej się gęstości objętościowej i grubości warstwy węgla	115
15. Dyskusja i wnioski	121
Bibliografia	125
Uzupełnienia	131

W p r o w a d z e n i e.

Wilgotność węgla kamiennego stanowi cała woda w nim zawarta. W węglu rozróżnia się trzy rodzaje wilgotności: przemijającą, higroskopijną i krystalizacyjną. Suma wilgotności przemijającej i higroskopijnej zwana jest wilgotnością całkowitą i ma ona wpływ na wartość opałową węgla. Dlatego też ten rodzaj wilgotności jest wyznaczany w elektrowniach i kopalniach.

Istnieje wiele metod wyznaczania wilgotności - jednak metodą standardową jest metoda grawimetryczna. Polega ona na wyznaczeniu ubytku masy próbki węgla suszonej w temperaturze 105 - 110 °C w ciągu jednej godziny (granulację i masę próbki określają Polskie Normy) [40, 45, 51]. Jest to metoda bardzo dokładna, ale ze względu na długi czas suszenia nie nadaje się do pomiarów ciągłych. Znacznie skraca się czas potrzebny do oznaczenia wilgotności przy wykorzystaniu do suszenia węgla promieniowania podczerwonego [37], lub mikrofalowego [43, 44]. Jednak podczas suszenia w podczerwieni próbki węgla mogą ulegać zbyt silnemu powierzchniowemu nagrzewaniu, co może prowadzić do ich termicznego rozkładu. Natomiast metoda suszenia mikrofalowego znalazła zastosowanie jedynie do laboratoryjnego oznaczania wilgotności węgla.

W warunkach przemysłowych największe znaczenie mają metody szybkie, pozwalające na pomiary wilgotności węgla transportowanego na taśmociągach.

Spośród takich metod znane są metody jądrowe [36, 13] i elektryczne (pojemnościowe [2, 20, 37, 47] i mikrofalowe [19, 22, 55]). Metody elektryczne wykorzystują fakt, że przenikalność elektryczna wody jest dużo większa niż suchego

węgla, przy czym przenikalność suchego węgla zależy od jego własności fizyko-chemicznych. Z metod elektrycznych na uwagę zasługują metody mikrofalowe, ponieważ ich niewątpliwą zaletą jest brak bezpośredniego kontaktu czujnika pomiarowego z badanym materiałem. Metody te wykorzystują oddziaływanie fal elektromagnetycznych o częstotliwościach 300 - 300000 MHz z zawilgoconym węglem.

Na dokładność oznaczeń wilgotności metodami mikrofalowymi oprócz takich czynników jak grubość warstwy węgla, jego gęstość objętościowa oraz odległość anten od warstwy ma również wpływ zmienność własności fizyko-chemicznych węgla. Spośród własności fizyko-chemicznych najistotniejszy wpływ mają własności sorpcyjne węgla, a co za tym idzie sposób związania wody, granulacja, skład chemiczny. Obecnie nie jest możliwe uniezależnienie mikrofalowych metod oznaczania wilgotności od własności fizyko-chemicznych. Biorąc pod uwagę, że własności fizyko-chemiczne węgla pochodzącego z tej samej kopalni można uznać za stałe, najważniejszym problemem jest wpływ grubości warstwy węgla i jego gęstości objętościowej.

Dlatego w istniejących metodach do ciągłych pomiarów wilgotności, wykorzystujących zjawisko absorpcji lub odbicia mikrofal, konieczne jest utrzymywanie stałej grubości warstwy węgla, co uzyskuje się bądź przez jej formowanie [19], bądź przez zanurzenie anteny w strudze węgla [22].

Zmniejszenie wpływu gęstości objętościowej uzyskuje się przez uśrednienie za pomocą układu komputerowego sygnałów dochodzących do anteny odbiorczej [22].

Pożądana była by taka mikrofalowa metoda, w której nie było by konieczne formowanie strugi węgla, co jest kłopotliwe

w warunkach przemysłowych, a jednocześnie wyniki oznaczeń wilgotności nie zależały by od grubości warstwy i gęstości objętościowej węgla.

W tej pracy wykazano, że poprzez pomiar tłumienia mikrofal i względnego osłabienia natężenia promieniowania gamma można uzyskać wyniki oznaczeń wilgotności węgla niezależne od grubości warstwy i jego gęstości objętościowej.

1. Teoretyczne podstawy mikrofalowych metod
oznaczania wilgotności.

1.1 Płaskie fale elektromagnetyczne w jednorodnych
ośrodkach obojętnych.

Biorąc pod uwagę własności elektryczne, za ośrodki jednorodne uznaje się takie, których przenikalność elektryczna i magnetyczna oraz przewodność nie zależą od współrzędnych punktu ośrodka [41]. Ośrodki są obojętne jeśli nie zawierają źródeł pola elektrycznego.

Równania płaskiej fali elektromagnetycznej, rozchodzącej się w kierunku osi z kartezyjańskiego układu współrzędnych, w takich ośrodkach mają postać:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t - \gamma z} \quad (1.1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{i\omega t - \gamma z} \quad (1.2)$$

gdzie: \vec{E}_0 - amplituda wektora natężenia pola elektrycznego \vec{E} ,

\vec{H}_0 - amplituda wektora natężenia pola magnetycznego \vec{H} ,

ω - częstotliwość kątowna (pulsacja) fali elektromagnetycznej,

$\gamma = i\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0\epsilon\mu}$ - zespolony współczynnik propagacji,

ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni,

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni,

ϵ - zespolona, względna przenikalność elektryczna ośrodka,

μ - zespolona, względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Sprzężone składowe poprzeczne wektorów \vec{E} i \vec{H} są do siebie prostopadłe, a stosunek ich bezwzględnych wartości nazywany jest impedancją falową dielektryka Z .

$$Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{\gamma}{i\omega\varepsilon_0\varepsilon} = \frac{i\omega\mu_0\mu}{\gamma} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}$$

Zapisując zespolony współczynnik propagacji w ogólnej postaci:

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

i wstawiając go do równań (1.1) i (1.2) otrzymujemy:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1.3)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1.4)$$

Ze względu na charakter jaki współczynniki α i β pełnią w równaniach (1.3) i (1.4), nazwano je odpowiednio stałą tłumienia i stałą fazową. Stała tłumienia i stała fazowa wyrażają się następująco:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu''}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''\mu' + \varepsilon'\mu''}{\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu''} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu''}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''\mu' + \varepsilon'\mu''}{\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu''} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

gdzie: ϵ', μ' - odpowiednio; część rzeczywista zespolonej względnej przenikalności elektrycznej i magnetycznej ośrodka,

ϵ'', μ'' - odpowiednio; część urojona zespolonej względnej przenikalności elektrycznej i magnetycznej ośrodka,

c - prędkość światła w próżni.

W przypadku rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku, w którym straty magnetyczne można zaniedbać, to znaczy gdy $\mu'' = 0$, wzory (1.5) i (1.6) przybierają następującą postać:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{\epsilon' \mu'}{2} \left[\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{\epsilon' \mu'}{2} \left[\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

gdzie: $\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\tilde{\sigma}}{\epsilon' \omega}$ jest tangensem kąta stratności.

Występująca tu wielkość $\tilde{\sigma}$ jest przewodnością dielektryczną obejmującą wszystkie efekty związane z dyssypacją energii - może ona przedstawiać przewodność omową związaną z ruchem ładunków, jak również straty energii związane z tarciem przy orientacji dipoli.

Strumień energii fali elektromagnetycznej jest określony przez wektor Poyntinga:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

W przypadku liniowo spolaryzowanej fali płaskiej, biegnącej w kierunku osi z kartezjańskiego układu współrzędnych, strumień energii jest równy:

$$S_z = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon'}{\mu_0 \mu}} E_x^2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon'}{\mu_0 \mu}} E_{0x} e^{-2\alpha z} e^{2i(\omega t - \beta z)} \quad (1.9)$$

przy czym E_{0x} - jest amplitudą x-owej składowej wektora \vec{E} .

Ze wzoru (1.9) wynika, że przy przechodzeniu fali elektromagnetycznej przez dielektryk, strumień energii lub gęstość mocy maleje z drogą według prawa wykładniczego.

Efekt osłabienia fali elektromagnetycznej określa się zazwyczaj przy pomocy wielkości zwanej tłumieniem wyrażonym w decybelach [23] :

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_1} = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} = 8,686 \cdot \alpha \cdot d \quad (1.10)$$

gdzie d - jest odległością w dielektryku, na której moc fali elektromagnetycznej lub wartość amplitudy wektora natężenia pola elektrycznego maleje odpowiednio od P_0 do P_1 lub od E_0 do E_1 .

Ze wzorów (1.7) , (1.8) i (1.10) wynika, że tłumienie i przesunięcie fazy fali elektromagnetycznej przy przechodzeniu przez ośrodek, zależy od jego własności dielektrycznych, to znaczy od wartości ϵ i $\text{tg } \delta$.

1.2 Własności dielektryczne wody.

Cząsteczki wody posiadają trwałe momenty dipolowe $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 6,2 \cdot 10^{-30} \text{ Cm} = 1,87$ jednostki Debye'a. Dlatego też woda jest dielektrykiem dipolowym. Własności dielektryczne substancji określa jej przenikalność ϵ lub podatność elektryczna χ , przy czym:

$$\chi = \epsilon - 1$$

Wyrażenie na podatność elektryczną cieczy dipolowych, takich jak woda, podał Kirkwood. W swojej teorii rozważa dielektryk jako ośrodek ciągły zawierający kuliste drobiny dipolowe o momencie dipolowym μ_s . Kirkwood [27] podaje wyrażenie na podatność elektryczną dipolową, to znaczy związaną ze zjawiskiem polaryzacji dipolowej w postaci:

$$\chi_s - \chi_\infty = \frac{3(\chi_s + 1)}{2\chi_s + \chi_\infty + 3} \left(\frac{\chi_\infty + 3}{3} \right)^2 \frac{\mu_s^2 N}{3\epsilon_0 kT} (1 + \langle \cos^2 \gamma \rangle) \quad (1.11)$$

gdzie: χ_s - podatność całkowita dielektryka (tzw. statyczna),

χ_∞ - podatność indukowana związana ze zjawiskiem polaryzacji elektronowej i jonowej,

$(\chi_s - \chi_\infty)$ - podatność dipolowa związana ze zjawiskiem polaryzacji dipolowej,

N - liczba drobin w jednostce objętości,

μ_s - moment dipolowy centralnego wyróżnionego dipola otoczonego z sąsiednimi drobinami,

$\langle \cos^2 \gamma \rangle$ - średnia wartość kosinusa kąta γ , jaki tworzą momenty dipolowe tych drobin z wyróżnionym dipolem,

ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni,

k - stała Boltzmana,

T - temperatura dielektryka.

Wartości statycznej podatności elektrycznej χ_s wody (w stałym polu elektrycznym o niewielkim natężeniu), obliczone z równania podanego przez Kirkwooda, dosyć dobrze zgadzają się z wartościami doświadczalnymi. I tak, w temperaturze 300 K podatność elektryczna, obliczona, wynosi 63 zaś wartość doświadczalna wynosi 78, w temperaturze 353 K χ obliczone wynosi 53 zaś doświadczalne 60 [15].

W słabych polach elektrycznych podatność elektryczna dielektryka jest wielkością zależną tylko od jego własności fizycznych i temperatury. Natomiast gdy dielektryk znajduje się w silnym polu elektrycznym jego podatność zależy również od natężenia pola, co można zapisać następująco [15]:

$$\chi = {}^0\chi + 3bE^2 + 5cE^4 + \dots$$

gdzie ${}^0\chi$ jest podatnością elektryczną w nieobecności zewnętrznego pola, E jest natężeniem pola elektrycznego, natomiast b, c, \dots są współczynnikami szeregu.

Zmianę podatności dielektryka wywołaną umieszczeniem go w silnym zewnętrznym polu elektrycznym nazywa się zjawiskiem nieliniowym (NDE) w układach drobin dipolowych. Zgodnie z teorią Debye'a - Herwega oraz badaniami doświadczalnymi, zmiana podatności elektrycznej $\Delta\chi$ w silnym polu elektrycznym jest kwadratową funkcją natężenia pola elektrycznego [15].

$$\Delta\chi \sim E^2$$

Zjawisko NDE dla wody było badane przez Malsha oraz Kołodzieja i in.. Zmierzona dla wody wartość $\frac{\Delta\chi}{E^2}$ (tzw. nasycenie) wynosi według Malsha $-8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ [39], natomiast według Kołodzieja i in. $-10,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2$ [29]. Woda w silnych polach elektrycznych zachowuje się więc podobnie jak w słabych. Świadczy to o tym, że pola stosowane przez wyżej wymienionych autorów (10^7 V/m) są znacznie słabsze od pól międzycząsteczkowych jakie istnieją w wodzie [15].

Jeżeli dielektryk zostanie umieszczony w zmiennym polu elektrycznym:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$$

gdzie ω jest pulsacją pola a \vec{E}_0 amplitudą wektora natężenia, wówczas podatność elektryczna ze względu na występowanie strat dielektrycznych staje się wielkością zespoloną i zależy od pulsacji tego pola zgodnie z równaniami Debye'a:

$$\chi = \chi' - i\chi'' = \chi_\infty + \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (1.12)$$

lub po rozbiciu na część rzeczywistą χ' i urojoną χ'' :

$$\chi' = \chi_\infty + \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.13)$$

$$\chi'' = \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau \quad (1.14)$$

gdzie τ jest tak zwanym czasem relaksacji określonym przez Debye'a wzorem [25]:

$$\tau = \frac{3\eta}{kT} \text{ V}$$

gdzie V - objętość drobiny,

η - makroskopowy współczynnik lepkości ośrodka.

Czas relaksacji jest wielkością charakterystyczną dla danego dielektryka. Dla wody w temperaturze 292 K (19°C) czas relaksacji wynosi 10^{-11} s [52].

Uwzględniając związek między przenikalnością i podatnością elektryczną dielektryka

$$\chi' = \epsilon' - 1 \quad i \quad \chi'' = \epsilon''$$

równania (1.12) - (1.14) można zapisać w następujący sposób:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (1.15)$$

$$\epsilon' = \epsilon + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.16)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau \quad (1.17)$$

Przenikalność elektryczna wody, tak jak wszystkich substancji dipolowych, zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Potwierdzają to pomiary wykonywane przez wielu badaczy.

W tabeli 1 podano wartości przenikalności elektrycznej wody w temperaturach od 0°C do 70°C przy częstotliwości pola

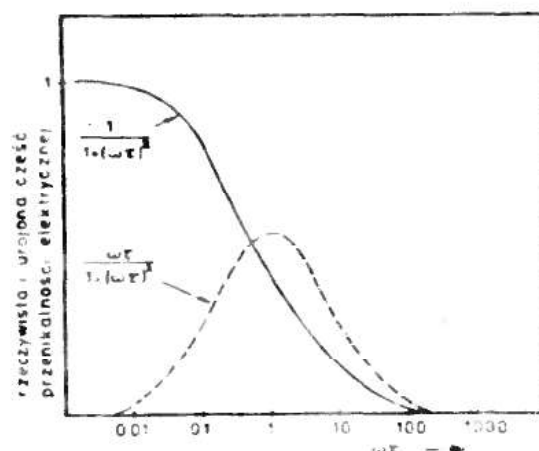
$$\nu_1 = 1,74 \text{ GHz} \quad i \quad \nu_2 = 0,58 \text{ GHz} \text{ uzyskane przez Cooka [17].}$$

Zależność rzeczywistej i urojonej części przenikalności elektrycznej wody od pulsacji pola elektrycznego przedstawiona jest na rysunku 1 .

Tabela 1

Doświadczalne wartości rzeczywistej i urojonej części przenikalności elektrycznych wody w temperaturach od 0°C do 70°C uzyskane przez Cooka dla dwu różnych częstotliwości pola.

t [°C]	$\nu_1 = 1,74 \text{ GHz}$		$\nu_2 = 0,58 \text{ GHz}$	
	$\epsilon' \pm 1\%$	$\epsilon'' \pm 2\%$	$\epsilon' \pm 0,6\%$	$\epsilon'' \pm 2\%$
0	85,3	16,5	88,1	5,85
10	82,4	11,0	84,0	3,85
20	79,2	7,9	80,3	2,75
30	76,1	5,9	76,6	2,05
40	72,9	4,4	73,3	1,55
50	69,7	3,60	69,9	1,25
60	66,7	2,90	66,8	0,96
70	63,7	2,49	-	-



Rys. 1. Zależność rzeczywistej i urojonej części zespolonej przenikalności elektrycznej wody od pulsacji pola elektrycznego [52].

Ponieważ straty mocy pola w jednostce objętości dielektryka wyrażają się wzorem [52]:

$$P = \omega |\epsilon''| E^2$$

więc ich zależność od pulsacji pola opisana jest zależnością podobną do przedstawionej linią przerywaną na rysunku 1. Widać z tego rysunku, że maksymalne straty mocy występują przy częstotliwościach bliskich $\frac{1}{\tau}$. W przypadku wody są to częstotliwości z zakresu mikrofal ($\nu \approx 10$ GHz) [52].

Fakt ten uzasadnia wykorzystywanie zjawiska absorpcji mikrofal do wyznaczania wilgotności materiałów.

1.3. Własności dielektryczne węgla kamiennego.

Przenikalność elektryczna węgla kamiennego umieszczonego w polu elektromagnetycznym zależy od częstotliwości tego pola. W zakresie częstotliwości niższych niż mikrofalowe nie występują straty dielektryczne, a więc przenikalność elektryczna węgla jest wielkością rzeczywistą i można ją uważać za przenikalność elektryczną statyczną [18], [35].

Groenewege i in. [18] mierzyli przenikalności elektryczne węgla kamiennego przy częstotliwości pola 10^6 Hz. Zmierzone przez nich wartości ϵ dla węgla kamiennego zależą od jego stopnia uwęglenia. W przypadku węgla suchego, zawierającego jedynie wodę krystalizacyjną, przy małej zawartości pierwiastka C (około 70 %) ϵ osiąga wartość 5, przy wzroście stopnia uwęglenia (70 - 87 %) wartość ϵ zmniejsza się do około 3. Zmniejszenie się wartości ϵ Groenewege i współpracownicy tłumaczą faktem utraty charakteru polarnego przez jednostki strukturalne i zanikaniem grup OH i COOH.

Grupy OH i COOH mają duże momenty dipolowe. Na przykład moment dipolowy drobiny grupy COOH wynosi $\mu_{\text{COOH}} = 5,66 \cdot 10^{-30}$ C·m = 1,70 jednostki Debye'a [15], a więc jest niewiele mniejszy niż dla wody ($\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 6,2 \cdot 10^{-30}$ C·m = 1,87 jednostki Debye'a [52]). Natomiast średnie momenty dipolowe jednostek strukturalnych węgla wahają się od 0,5 jednostki Debye'a dla węgla o zawartości 70 % C, do 0 jednostek Debye'a dla węgla o zawartości 87 % C [18]. Fakt, że jednostki strukturalne węgla mają tak małe momenty dipolowe Van Krevelen [35] tłumaczy symetrycznym uporządkowaniem grup polarnych wokół układów pierścieniowych.

Groenewege i in.[18] stwierdzili gwałtowny wzrost przenikalności elektrycznej węgla przy zawartości pierwiastka C powyżej 87 % mimo, że w tym zakresie uwęglenia liczba grup polarnych na jednostkę strukturalną zmniejsza się w sposób ciągły. Autorzy przypisują ten gwałtowny wzrost zwiększeniu przewodności elektrycznej.

W zakresie częstotliwości mikrofalowych przenikalność elektryczna węgla kamiennego staje się wielkością zespoloną - występują straty dielektryczne. Badania przenikalności elektrycznej ϵ i tangensa kąta stratności węgla kamiennego w zakresie częstotliwości 8,2 - 12,4 GHz były przeprowadzone przez Balanisa i in.[1]. Średnie wartości ϵ i $\text{tg}\delta$ uzyskane przez tych autorów dla węgla kamiennego z Pittsburgha podane są w tabeli 2.

T a b e l a 2.

Średnie wartości ϵ i $\text{tg}\delta$ uzyskane przez Balanisa i in.[1] dla węgla kamiennego z Pittsburgha. Zakres częstotliwości 8,2 - 12,4 GHz.

charakterystyka próbek	wilgotność [%]	ϵ	$\text{tg}\delta$
podziarno 0 - 0,127 mm	0	2,06	0,032
	15	2,12	0,073
ziarnista 6,36 mm	0	3,07	0,057
	10	3,86	0,183



Inf.

Zawilgocony węgiel kamienny stanowi ziarnisty ośrodek niejednorodny, w skład którego wchodzi substancje o bardzo zróżnicowanych przenikalnościach elektrycznych: woda, suchy węgiel i powietrze. Oprócz tego przenikalność elektryczna wody zawartej w węglu zależy od stopnia jej związania z powierzchnią węgla. Określenie zawartości wody związanej z powierzchnią a także znalezienie funkcyjnej zależności przenikalności elektrycznej wody od odległości od powierzchni węgla jest zagadnieniem niezwykle skomplikowanym ze względu na złożoność oddziaływań pomiędzy powierzchnią węgla i dipolami wody. Oddziaływania pomiędzy powierzchnią węgla i dipolami wody mogą prowadzić do ograniczenia rotacji dipoli wody pod wpływem pola elektromagnetycznego co prowadzi do zmniejszenia przenikalności elektrycznej wody.

Zmniejszenie przenikalności elektrycznej wody może być również spowodowane zjawiskiem nieliniowym NDE wywołanym tym, że dipole wody mogą znajdować się w polu elektrycznym indukowanym na skutek polaryzacji dielektryka jakim jest węgiel.

Ze względu na to, że zarówno wielkość natężenia indukowanego pola elektrycznego jak i wielkość powierzchni rzeczywistej węgla (wiążącej wodę) są trudne do określenia, dane dotyczące zmian przenikalności elektrycznej wody w otoczeniu węgla w literaturze nie są dostępne.

1.4. Fale elektromagnetyczne w ośrodkach niejednorodnych.

Jeżeli co najmniej jeden parametr charakteryzujący ośrodek, np. przenikalność elektryczna, zależy od współrzędnych punktu, w którym ten parametr jest określony, to taki ośrodek jest uważany za ośrodek niejednorodny [41].

Przenikalność elektryczną ośrodka niejednorodnego można zapisać w postaci:

$$\epsilon^* = \epsilon^*(\vec{r})$$

gdzie \vec{r} jest wektorem wodzącym punktu ośrodka.

Równanie falowe fali elektromagnetycznej w ośrodku niejednorodnym ma postać [41]:

$$\nabla^2 \vec{E} + \nabla \left(\frac{1}{\epsilon^*(\vec{r})} \vec{E} \cdot \nabla \epsilon^*(\vec{r}) \right) + \omega^2 \mu \epsilon^*(\vec{r}) \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.18)$$

Znane są przybliżone metody rozwiązania tego równania. Jedną z metod tzw. WKBJ [16] jest stosowana w przypadku, gdy ϵ^* jest wolno zmieniającą się funkcją \vec{r} . Ogólne rozwiązanie równania (1.18) metodą WKBJ dla fali płaskiej można przedstawić w postaci:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}(z_0) \left[\frac{\mu \epsilon^*(z_0)}{\mu \epsilon^*(z)} \right]^{\frac{1}{4}} \exp \left[i 2\pi \omega \left(\int_{z_0}^z \sqrt{u \epsilon^*(z)} dz - t \right) \right] \quad (1.19)$$

Aby otrzymać rozwiązanie numeryczne potrzebna jest znajomość analitycznej postaci zależności $\epsilon^*(\vec{r})$. Dla ośrodków, których przenikalność elektryczna zależy w sposób stochastyczny od współrzędnych przestrzennych wykorzystanie rozwiązania (1.19) w sposób ścisły jest niemożliwe.

Druga metoda znajduje zastosowanie w przypadku gwałtownych zmian przenikalności elektrycznej w pewnym małym obszarze i powolnych jej zmian poza tym obszarem. Można wtedy ośrodek niejednorodny przedstawić jako połączenie dwóch lub więcej ośrodków jednorodnych i zastosować prawa dotyczące propagacji przez granicę dwóch ośrodków dla fal elektromagnetycznych.

W ośrodkach niejednorodnych na tłumienie fali elektromagnetycznej ma wpływ oprócz strat dielektrycznych również rozpraszanie na niejednorodnościach, które stanowią centra rozpraszające. Centrami rozpraszającymi mogą być ziarna substancji o przenikalności elektrycznej znacznie różniącej się od przenikalności elektrycznej otoczenia np. (ziarna węgla w wodzie). Rozproszenie można analizować przyjmując, że pole fali promieniowania padającego na ośrodek indukuje w centrach rozpraszających multipole elektryczne i magnetyczne, które są źródłem promieniowania rozproszonego.

Jeżeli długość fali promieniowania jest duża w porównaniu z rozmiarami centrum rozpraszającego to istotne znaczenie mają najniższe multipole, zazwyczaj dipole elektryczne i magnetyczne [24].

Natężenie promieniowania elektromagnetycznego przechodzącego przez warstwę ośrodka niejednorodnego o grubości d (zawierającego kuliste centra rozpraszające o rozmiarach mniejszych od długości fali λ) maleje na skutek rozproszenia zgodnie ze wzorem:

$$I = \vec{E} \vec{E}^* = I_0 e^{-\alpha_R d} \quad (1.20)$$

gdzie: α_R - współczynnik ekstynkcji,

I_0 - natężenie promieniowania padającego,

I - natężenie promieniowania po przejściu przez warstwę ośrodka o grubości d ,

\vec{E}^* - wektor natężenia pola elektrycznego sprzężony z wektorem \vec{E} .

Według Rayleigha współczynnik ekstynkcji wyraża się w sposób następujący [15]:

$$\alpha_R = \frac{8 \pi^3 a^2 N}{3 \lambda^4 \epsilon_0^2} \quad (1.21)$$

przy czym: N - liczba centrów rozpraszających w jednostce objętości ośrodka,

a - polaryzowalność ośrodka rozpraszającego.

W ośrodkach niejednorodnych fale elektromagnetyczne mogą ulegać odbiciu, o ile rozmiary liniowe lub promienie krzywizny powierzchni rozgraniczających ośrodki o różnych przenikalnościach elektrycznych są większe od długości fali.

W takim przypadku energetyczny współczynnik odbicia zdefiniowany jako stosunek normalnego strumienia energii fali odbitej do padającej jest równy:

$$R = \frac{E_1^2}{E_0^2} = |r_E^2| \quad (1.22)$$

gdzie E_0 - amplituda wektora natężenia pola elektrycznego fali padającej,

E_1 - amplituda wektora natężenia pola elektrycznego fali odbitej,

r_E - amplitudowy współczynnik odbicia.

W przypadku odbicia, gdy kąt padania fali jest równy zero, amplitudowy współczynnik odbicia wyraża się w sposób

następujący:

$$r_E = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

gdzie: Z_1 - impedancja falowa ośrodka z którego pada fala,

Z_2 - impedancja falowa ośrodka na który pada fala.

2. Modele ośrodków niejednorodnych.

Wiele ośrodków niejednorodnych można rozważać jako superpozycję kilku ośrodków jednorodnych.

Rozpatrując zjawisko propagacji fal elektromagnetycznych w takich ośrodkach wielu autorów oblicza dla nich efektywną przenikalność elektryczną. Znając efektywną przenikalność elektryczną ośrodka niejednorodnego można obliczyć tłumienie fal elektromagnetycznych tak jak dla ośrodka jednorodnego.

Inne podejście do zagadnienia rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w ośrodkach niejednorodnych można znaleźć w teorii Benzara [3]. Autor ten przyjmuje, że ośrodek niejednorodny składa się z dielektrycznych kul. Rozpatrując zjawiska absorpcji i rozproszenia fal elektromagnetycznych na kulach dielektrycznych oblicza stałą tłumienia dla ośrodka niejednorodnego.

2.1. Efektywna przenikalność elektryczna ośrodków niejednorodnych.

Kraszewski i in. [33,31] zakładają, że niejednorodny ośrodek jaki stanowi zawilgocony materiał, składa się z warstwy wody i suchego materiału, przy czym grubości tych warstw są proporcjonalne do objętości zajmowanych przez nie w tym ośrodku. Przy takim założeniu efektywna przenikalność elektryczna zawilgoconego ośrodka ϵ_m wyrażona jest w następujący sposób:

$$(\epsilon_m)^{\frac{1}{2}} = v_1(\epsilon_1)^{\frac{1}{2}} + (1 - v_1)(\epsilon_2)^{\frac{1}{2}}$$

gdzie: ϵ_1 - przenikalność elektryczna wody,

ϵ_2 - przenikalność elektryczna suchego materiału,

V_1 - względna objętość wody w ośrodku.

Böttcher i Bruggeman rozpatrują ośrodek niejednorodny jako zbiór sferycznych cząstek rozmieszczonych regularnie w ciągłym ośrodku. Autorzy ci podają następujące wyrażenia na przenikalność elektryczną takich mieszanin:

Böttcher [11]:

$$\frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{3\epsilon_m} = (1 - V_1) \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_m}$$

Bruggeman [12]:

$$\frac{\epsilon_2 - \epsilon_m}{\epsilon_2 - \epsilon_1} = V_1 \left(\frac{\epsilon_m}{\epsilon_1} \right)^{\frac{1}{3}}$$

gdzie V_1 jest objętościową zawartością składnika o przenikalności elektrycznej ϵ_1 w mieszaninie, ϵ_2 - przenikalność elektryczna drugiego składnika mieszaniny.

Wyrażenie na przenikalność elektryczną ośrodka trójskładnikowego podają Polder i van Santen [46]:

$$\epsilon_m = \epsilon_0 \left\{ 1 - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^2 \left[V_1 (\epsilon_j - \epsilon_0) \sum_{i=1}^3 \left\{ \epsilon_m + A_i (\epsilon_j - \epsilon_m) \right\}^{-1} \right] \right\}^{-1}$$

gdzie: ϵ_0 - przenikalność elektryczna matrycy, w której rozmieszczone są cząstki składników o przenikalności ϵ_j ,
 A_i - czynnik związany z kształtem cząstek, odpowiadający trzem półosiom elipsoidy,

V_j - objętościowy udział j-ego składnika w mieszaninie,

i - numer osi.

Wszystkie te wyrażenia dają dobrą zgodność pomiędzy obliczonymi i zmierzonymi wartościami efektywnej przenikalności elektrycznej dla silnie zawilgoconych materiałów ($W > 20\%$) np. zawiesin cementowych [3346,31].

2.2. Tłumienie fal elektromagnetycznych w ośrodkach niejednorodnych wg Benzara.

Benzar rozpatruje ośrodki, które zawierają pory i kapilary wypełnione wodą i powietrzem. Zakłada, że taki ośrodek składa się z 3 rodzajów dielektrycznych kulek: wody, powietrza i suchego materiału, przy czym promienie tych kul są dużo mniejsze od długości fali promieniowania elektromagnetycznego.

Straty energii promieniowania elektromagnetycznego przechodzącego przez próbkę takiego materiału są spowodowane absorpcją i rozpraszaniem na kulkach oraz odbiciem od powierzchni całej próbki i wynoszą wg Benzara:

$$A[\text{dB}] = 10 \lg |r^2| + 4,343 \cdot 10^2 d (N_1 \sigma_{1r} + N_2 \sigma_{2r} + N_3 \sigma_{3r} + N_1 \sigma_{1a} + N_2 \sigma_{2a} + N_3 \sigma_{3a})$$

gdzie: $|r^2|$ - współczynnik odbicia od powierzchni próbki,
 d - grubość próbki,

N_1, N_2, N_3 - ilość kulistych wtrąceń odpowiednio: suchego materiału, powietrza i wody w jednostce objętości próbki,

$\sigma_{1r}, \sigma_{2r}, \sigma_{3r}$ - efektywne przekroje czynne na rozpraszanie na dielektrycznych kulkach dla suchego materiału, powietrza i wody,

$\sigma_{1a}, \sigma_{2a}, \sigma_{3a}$ - efektywne przekroje czynne na absorpcję przez dielektryczne kule suchego materiału, powietrza i wody.

Licząc straty energii fali elektromagnetycznej Benzar liczy jednocześnie efektywną stałą tłumienia dla ośrodka

niejednorodnego α^* , którą można zapisać w sposób analogiczny jak dla ośrodka jednorodnego:

$$\alpha^* = \frac{1}{8,688} \frac{A}{d}$$

W celu obliczenia tłumienia fal elektromagnetycznych Benzar czyni następujące uproszczenia:

1. Zniebduje jako bardzo mały, współczynnik odbicia $|r|^2$,
2. Pomija straty energii spowodowane rozproszeniem,
3. Zakłada, że straty energii na skutek absorpcji w powietrzu i suchym materiale są zaniedbywalnie małe w porównaniu ze stratami w wodzie.

Przy takich założeniach Benzar otrzymuje następujące wyrażenie:

$$W = \frac{A}{A + \frac{\rho_{sm}}{\rho_w} \left[4,343 \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot k - A \right]} \quad (2.1)$$

gdzie: A - tłumienie w decybelach,

W - wilgotność próbki materiału,

ρ_{sm} - gęstość objętościowa suchego materiału,

ρ_w - gęstość wody,

λ - długość fali elektromagnetycznej w próżni,

$$k = \frac{4(\epsilon')^2 \epsilon'' - (\epsilon'')^2}{8(\epsilon')^2 \sqrt{\epsilon'}}$$

ϵ' - rzeczywista część zespolonej przenikalności elektrycznej wody,

ϵ'' - urojona część zespolonej przenikalności elektrycznej wody.

Mimo upraszczających założeń, autor teorii uzyskuje dobrą zgodność pomiędzy wartościami wilgotności uzyskanymi z doświadczenia i wartościami obliczonymi według wzoru (2.1) dla wielu porowatych materiałów (cegła, zboże, piasek). Dobrą zgodność wartości doświadczalnych i teoretycznych uzyskał autor również dla dwóch próbek węgla kamiennego. Nie podaje jednak czy taką zgodność uzyskuje się dla węgla o różnych własnościach fizykochemicznych w całym zakresie zmian ich wilgotności. Jest więc celowe przeprowadzenie doświadczalnego sprawdzenia przydatności wzoru Benzara dla polskich węgla kamiennych.

W celu obliczenia tłumienia fal elektromagnetycznych w węglu, wykorzystano następujący związek pomiędzy gęstością objętościową suchego węgla (tzn. zawierającego jedynie wodę krystalizacyjną) a gęstością objętościową węgla zawilgoconego:

$$\rho_{sm} = \frac{\rho(1-W)\rho_w}{\rho_w - \rho W} \quad (2.2)$$

gdzie: ρ_{sm} - gęstość objętościowa próbki zawilgoconego węgla,

ρ - gęstość objętościowa próbki suchego węgla,

ρ_w - gęstość wody,

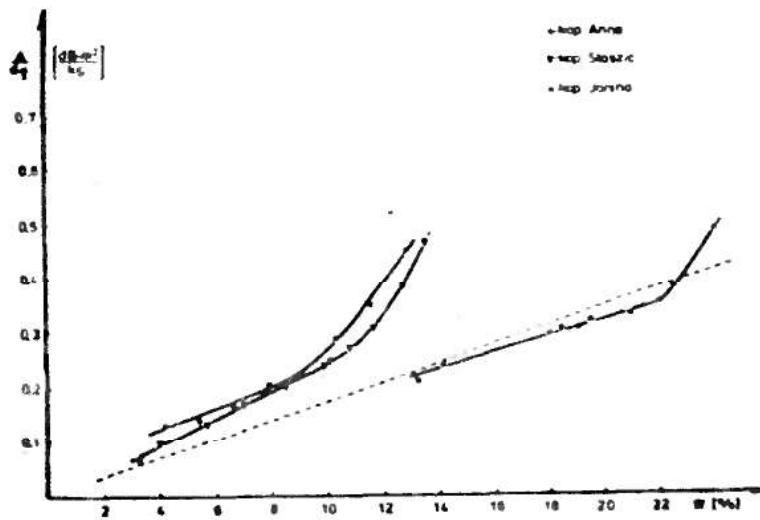
W - wilgotność węgla.

Ten związek jest wyprowadzony w Uzupełnieniu I.

Wstawiając wyrażenie (2.2) do wzoru Benzara (2.1), otrzymano:

$$A = 4,343 \frac{\omega}{c} \frac{k W d \rho}{\rho_w} \quad (2.3)$$

przy czym ω jest częstotliwością kątową fali elektromagnetycznej.



Rys. 2.

Teoretyczne i doświadczalne zależności względnego tłumienia fal elektromagnetycznych o częstotliwości 9,4 GHz w węglu, od jego wilgotności. Próbki węgla pochodziły z kopalni Anna (granulacja 0 - 3 mm), Janina (0 - 1,4 mm) i Staszic (0 - 1,4 mm). Linia przerywaną zaznaczono zależność teoretyczną wg Benzara.

Zależności teoretyczne były obliczone przy założeniu, że przenikalność elektryczna wody równa jest przenikalności elektrycznej wody swobodnej to znaczy $\epsilon' = 61,7$; $\epsilon'' = 32,5$

Rysunek 2 przedstawia teoretyczne (wzór 2.3) i doświadczalne (na podstawie danych z rozdziału 8 i 9), zależności względnego tłumienia $\frac{A}{dQ}$ fal elektromagnetycznych, o częstotliwości 9,4 GHz w węglu, od jego wilgotności. Na rysunku tym widać, że teoretyczna zależność odbiega od doświadczalnych. Teoretyczna zależność $\frac{A}{dQ}(W)$ wyznaczona dla różnych próbek spełnia to samo równanie:

$$\frac{A}{dQ} = 1,766 \cdot 10^{-2} W \quad [\text{dBm}^2/\text{kg}]$$

3. Stan badań nad wpływem własności fizykochemicznych węgla na przesunięcie fazy i tłumienie mikrofal.

a. Zawartość wody.

Z teorii (rozdziały 2.1. i 2.2.) wynika, że tłumienie mikrofal powinno być liniową funkcją zawartości wody. Tymczasem przebieg zależności tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal w węglu od jego zawilgocenia nie jest zazwyczaj liniowy. Jednak można go przybliżyć dwiema prostymi przecinającymi się przy pewnej wilgotności zwanej umownie wilgotnością krytyczną W_{kr} . Przebieg zależności tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal od wilgotności $A(W)$ i $\phi(W)$, dla węgla jest podobny jak dla wielu innych materiałów zawierających wodę związaną.

Nieliniowy przebieg zależności $A(W)$ i $\phi(W)$ tłumaczony jest w literaturze, wpływem sposobu wiązania wody z suchym materiałem. Tacy autorzy jak Hall [21], Stuchły [48], Berliner [8], twierdzą, że w zakresie małych wilgotności

$W < W_{kr}$ cała woda zawarta w materiale jest wodą związaną, o małej wartości przenikalności elektrycznej. Natomiast w punkcie $W = W_{kr}$ przyciąganie dipoli wody od suchego materiału jest na tyle słabe, że zachowują się one jak dipole wody swobodnej - wzrasta wartość przenikalności elektrycznej wody. Dlatego też w zakresie $W > W_{kr}$ tłumienie mikrofal gwałtownie wzrasta.

Wartość W_{kr} zależy od sorpcyjnych własności materiału [48], co wiąże się z jego porowatością i granulacją. Potwierdzają to badania Berlinera i Poliszczuka [8], którzy stwierdzili, że dla materiałów o dużych porach W_{kr} jest mniejsze niż dla materiałów o porach drobnych. Jest to spowodowane tym, że

zmniejszenie rozmiarów porów, przy zachowaniu stałej gęstości objętościowej próbki materiału powoduje wzrost powierzchni sorpcyjnej.

Wzrost wartości W_{kr} wraz ze zmniejszeniem wielkości ziarna został zaobserwowany w przypadku węgla kamiennego przez Halla i in. [21] oraz Kleina [28]. Efekt ten był związany ze wzrostem powierzchni sorpcyjnej ziaren wraz ze zmniejszeniem ich rozmiarów (przy zachowaniu stałej gęstości objętościowej).

b. Zawartość elektrolitów w wodzie.

Z teorii wynika, że z przewodnictwem wody zawilgacającej wzrasta stała tłumienia i stała fazowa (wzory 1.7 i 1.8). Klein [28] badając przechodzenie mikrofal przez próbki węgla kamiennego zawilgacanego wodą o różnej zawartości NaCl stwierdził, że dla zakresu wilgotności $W > W_{kr}$ wzrost zasolenia powoduje wzrost zarówno tłumienia jak i przesunięcia fazy mikrofal. Natomiast dla $W < W_{kr}$ wpływ zasolenia jest niezauważalny.

c. Zawartość pierwiastka C.

Wraz ze zmianą zawartości pierwiastka C zmienia się przenikalność elektryczna oraz przewodność suchego węgla (rozdział 1.3.). W związku z tym zmiana stopnia uwęglenia winna wpłynąć na tłumienie mikrofal w węglu.

Z przedstawionych przez Halla i in. [21] badań wynika, że tłumienie mikrofal o częstotliwości 9,4 GHz w antracytach o zawartości pierwiastka C od 94 - 96 % jest większe

niż w węglach gazowo-koksowych ($84 \% \leq C \leq 86 \%$).

Uwidacznia się to tym, że dla każdego typu węgla otrzymuje się inne krzywe wzorcowania $A(W)$. Przy stałej wartości tłumienia $A = \text{const.}$ zmiana stopnia uwęglenia (zawartości pierwiastka C od 85 % do 95 %) równoważna jest zmianie wilgotności około 3 % w zakresie $W < W_{kr}$ i około 11 % w zakresie $W > W_{kr}$.

Natomiast Klein [28] przeprowadzając badania węgli z Zagłębia Ruhry przy częstotliwości 8 GHz stwierdził, że stopień uwęglenia nie ma praktycznie wpływu ani na tłumienie ani na przesunięcie fazy mikrofal.

c. Substancja mineralna węgla.

Zawartość i skład substancji mineralnej węgla wpływa na jego gęstość rzeczywistą, oraz na wartość efektywnej przenikalności elektrycznej. Jest to związane z różną gęstością i przenikalnością elektryczną składników substancji mineralnej.

Klein [28] badając zmiany tłumienia i przesunięcia fazy spowodowane dodaniem do węgla skały towarzyszącej stwierdził, że istnieje nieznaczny wzrost tłumienia dla zakresu wilgotności $W > W_{kr}$. Wyciąga stąd wniosek, że zawartość substancji mineralnej w węglu nie ma praktycznie wpływu na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal.

Brak jest doniesień literaturowych na temat wpływu składu substancji mineralnej na tłumienie mikrofal. Można się tylko spodziewać, że duża zawartość ferromagnetyków (np. związków żelaza) może być powodem dużej wartości efektywnej przenikalności elektrycznej węgla, a co za tym idzie powodować silne tłumienie mikrofal. Taki właśnie efekt wzrostu

tłumienia mikrofal ze wzrostem zawartości Fe_2O_3 został zaobserwowany w cementach przez Berlinera i Poliszczuka [8].

e. Granulacja.

Badano tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w różnych frakcjach granulometrycznych węgla oraz w próbkach o różnym składzie ziarnowym. W obu przypadkach stwierdzono wzrost tłumienia A i przesunięcia fazy ϕ ze wzrostem wielkości ziarna, przy czym wzrost ϕ jest dwukrotnie mniejszy niż wzrost A [28].

Wpływ granulacji na krzywe $A(W)$ i $\phi(W)$ przejawia się w zmianie nachylenia tych krzywych. Według Halla wzrost nachylenia krzywych $A(W)$ w zakresie $W < W_{kr}$ jest mniejszy niż w zakresie $W > W_{kr}$. Np.: przy zmianie frakcji granulometrycznej od 1,6 - 3,2 mm do 6,4 - 12,7 mm; współczynnik kierunkowy krzywej $A(W)$ w zakresie $W < W_{kr}$ wzrasta 1,5 razy, natomiast w zakresie $W > W_{kr}$ - 1,7 razy [21].

Efekty związane ze zmianą granulacji są w literaturze tłumaczone poprzez zmiany powierzchni ziarna i tym samym ilości wody związanej, oraz występowaniem odbić i rozprożeń mikrofal na ziarnach. Klein za efekt ziarnowy czyni odpowiedzialnym wyłącznie rozproszenia rejlejowskie, których przekrój czynny zależy od promienia ziarna, Hall natomiast - odbicia.

f. Gęstość objętościowa.

Tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu jest wprost proporcjonalne do jego gęstości objętościowej ρ . Świadczą o tym dodatnie wartości współczynników kierunkowych zależności $A(\rho)$ obliczonych przy różnych wartościach wilgo-

tności przez Halla [21]. Z przedstawionych przez Halla danych nie wynika czy i w jaki sposób te współczynniki zależą od wilgotności, oraz czy odniesienie tłumienia do jednostkowej gęstości objętościowej $\frac{A}{d \cdot \rho}$ uniezależnia krzywe wzorcowania $A(W)$ od tej gęstości. Wprawdzie Klein [28] twierdzi, że tłumienie przypadające na jednostkę gęstości objętościowej, jest niezależne od gęstości objętościowej, jednak wniosek ten wyciąga na podstawie teoretycznych rozważań.

Przedstawione przez niego zależności $\frac{A}{d \cdot \rho} (g)$, gdzie d - jest grubością próbki, wykazują zależność od $\frac{A}{\rho}$, jednak autor tłumaczy ten fakt błędami pomiarowymi.

g. Temperatura.

Według danych z literatury, wraz ze wzrostem temperatury tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu maleje. Jednak zmiana przebiegu krzywych $A(W)$ i $\phi(W)$ wraz ze zmianą temperatury jest niewielka. Hall [21] stwierdził, że zmiana temperatury o 15 K powoduje błąd odczytu wilgotności z krzywej wzorcowania $A(W)$ o 1 %, co odpowiada zmianie gęstości objętościowej o 12 % (przy gęstości objętościowej wynoszącej średnio 750 kg/m^3 odpowiada to zmianie o 9 kg/m^3).

Wnioski.

Z badań literaturowych wynika, że parametry określające stan fizyczny próbek węgla w niejednakowym stopniu wpływają na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu.

- Temperatura: jej wpływ jest nieznaczny, biorąc pod uwagę, że zmiana temperatury o 15 K powoduje zauważa-

lne zmiany krzywych wzorcowania $A(W)$, powodując błąd wyznaczania wilgotności $\Delta W = 1\%$.

- Zmiany zawartości substancji mineralnej: w węglu nie dają zauważalnego wpływu na przebieg zależności $A(W)$ i $\Phi(W)$.
- Stopień uwęglenia: Dane literaturowe dotyczące jego wpływu na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal uzyskane przy zbliżonych częstotliwościach 9,4 GHz (Hall) i 8 GHz (Klein) nie są ze sobą zgodne. Klein stwierdza brak wpływu stopnia uwęglenia na A i Φ , podczas gdy Hall otrzymuje różne krzywe $A(W)$ dla węgla różnych typów, przy czym tłumienie w antracytach otrzymuje większe niż w węglach słabiej uwęglonych. Jednak tej trudności można uniknąć stosując dla węgla różnych typów oddzielne krzywe wzorcowania.
- Zawartość elektrolitów: głównie soli w wodzie zawilgającej węgiel powoduje wzrost tłumienia. Wpływ ten jest niewielki, zwłaszcza przy częstotliwościach powyżej 8 GHz. Ponieważ zasolenie węgla związane jest głównie z jego pochodzeniem, więc przez stosowanie oddzielnych krzywych wzorcowania dla poszczególnych węgla można tego problemu uniknąć.
- Granulacja: - jej wpływ na A i Φ jest istotny. Stwierdzono, że ze wzrostem wielkości ziarna tłumienie i przesunięcie fazy wzrasta. Tłumacząc ten fakt zwraca się w literaturze uwagę głównie na zjawisko rozpraszania i odbić mikrofal na ziarnach, mniej uwagi poświęcając zmianie przenikalności elektrycznej wody związanej ze zmianą wielkości ziarna.

- Gęstość objętościowa: stwierdzono wzrost tłumienia wraz ze wzrostem gęstości objętościowej próbek węgla. Jednak z rozważań Kleina wynika, że wpływu gęstości objętościowej na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal, nie daje się wytłumaczyć na podstawie istniejących wyobrażeń o zjawisku absorpcji mikrofal w ośrodkach niejednorodnych.

Wpływ dwóch ostatnich parametrów: gęstości objętościowej i granulacji na tłumienie ma bardzo istotne znaczenie dla wykorzystania zjawiska absorpcji mikrofal do oznaczania wilgotności węgla.

4. Tłumienie mikrofal w węglu kamiennym według
ziarnowo-warstwowego modelu ośrodka niejednorodnego.

Modele ośrodków niejednorodnych, w których wykorzystano wyrażenia na efektywną przenikalność elektryczną mieszaniny, znajdują zastosowanie w przypadku ośrodków silnie zawilgoczonych - wilgotność powyżej 20 %. W przypadku węgla kamiennego najbardziej interesujący jest przedział wilgotności od 0 do 25 %.

Benzar oblicza efektywną stałą tłumienia fal elektromagnetycznych dla, opracowanego przez siebie, modelu ośrodka niejednorodnego zaniehbując dielektryczne straty energii w suchym materiale oraz zaniehbując zjawisko rozpraszania na ziarnach materiału. Z tego powodu w podanym przez niego wyrażeniu na tłumienie fal elektromagnetycznych np. w węglu nie uwzględnia się wpływu wielkości ziarna i własności dielektrycznych suchego węgla. Z treści rozdziału 3 wynika natomiast, że taki wpływ istnieje.

Dlatego też podjęto próbę obliczenia stałej tłumienia dla ośrodka niejednorodnego w oparciu o opracowany w niniejszej pracy model węgla kamiennego zwany dalej modelem ziarnowo-warstwowym.

4.1. Ziarnowo-warstwowo model próbki węgla kamiennego.

Przyjęto, że próbka rozdrobnionego, zawilgoconego węgla kamiennego składa się z ziaren powietrznosuchego (tzn. zawierającego wodę krystalizacyjną i higroskopijną) węgla o objętościach $(2r)^3$ otoczonych warstwami wody o grubości x (rysunek 3). Grubość warstwy wody wyraża się wzorem:
(wyprowadzenie w Uzupełnieniu II).

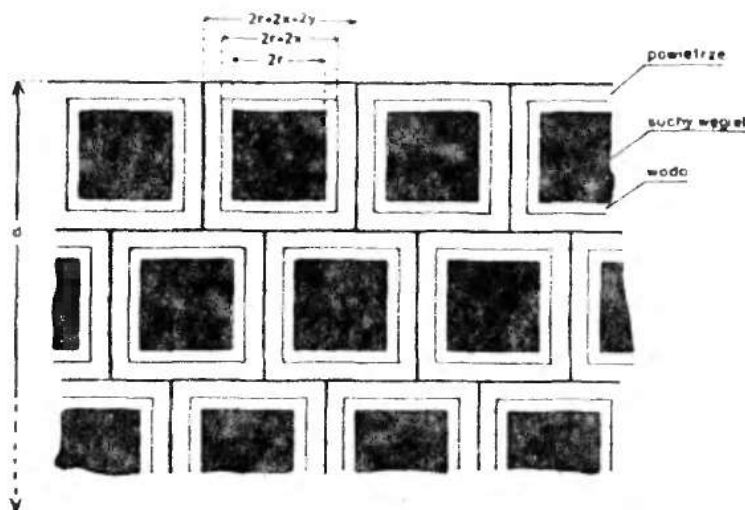
$$x = \frac{1}{3} \cdot \frac{W_p}{1 - W_p} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot r$$

gdzie: W_p - zawartość wilgoci przemijającej,

ρ_c - gęstość rzeczywista węgla w stanie powietrzno-suchym,

ρ_w - gęstość wody,

r - promień ziarna powietrzno suchego węgla.



Rys. 3. Model węgla kamiennego.

Przekrój poprzeczny przez próbkę węgla.

Każde ziarno zawilgoconego węgla otoczone jest warstwą powietrza o grubości y , przy czym jak pokazano w Uzupełnieniu III:

$$y = \frac{1}{3} \left[\frac{r^3 (\rho_c - \rho_w)}{(x + r)^2 \rho} + \frac{(\rho_w - \rho)(r + x)}{\rho} \right]$$

gdzie ρ - jest gęstością objętościową próbki zawilgoconego węgla.

Całą próbkę węgla "podzielono" na warstwy o grubości równej wielkości ziarna otoczonego wodą i powietrzem. W próbce węgla o grubości d ilość takich warstw jest równa:

$$n = \frac{d}{2(r + x + y)}$$

Przyjęto, że w każdej warstwie jest N takich ziaren węgla.

W celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że ziarna węgla mają kształt sześciątów.

4.2. Wyprowadzenie wzoru na stałą tłumienia niejednorodnego ośrodka ziarnistego.

Założmy, że na powierzchnię próbki węgla pada promieniowanie mikrofalowe, którego moc wynosi P_0 , przy czym

$$P_0 = N S p_0 \quad (4.1)$$

gdzie: p_0 - gęstość mocy promieniowania mikrofalowego padającego na pierwszą warstwę próbki węgla,

S - powierzchnia zawilgoconego ziarna węgla wraz z otoczką powietrza, na którą pada promieniowanie,

N - ilość ziaren w warstwie.

Na jedno ziarno pada więc promieniowanie, którego średnia moc wynosi:

$$\overline{\Phi_0} = \frac{1}{N} P_0 = S \cdot p_0 \quad (4.2)$$

Po przejściu przez jedno ziarno moc promieniowania mikrofalowego maleje zgodnie z prawem eksponencjalnym (rozdział 1.1.) do wartości:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1 = & S_1 p_0 e^{-2\alpha_1(2r+2x+2y)} + S_2 p_0 e^{-2[\alpha_1 2y + \alpha_2(2r+2x)]} + \\ & + S_3 p_0 e^{-2(\alpha_1 2y + \alpha_2 2x + \alpha_3 2r)} = S p_1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

gdzie: α_1 - stała tłumienia powietrza,

α_2 - stała tłumienia wody,

α_3 - stała tłumienia suchego węgla,

$S_1 = 4(r+x+y)^2 - 4(r+x)^2$ - powierzchnia, pod którą padające promieniowanie napotyka tylko powietrze,

$S_2 = 4(r+x)^2 - 4r^2$ - powierzchnia, pod którą padające promieniowanie napotyka powietrze i wodę,

$S_3 = 4r^2$ - powierzchnia, pod którą padające promieniowanie napotyka powietrze, wodę i suchy węgiel,

$S = 4(r+x+y)^2$ - powierzchnia pod którą znajduje się całe ziarno,

p_1 - średnia gęstość mocy promieniowania mikrofalowego po przejściu przez pierwszą warstwę próbki.

Średnia gęstość mocy promieniowania mikrofalowego po przejściu przez pierwszą warstwę próbki jest więc równa:

$$p_1 = \frac{1}{S} \mathcal{P}_1 \quad (4.4)$$

Na jedno ziarno z drugiej warstwy pada promieniowanie o średniej mocy

$$\mathcal{P}_1 = \frac{1}{N} P_1 = S \cdot p_1 \quad (4.5)$$

która po przejściu przez to ziarno będzie równa:

$$\begin{aligned} \Phi_2 = S_1 p_1 e^{-4\alpha_1(r+x+y)} + S_2 p_1 e^{-4[\alpha_1 y + \alpha_2(r+x)]} + \\ + S_3 p_1 e^{-4(\alpha_1 y + \alpha_2 x + \alpha_3 r)} = S p_2 \quad (4.6) \end{aligned}$$

gdzie $p_2 = \frac{1}{S} \Phi_2$ jest średnią gęstością mocy promieniowania po przejściu przez drugą warstwę.

Wykorzystując wyrażenia (4.1), (4.3), (4.4) i (4.6) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} P_2 = P_0 \left[\frac{S_1}{S} e^{-4\alpha_1(r+x+y)} + \frac{S_1}{S} e^{-4[\alpha_1 y + \alpha_2(r+x)]} + \right. \\ \left. + \frac{S_3}{S} e^{-4(\alpha_1 y + \alpha_2 x + \alpha_3 r)} \right] z \end{aligned}$$

Przeprowadzając analogiczne rozważania, można otrzymać wyrażenie na średnią moc promieniowania, które przeszło przez n warstw próbki:

$$\begin{aligned} P_n = P_0 \left[\frac{S_1}{S} e^{-4\alpha_1(r+x+y)} + \frac{S_2}{S} e^{-4[\alpha_1 y + \alpha_2(r+x)]} + \right. \\ \left. + \frac{S_3}{S} e^{-4(\alpha_1 y + \alpha_2 x + \alpha_3 r)} \right] n \end{aligned}$$

Biorąc pod uwagę, że stała tłumienia powietrza jest bliska zeru wyrażenie powyższe można zapisać w postaci

$$\frac{P_n}{P_0} = \left[\frac{S_1}{S} + \frac{S_2}{S} e^{-4\alpha_2(r+x)} + \frac{S_3}{S} e^{-4(\alpha_2 x + \alpha_3 r)} \right]^n$$

Stąd stała tłumienia dla ośrodka niejednorodnego, ziarnistego jest równa:

$$\alpha^* = \frac{1}{d} \ln \frac{P_o}{P_n} =$$

$$= \frac{1}{(x+y+r)} \ln \left\{ \frac{[(r+x)^2 - r^2] e^{-4\alpha_2(r+x)} + r^2 e^{-4(\alpha_2 x + \alpha_3 r)}}{(r+x+y)^2} + \frac{(r+x+y)^2 - (r+x)^2}{(r+x+y)^2} \right\}^{-1} \quad (4.7)$$

Natomiast straty mocy mikrofal w decybelach (tłumienie) można zapisać następującym wzorem:

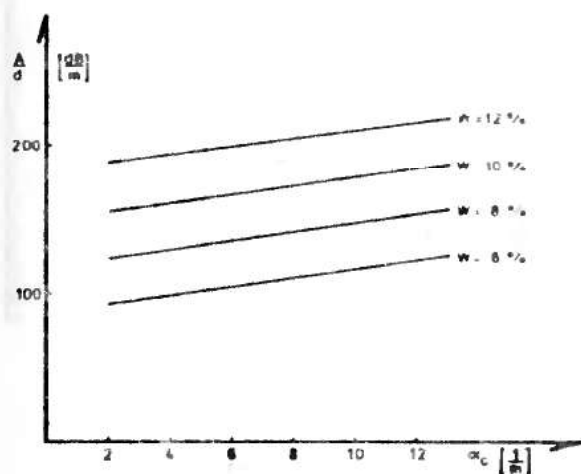
$$A = \frac{2,171 \cdot d}{(r+x+y)} \ln \left\{ \frac{[(r+x)^2 - r^2] e^{-4\alpha_2(r+x)} + r^2 e^{-4(\alpha_2 x + \alpha_3 r)}}{(r+x+y)^2} + \frac{(r+x+y)^2 - (r+x)^2}{(r+x+y)^2} \right\}^{-1} \quad [\text{dB}] \quad (4.8)$$

Według wyprowadzonego w tym rozdziale wzoru, stała tłumienia zawilgoconego, rozdrobnionego węgla zależy od jego gęstości objętościowej, gęstości rzeczywistej, wielkości ziarna, wilgotności, stałej tłumienia wody i stałej tłumienia powietrzno-suchego węgla.

4.3. Wpływ własności próbki węgla kamiennego na stałą tłumienia dla ośrodków niejednorodnych i ziarnistych.

Wartości tłumienia mikrofal w węglu przypadające na jednostkę grubości próbki $\frac{A}{d}$ różnią się jedynie o stałą liczbową od wartości stałych tłumienia dla ośrodków niejednorodnych i ziarnistych α^* . Dlatego też wnioski wynikające z badań zależności $\frac{A}{d}$ od własności fizykochemicznych węgla można uogólnić na stałą tłumienia α^* .

Rysunek 4 przedstawia teoretyczne zależności stałej tłumienia dla substancji niejednorodnej, ziarnistej, od stałej tłumienia powietrzno-suchego węgla.



Rys. 4.

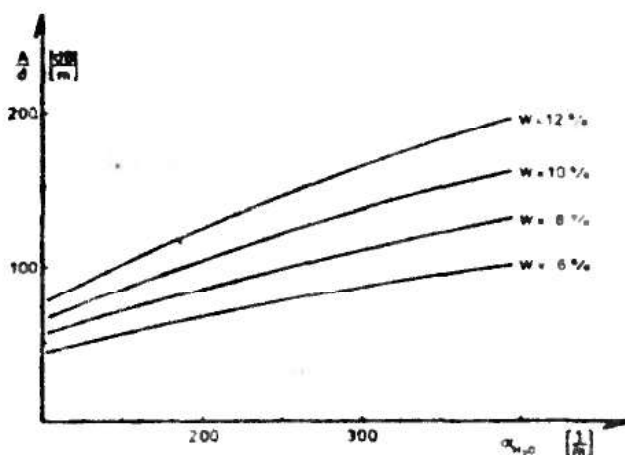
Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od stałej tłumienia węgla $\frac{A}{d}(\alpha_C)$. Obliczenia wykonano przy następujących warunkach:

gęstość objętościowa $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, gęstość rzeczywista $\rho_C = 1651 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
 stała tłumienia wody $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 394,6 \text{ m}^{-1}$, promień ziarna $r = 0,001 \text{ m}$.

Zależności przedstawione na rysunku zostały obliczone według wzoru (4.8) przy ustalonej gęstości objętościowej i rzeczywistej, ustalonym promieniu ziarna węgla oraz stałej tłumienia wody swobodnej równej $394,6 \text{ m}^{-1}$. Z przedstawionego wykresu widać, że funkcje $\frac{A}{d}(\alpha_C)$ są liniowe, przy czym współczynnik kierunkowy tych prostych nie zależy od wilgotności węgla.

Stąd wynika, że czułość mikrofalowej metody pomiaru wilgotności zdefiniowana jako nachylenie krzywych $\frac{A}{d}(W)$ nie zależy od stałej tłumienia powietrzno-suchego węgla α_C .

Zależność α^* od stałej tłumienia wody α_{H_2O} przy ustalonych pozostałych parametrach (α_C, ρ_C, ρ) nie jest liniowa (rysunek 5). Nachylenia krzywych $\frac{A}{d}(\alpha_{H_2O})$ zmieniają się wraz z wilgotnością, a więc czułość mikrofalowej metody oznaczania wilgotności zależy od stałej tłumienia wody.



Rys. 5. Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od stałej tłumienia wody $\frac{A}{d}(\alpha_{H_2O})$. Do obliczeń przyjęto następujące wartości:

gęstość objętościowa $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$,

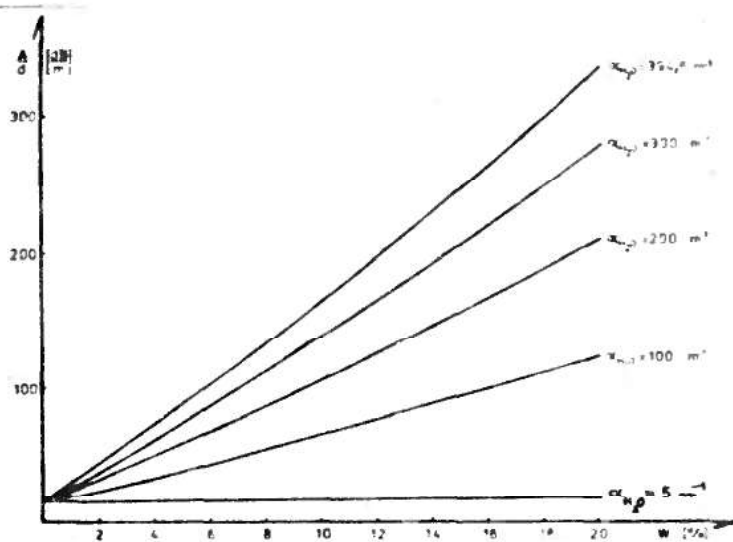
gęstość rzeczywista $\rho_C = 1650 \text{ kg/m}^3$,

stała tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_C = 5 \text{ m}^{-1}$,

promień ziarna $r = 0,001 \text{ m}$.

Wpływ α_{H_2O} na krzywą wzorcowania $\frac{A}{d}(W)$ przedstawia

rysunek 6.

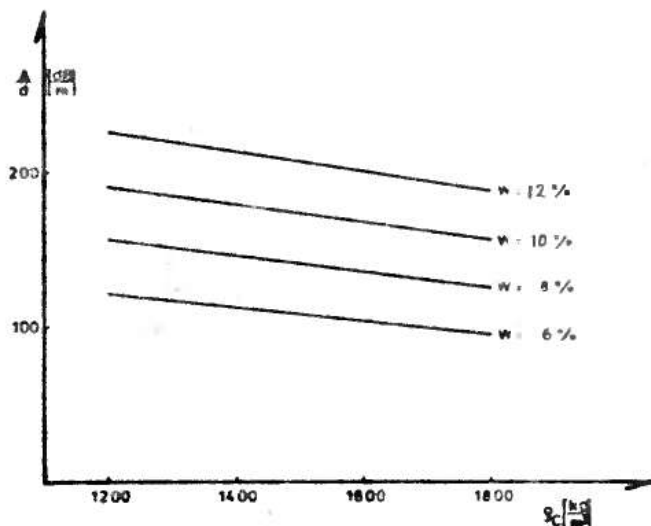


Rys. 6. Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności $\frac{A}{d}(W)$. Do obliczeń przyjęto następujące wartości: gęstość objętościowa $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, gęstość rzeczywista $\rho_c = 1650 \text{ kg/m}^3$, stała tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_c = 5 \text{ m}^{-1}$, promień ziarna $r = 0,001 \text{ m}$.

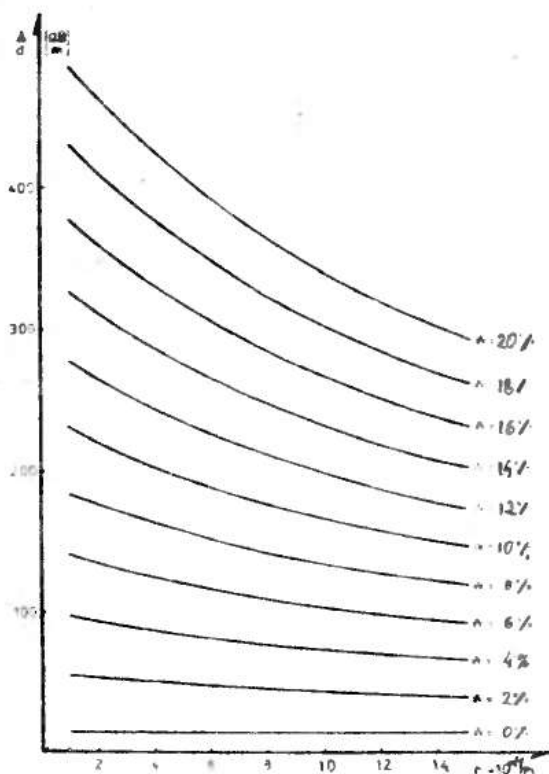
Funkcje $\frac{A}{d}(W)$ nie są liniowe i mają różne nachylenia w zależności od stałej tłumienia wody. Wszystkie jednak zbiegają się w jednym punkcie przy $W = 0 \%$. Rzędna tego punktu odpowiada wartości tłumienia mikrofal w powietrzno-suchym węglu.

Wpływ gęstości rzeczywistej węgla na stałą tłumienia α^* przedstawia rysunek 7. Tłumienie maleje w sposób liniowy wraz ze wzrostem gęstości rzeczywistej węgla.

Na rysunku 8 przedstawiono teoretyczną zależność stałej tłumienia α^* od promienia ziarna węgla. Krzywe były sporządzone przy stałych gęstościach objętościowych i rzeczywistych węgla oraz stałych α_c i $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$.



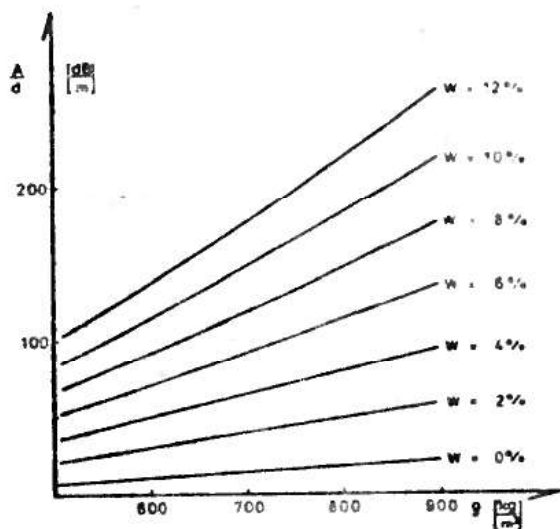
Rys. 7. Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od jego gęstości rzeczywistej $\frac{A}{d}$ (ρ_c). Do obliczeń przyjęto następujące wartości: gęstość objętościowa $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, stała tłumienia wody $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 394,6 \text{ m}^{-1}$, stała tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_c = 5 \text{ m}^{-1}$ promień ziarna $r = 0,001 \text{ m}$.



Rys. 8.

Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od promienia ziarna $\frac{A}{d}$ (r).

Do obliczeń przyjęto następujące wartości: gęstość objętościowa $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, gęstość rzeczywista $\rho_c = 1650 \text{ kg/m}^3$, stała tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_c = 5 \text{ m}^{-1}$, stała tłumienia wody $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 394,6 \text{ m}^{-1}$.



Rys. 9.

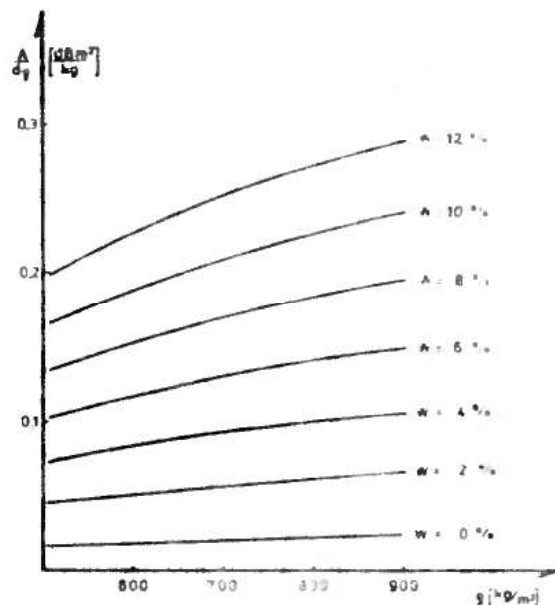
Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od gęstości objętościowej. Do obliczeń przyjęto następujące wartości: gęstość rzeczywista węgla $\rho_C = 1650 \text{ kg/m}^3$, stała tłumienia wody $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 394,6 \text{ m}^{-1}$, stała tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_C = 5 \text{ m}^{-1}$, promień ziarna

$r = 0,001 \text{ m}$.

Rys. 10.

Teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy i jednostkę gęstości objętościowej węgla od jego gęstości objętościowej. Do obliczeń przyjęto: gęstość rzeczywistą węgla $\rho_C = 1650 \text{ kg/m}^3$, stałą tłumienia wody $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 394,6 \text{ m}^{-1}$,

stałą tłumienia powietrzno-suchego węgla $\alpha_C = 5 \text{ m}^{-1}$, promień ziarna $r = 0,001 \text{ m}$.



Zależności $\frac{A}{d}$ od gęstości objętościowej przy stałych pozostałych parametrach pokazuje rysunek 9. Funkcje $\frac{A}{d}$ w szerokim zakresie zmian gęstości objętościowej ($500 - 900 \text{ kg/m}^3$) odbiegają od liniowości, przy czym ich nachylenie rośnie wraz

ze wzrostem wilgotności węgla.

Według modelu ziarnowo-warstwowego również i $\frac{A}{d\varrho}$ zależy od gęstości objętościowej próbki węgla. Ilustrują to teoretyczne zależności względnego tłumienia mikrofal w węglu od jego gęstości objętościowej przedstawione na rysunku 10 .

C Z Ę Ś Ć D O Ś W I A D C Z A L N A

1. Przeprowadzono badania wpływu następujących czynników na przebieg zjawiska tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal w węglu:
 - a. czynników geometrycznych; grubości i gęstości objętościowej próbki węgla,
 - b. wilgotności całkowitej i higroskopijnej,
 - c. granulacji.
2. Sprawdzono możliwość wykorzystania dla węgla znanej, amplitudowo-fazowej metody oznaczania wilgotności, niezależnej od gęstości objętościowej.
3. Przeprowadzono badania nad uniezależnieniem mikrofalowej metody oznaczania wilgotności węgla od czynników geometrycznych to jest od grubości i gęstości objętościowej jego warstwy przy zastosowaniu metod radiometrycznych.

5. Aparatura.

Badania zjawiska absorpcji mikrofal w węglu zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu dwóch układów pomiarowych. Jeden, to mostkowy układ do pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal, udostępniony przez Zakład Aparatury Mikrofalowej WILMER w Warszawie. Drugi, to laboratoryjny mikrofalowy miernik wilgotności typ 63, produkcji WILMER-u.

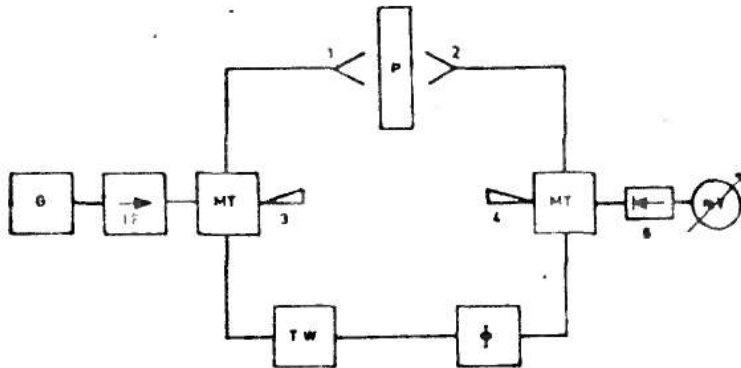
Do badań nad radiometryczną metodą wyznaczania gęstości powierzchniowej węgla, wykorzystano układ do pomiaru osłabienia natężenia promieniowania gamma.

5.1. Mostkowy układ do pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal.

Mostkowy układ do pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal, zwany dalej układem nr 1, przedstawiony jest na rysunku 11. W układzie tym źródłem mikrofal o częstotliwości 9,4 GHz jest klistron. Sygnał mikrofalowy po przejściu przez izolator ferrytowy dochodzi do magicznego T, gdzie dzieli się na dwa sygnały. Jeden przechodzi do gałęzi pomiarowej, gdzie umieszczona jest próbka węgla. Drugi sygnał przechodzi przez gałąź odniesienia, w której znajdują się tłumik oraz przesuwnik fazy. Obydwa sygnały dochodzą przez drugie magiczne T do układu detekcyjnego składającego się z głowicy detekcyjnej i miliwoltomierza.

Pomiar polega na zestrojeniu sygnałów dochodzących z gałęzi pomiarowej i gałęzi odniesienia tak, aby do detektora dochodził sygnał minimalny. Ma to miejsce wtedy, gdy tłumienie

i przesunięcie fazy wprowadzone przez próbkę węgla jest równe przyrostowi tłumienia i przesunięcia fazy zmierzonym w gałęzi odniesienia dla zrównoważonego układu z próbką i bez próbki.



Rys. 11. Schemat blokowy układu mostkowego do pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal.

G - generator klistronowy

IF - izolator ferrytowy

MT - magiczne T

1,2 - anteny rożkowe

3,4 - obciążenia dopasowane

5 - głowica detekcyjna

P - próbka materiału w pojemniku z pleksiglasu

TW - tłumik wzorcowy

ϕ - wzorcowy przesuwnik fazy

mV - miliwoltomierz selektywny.

Pomiar przesunięcia fazy, ze względu na falowy charakter występujących tu zjawisk, jest niejednoznaczny. Przesunięcie fazy jest równe:

$$\phi = \phi_z + n \cdot 2\pi$$

gdzie ϕ_z jest przesunięciem fazy zmierzonym dla danej próbki, n jest liczbą naturalną.

W celu wyeliminowania tej niejednoznaczności przeprowadzono dodatkowe pomiary przesunięcia fazy w funkcji grubości próbki przy ustalonej jej wilgotności. Określenia przesunięcia fazy (tzn wyznaczenia liczby n) dokonano porównując wartości ϕ odczytane z wykresu $\phi(d)|_{W=\text{const.}}$ z wartością ϕ_z zmierzoną dla próbki o tej samej wilgotności i grubości d .

Podczas przeprowadzania pomiarów zależności $\phi(d)|_{W=\text{const.}}$ konieczna była zmiana położenia anteny nadawczej tak, aby do ustawionego na niej pojemnika pomiarowego można było nasy-pywać warstwy węgla o stopniowo zwiększającej się grubości.

5.2. Mikrofalowy miernik wilgotności.

Mikrofalowy miernik wilgotności typ 63, bez przeprowadzonego wcześniej wzorcowania jest miernikiem tłumienia mikrofal. Zakres pomiaru tłumienia wynosi od 0 do 50 dB, częstotliwość mikrofal - 9,4 GHz.

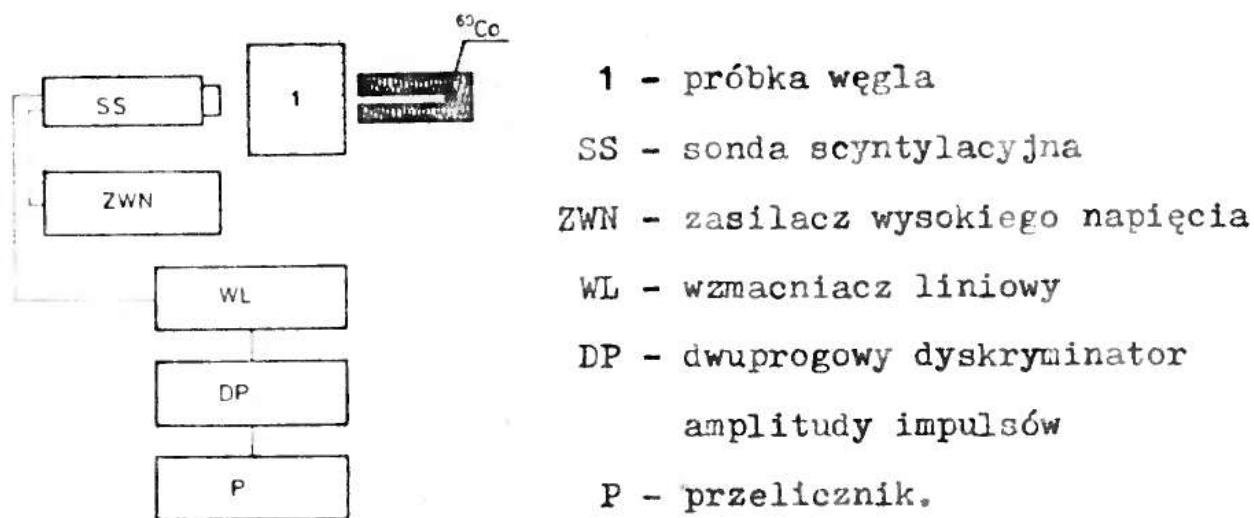
Zasada działania miernika jest taka sama jak układu pomiarowego opisanego w 5.1. , z tą tylko różnicą, że nie ma możliwości odczytu przesunięcia fazy mikrofal.

W dalszej części pracy mikrofalowy miernik wilgotności nazywany jest układem nr 2.

5.3. Układ pomiarowy do wyznaczania gęstości powierzchniowej węgla.

Gęstości powierzchniowe węgla były wyznaczane przy wyko-

rzystaniu układu pomiarowego do pomiaru osłabienia natężenia promieniowania gamma (układ nr 3) przedstawionego na rysunku 12. Źródło promieniowania gamma ^{60}Co było umieszczone w ołowianej osłonie z wąską szczeliną. Skolimowane w ten sposób promieniowanie przechodziło przez pojemnik z węglem i padało na detektor. Do detekcji promieniowania użyto sondy spektrometrycznej typu SSU-70 ze scyntylatorem NaJ(Tl), która współpracowała z zestawem elektronicznym typu "STANDARD". W skład tego zestawu wchodziły: zasilacz wysokiego napięcia, wzmacniacz liniowy, dwuprogowy dyskryminator amplitudy impulsów i przelicznik.



Rys. 12. Schemat blokowy układu do pomiaru osłabienia natężenia promieniowania gamma w węglu.

Przeprowadzono pomiary osłabienia wiązki promieniowania gamma o energiach 1,17 MeV i 1,33 MeV emitowanych przez źródło ^{60}Co o aktywności 1,2 mCi.

6. Technika pomiarów.

6.1. Badania zjawiska tłumienia promieniowania mikrofalowego.

Próbkę węgla o wyznaczonej metodą standardową wilgotności (PN - 64/G - 04511) , nasypywano do prostopadłościennego pojemnika z pleksiglasu. Pojemnik umieszczano pomiędzy antenami układu 1 lub 2 i mierzono tłumienie bądź przesunięcie fazy mikrofal w próbce węgla. Następnie pojemnik z węglem ważono w celu wyznaczenia gęstości objętościowej próbki.

Pomiary wykonywane były przy zmieniających się gęstościach objętościowych, grubościach warstwy i wilgotnościach próbek węgla. Zmian gęstości próbki węgla dokonywano poddając ją wibracjom (przy przeprowadzaniu pomiarów w układzie nr 1) lub przez kilkakrotne nasypywanie węgla do tego samego pojemnika pomiarowego (w układzie nr 2) . Wilgotność zmieniano poduszając zawilgocone próbki węgla w temperaturze pokojowej.

W przypadku badań przeprowadzanych przy wykorzystaniu układu 1 , stosowano pojemnik pomiarowy o wymiarach 25×22×8 cm. Natomiast w pomiarach przeprowadzanych przy wykorzystaniu układu 2, stosowano pojemniki o wymiarach 14×8×4,5 cm ; 14×8×8,5 cm ; 14×8×10,5 cm ; 14×8×12,5 cm realizując w ten sposób pomiar przy różnych grubościach warstwy węgla.

6.2. Badania nad wykorzystaniem zjawiska osłabienia promieniowania gamma do wyznaczenia gęstości powierzchniowej węgla.

Badania polegały na pomiarze względnego osłabienia natężenia promieniowania gamma przechodzącego przez próbkę

węgla w zależności od jej gęstości powierzchniowej.

W tym celu dokonywano pomiaru natężenia promieniowania gamma przechodzącego przez pusty pojemnik pomiarowy oraz przez ten sam pojemnik wypełniony węglem. Pusty oraz wypełniony węglem (o określonej gęstości powierzchniowej i wilgotności) pojemnik umieszczano pomiędzy źródłem promieniowania gamma i detektorem w układzie pomiarowym nr 3.

Gęstość powierzchniową węgla zmieniano przez zmianę grubości próbki węgla oraz zmianę jej gęstości objętościowej w taki sam sposób jak w przypadku pomiarów wykonywanych w układzie pomiarowym nr 2 (rozdział 6.1.).

Również wilgotność próbek była zmieniana w sposób opisany w rozdziale poprzednim.

Charakterystyka próbek węgla używanych do pomiarów opisanych w tym i poprzednim rozdziale jest podana w Uzupełnieniu IV.

7. Metoda opracowywania wyników.

Wyniki przedstawiano na wykresach - równania otrzymanych krzywych obliczano metodą najmniejszych kwadratów. Dla tych równań obliczano współczynniki korelacji oraz 68-procentowy (jedno-sigmowy) przedział ufności, zwany dalej resztkowym odchyleniem standardowym. Resztkowe odchylenie standardowe przyjęto za miarę błędu sporządzonych krzywych (tak zwana precyzja pomiarów).

W przypadkach korelacji liniowej sprawdzano ich istotność statystyczną stosując test Fishera [53] oraz obliczano 95-procentowy przedział ufności współczynników kierunkowych obliczonych równań prostych. Współczynniki kierunkowe, przyjęto za czułość metody pomiaru wilgotności przy wykorzystaniu krzywych wzorcowania.

W celu porównania błędu dwóch krzywych wzorcowania porównywano ich wariancje resztkowe za pomocą testu F Snedecora [53].

W przypadku oznaczania wilgotności węgla metodą amplitudowo-fazową, gdzie nie była stosowana krzywa wzorcowania, za błąd metody przyjęto średnie odchylenie standardowe błędów oznaczeń wilgotności liczone według wzoru:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (W_{oi} - W_i)^2}{n - 1}}$$

gdzie: W_{oi} - wilgotność oznaczona metodą standardową dla i-tej próbki,

W_i - wilgotność oznaczona metodą amplitudowo-fazową dla i-tej próbki,

n = liczba próbek.

Za wartość błędu pojedynczego pomiaru przyjęto odchylenie standardowe liczone z rozpiętości wyników[53]. Tak obliczony błąd nanoszono na wykresach w postaci odcinków. Na wykresach zaznaczone są jedynie maksymalne wartości tych błędów.

8. Badania wpływu gęstości objętościowej, grubości warstwy oraz wilgotności węgla na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu.

Celem badań przedstawionych w tym rozdziale jest określenie wpływu gęstości objętościowej próbki węgla na krzywe wzorcowania mikrofalowej metody oznaczania wilgotności.

Zmiana gęstości objętościowej wynikająca ze zmiany stopnia upakowania (ubicia) próbki jest czynnikiem, którego w pomiarach wilgotności nie da się uniknąć - ma on charakter losowy.

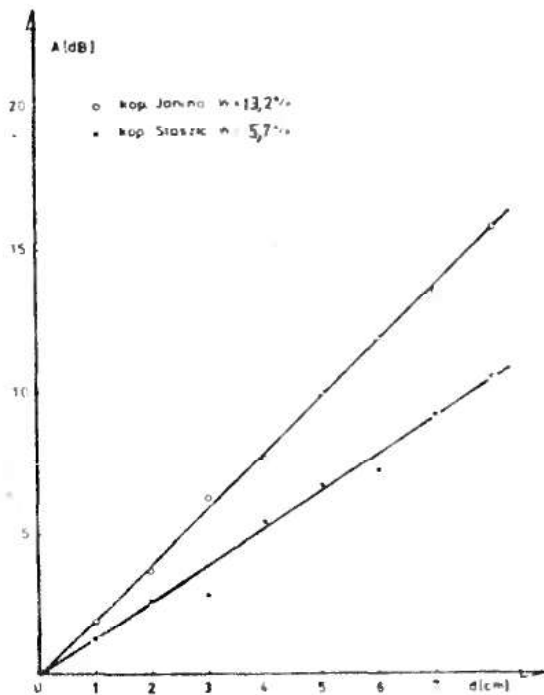
Z przedstawionej w rozdziale 4 teorii wynika, że zarówno $\frac{A}{d}$ jak i $\frac{A}{d \rho}$ zależą od gęstości objętościowej. Rezultat ten jest sprzeczny z oszacowaniami Kleina. Przeprowadzone pomiary miały na celu określenie w jakim stopniu $\frac{A}{d}$ i $\frac{A}{d \rho}$ zależą od ρ .

8.1 Wyniki.

Wszystkie badania przedstawione w tym rozdziale zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu układu pomiarowego nr 1, opisanego w rozdziale 5.1.

a. Wpływ grubości warstwy węgla.

Zależności tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal w węglu od grubości jego warstwy $A(d)$ i $\phi(d)$ przy stałych wilgotnościach i gęstościach objętościowych przedstawione są na rysunkach 13 i 14. Są to zależności liniowe, o czym świadczą wysokie współczynniki korelacji obliczone dla nich, zebrane w tabeli 3.

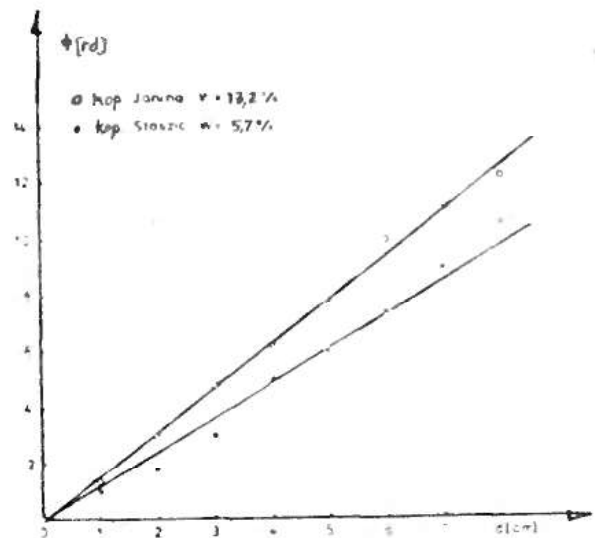


Rys. 13.

Zależności tłumienia mikrofal w warstwie węgla od grubości tej warstwy, przy stałej wilgotności i gęstości objętościowej. Próbki węgla o granulacji 0 - 1,4 mm pochodziły z kopalni Janina oraz Staszec.

Rys. 14.

Zależności przesunięcia fazy mikrofal w warstwie węgla od grubości tej warstwy, przy stałej wilgotności i gęstości objętościowej. Próbki węgla o granulacji 0 - 1,4 mm pochodziły z kopalni Janina oraz Staszec.



Na podstawie równań przedstawionych w tabeli 3 (wyraz wolny równy zero) można przyjąć, że tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal wprowadzone przez jednostkową grubość warstwy węgla nie zależy od grubości warstwy.

T a b e l a 3.

Wartości współczynników równań regresji liniowej zależności $A(d)$ i $\phi(d)$. W tabeli podano również reszkowe odchylenie standardowe zmiennej niezależnej s_d oraz zmiennych zależnych s_A i s_ϕ . Tłumienie A wyrażone jest w [dB], przesunięcie fazy ϕ w [rd], grubość warstwy węgla w metrach.

kopalnia	wilgotność W[%]	równanie regresji	w-nik korela- cji. R	s_A [dB]	s_d [m] $\times 10^{-2}$
				s_ϕ [rd]	
Janina	13,2	$A = 195,3 d$	0,9993	0,196	0,100
		$\phi = 159,6 d$	0,9981	0,268	0,167
Staszic	5,7	$A = 130,7 d$	0,9928	0,432	0,328
		$\phi = 134,9 d$	0,9956	0,348	0,257

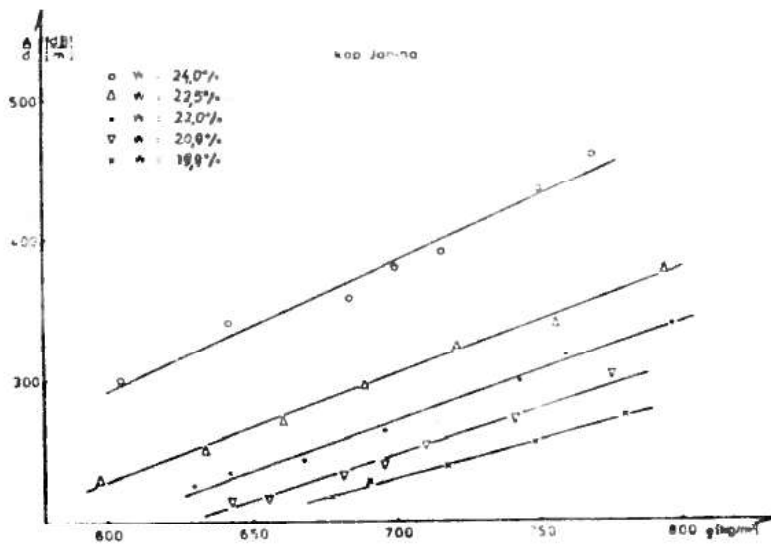
b. Wpływ gęstości objętościowej próbki węgla.

Zależności tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal wprowadzonych przez jednostkową grubość warstwy węgla, od jego gęstości objętościowej, przy stałych wilgotnościach całkowitych $\frac{A}{d}(g)|_{W=const.}$ i $\frac{\phi}{d}(g)|_{W=const.}$ dla kilku próbek węgla z kopalni Janina, przedstawiono przykładowo na rysunkach 15 i 16.

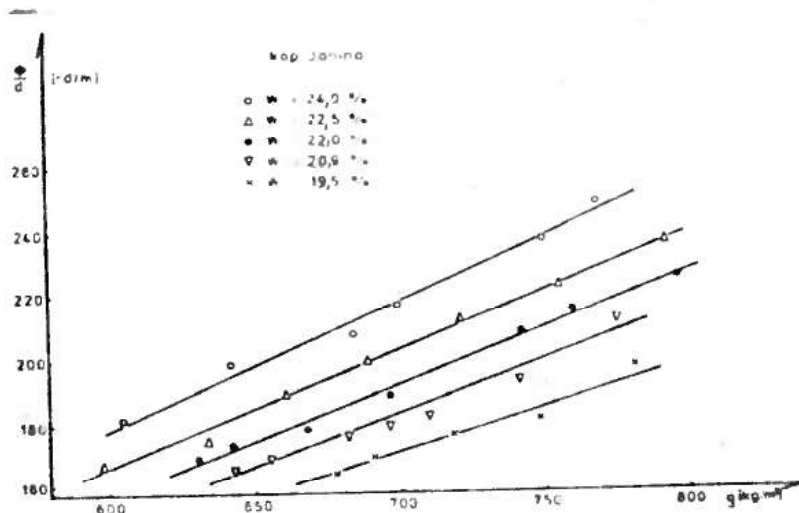
Przeprowadzono aproksymację tych zależności funkcjami liniowymi w postaci:

$$\frac{A}{d} = a_1 g + b_1 \quad (8.1)$$

$$\frac{\phi}{d} = a_2 g + b_2 \quad (8.2)$$



Rys. 15. Zależności $\frac{A}{d}(g)$ przy $W = \text{const.}$ dla próbek węgla z kopalni Janina. Granulacja próbek 0 - 1,4 mm.



Rys. 16. Zależności $\frac{\phi}{d}(g)$ przy $W = \text{const.}$ dla próbek węgla z kopalni Janina. Granulacja próbek 0 - 1,4 mm.

W tabelach 4 - 9 podano obliczone dla tych zależności współczynniki regresji, współczynniki korelacji oraz reszkowe odchylenia standardowe dla kilku kopalń.

Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{A}{d}(g) \Big|_{W=const.}$ i reszkowych odchyłek standardowych zmiennych zależnych S_A , dla próbek węgla z kopalni Janina o granulacji 0 - 1,4 mm.

l.p.	wilgo- tność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [dBm ² /kg]	wyraz wolny b [dB/m]	w-nik korelacji R	S_A [dB/m]
1	24,0	605,3 - 767,7	0,950	-278,3	0,9861	3,789
2	22,5	598,2 - 792,6	0,765	-231,1	0,9971	1,666
3	22,0	630,4 - 795,5	0,713	-227,5	0,9949	1,869
4	20,9	643,2 - 774,8	0,651	-207,8	0,9887	1,896
5	19,5	677,5 - 780,6	0,538	-145,5	0,9977	0,786
6	19,0	694,7 - 800,4	0,540	-160,4	0,9960	1,157
7	18,4	707,6 - 797,9	0,463	-105,9	0,9843	1,648
8	18,0	716,1 - 790,7	0,473	-124,0	0,9938	1,074
9	14,1	747,1 - 833,5	0,345	-75,4	0,9970	0,383

Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{A}{d}(g) \Big|_{W=const.}$

i reszkowych odchyłek standardowych zmiennych zależnych S_A ,

dla próbek węgla z kopalni Jaworzno-Brzeczkwice o granulacji 0 - 1,2 mm.

l.p.	wilgo- tność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [dBm ² /kg]	wyraz wolny b [dB/m]	w-nik korelacji R	S_A [dB/m]
1	24,5	613,2 - 744,6	1,029	-225,4	0,9985	1,328
2	21,5	617,4 - 827,3	0,837	-170,3	0,9935	3,186
3	21,2	592,6 - 780,5	0,801	-220,3	0,9971	1,761
4	18,9	622,9 - 800,9	0,698	-224,9	0,9888	2,790
5	18,8	626,3 - 768,6	0,663	-219,3	0,9984	0,924
6	17,5	667,8 - 813,5	0,562	-189,8	0,9877	2,244
7	15,2	705,0 - 827,6	0,447	-143,3	0,9935	1,286
8	11,5	776,5 - 859,3	0,198	-0,8	0,9022	2,230

Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{A}{d}(g) \Big|_{W=const.}$ i resztkowych odchyłek standardowych zmiennych zależnych S_A , dla próbek węgla z kopalni Staszic o granulacji 0 - 1,4 mm.

l.p.	wilgo- tność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [dBm ² /kg]	wyraz wolny b [dB/m]	w-nik korelacji R	S _A [dB/m]
1	13,5	633,0 - 864,6	0,570	-62,7	0,9963	1,527
2	12,7	620,8 - 857,6	0,549	-104,1	0,9824	2,386
3	11,6	610,6 - 779,2	0,561	-164,3	0,9853	2,468
4	10,8	613,2 - 812,5	0,426	-103,8	0,9851	1,702
5	10,1	651,3 - 804,4	0,523	-182,6	0,9946	1,381
6	9,9	638,9 - 806,3	0,364	-83,7	0,9843	2,017
7	8,5	686,9 - 848,4	0,319	-83,1	0,9857	1,560
8	7,0	722,9 - 861,2	0,294	-91,9	0,9917	1,127
9	5,7	759,7 - 851,1	0,216	-62,5	0,9931	0,397
10	4,5	778,9 - 869,5	0,191	-74,1	0,9898	0,677
11	3,3	795,9 - 879,3	0,123	-49,2	0,9856	0,374

Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{\phi}{d}(g)$ | $W=const.$

i resztkowych odchylen standardowych zmiennych zależnych S_{ϕ} ,
dla próbek węgla z kopalni Janina o granulacji 0 - 1,4 mm.

l.p.	wilgo- tność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [rdm ² /kg]	wyraz wolny b [rd/m]	w-nik korelacji R	S_{ϕ} [rd/m]
1	24,0	605,3 - 767,7	0,393	-58,2	0,9934	1,075
2	22,5	598,2 - 792,6	0,370	-57,2	0,9971	0,798
3	22,0	630,4 - 795,5	0,353	-56,1	0,9966	0,757
4	20,9	643,2 - 774,8	0,332	-51,9	0,9737	1,492
5	19,5	677,5 - 780,6	0,292	-34,5	0,9776	1,368
6	19,0	694,7 - 800,4	0,268	-19,6	0,9969	0,504
7	18,4	707,6 - 797,9	0,262	-18,1	0,9754	1,172
8	18,0	716,1 - 790,7	0,230	3,3	0,9959	0,423
9	14,1	747,1 - 833,5	0,234	-22,9	0,9990	0,153

Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{\phi}{d}(g) \Big|_{W=const.}$ i resztkowych odchyłań standardowych zmiennych zależnych S_{ϕ} , dla próbek węgla z kopalni Jaworzno-Brzeczkwice o granulacji 0 - 1,2 mm.

l.p	wilgotność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [rdm ² /kg]	wyraz wolny b [rd/m]	w-nik korelacji R	S_{ϕ} [rd/m]
1	24,5	613,2 - 744,6	0,421	-54,9	0,9981	0,600
2	21,5	617,5 - 827,3	0,837	-170,3	0,9887	1,987
3	21,2	592,6 - 780,5	0,317	-23,3	0,9968	0,722
4	18,9	622,9 - 800,9	0,380	-87,1	0,9922	1,267
5	18,8	626,3 - 768,6	0,348	-67,6	0,9960	0,759
6	17,5	667,8 - 813,5	0,264	-23,6	0,9956	0,626
7	15,2	705,0 - 827,6	0,259	-33,4	0,9990	0,289
8	11,5	776,5 - 859,3	0,163	18,6	0,9233	1,599

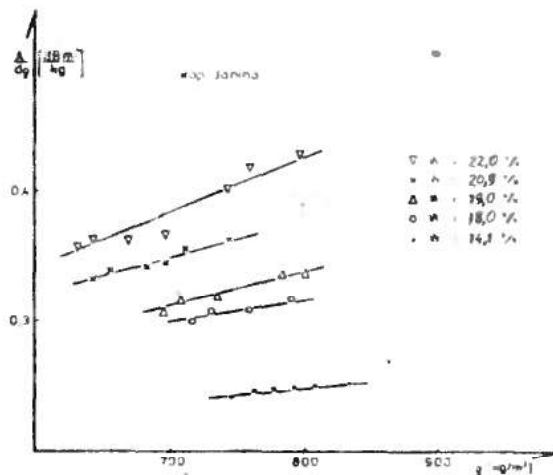
Wartości współczynników równań regresji liniowej dla zależności $\frac{\phi}{d}(g) \Big|_{W=const.}$ i reszkowych odchyłań standardowych zmiennych zależnych S_{ϕ} , dla próbek węgla z kopalni Staszic o granulacji 0 - 1,4 mm.

l.p.	wilgo- tność W [%]	zakres zmian gęstości objętościowej [kg/m ³]	w-nik kierunkowy a [rdm ² /kg]	wyraz wolny b [rd/m]	w-nik korelacji R	S_{ϕ} [rd/m]
1	13,5	633,0 - 864,6	0,182	61,9	0,9947	0,589
2	12,7	620,8 - 857,6	0,297	-41,2	0,9906	0,935
3	11,6	610,6 - 779,2	0,300	-56,0	0,9940	0,834
4	10,8	613,2 - 812,5	0,265	-39,3	0,9964	0,512
5	10,1	651,3 - 804,4	0,237	-21,1	0,9875	0,958
6	9,9	638,9 - 806,3	0,276	-56,7	0,9742	1,921
7	8,5	686,9 - 848,4	0,205	-17,2	0,9875	0,934
8	7,0	722,9 - 861,2	0,189	-16,2	0,9945	0,586
9	5,7	759,7 - 851,1	0,187	-25,0	0,9981	0,180
10	4,5	778,9 - 869,5	0,163	-14,7	0,9979	0,258
11	3,3	795,9 - 879,3	0,143	-2,2	0,9939	0,281

Dla wszystkich badanych próbek węgla korelacje liniowe w postaci (8.1) i (8.2) są istotne statystycznie na poziomie ufności 0,01.

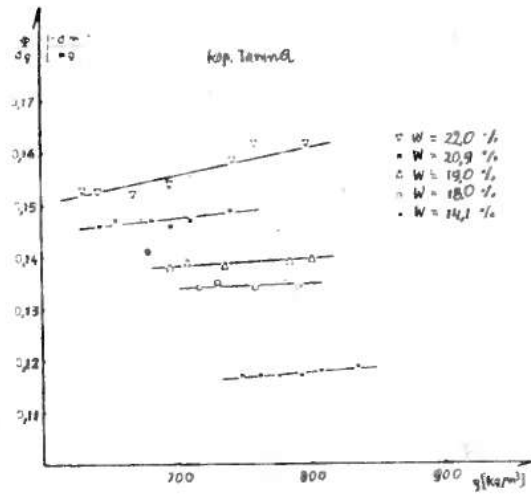
Z danych przedstawionych w tabelach 4 - 9 można zauważyć, że współczynniki kierunkowe zależności $\frac{A}{d}(\rho)$ i $\frac{\Phi}{d}(\rho)$ przy $W = \text{const.}$ rosną ze wzrostem wilgotności. Wynika stąd, że w miarę wzrostu wilgotności węgla wzrasta wpływ gęstości objętościowej na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu.

Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono zależności względnego tłumienia i przesunięcia fazy od gęstości objętościowej $\frac{A}{d \rho}(\rho)$ i $\frac{\Phi}{d \rho}(\rho)$ dla próbek węgla z kopalni Janina.



Rys. 17. Zależności $\frac{A}{d \rho}(\rho)$ przy $W = \text{const.}$ dla próbek węgla z kopalni Janina. Granulacja próbek 0 - 1,4 mm

Współczynniki regresji liniowej dla kopalni Janina i dla pozostałych kopalni dla zależności $\frac{A}{d \rho}(\rho)$ i $\frac{\Phi}{d \rho}(\rho)$ są zebrane w tabelach 10 - 12 .



Rys. 18. Zależności $\frac{\Phi}{d g}(g)$ przy $W = \text{const.}$ dla próbek węgla z kopalni Janina. Granulacja 0 - 1,4 mm.

Porównując współczynniki kierunkowe zebrane w tabelach 4 - 9 ze współczynnikami kierunkowymi przedstawionymi w tabelach 10 - 12 można stwierdzić, że wpływ gęstości objętościowej na względne tłumienie $\frac{A}{d g}$ i względne przesunięcie fazy $\frac{\Phi}{d g}$ mikrofal jest znacznie mniejszy, niż na tłumienie i przesunięcie fazy przypadające na jednostkę grubości warstwy $\frac{A}{d}$, $\frac{\Phi}{d}$. Wniosek ten można zilustrować za pomocą następującego przykładu.

Przyjmijmy, że gęstość objętościowa próbki węgla o wilgotności 20,9% z kopalni Janina wynosi 700 kg/m^3 . Wtedy zmiana gęstości objętościowej o 10% (to jest o 70 kg/m^3) powoduje względną zmianę wartości $\frac{A}{d}$ o 18,2%, natomiast wartości $\frac{A}{d g}$ o 8,2%.

Jak widać odniesienie tłumienia do jednostkowej gęstości objętościowej nie eliminuje wpływu gęstości objętościowej jak to wynika z rozważań Kleina [28], ale go znacznie zmniejsza.

Wartości współczynników równań regresji dla zależności $\frac{A}{d\varrho} = a_1\varrho + b_1$ oraz $\frac{\Phi}{d\varrho} = a_2\varrho + b_2$ przy $W = \text{const}$.

obliczone dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,4 mm, pochodzących z kopalni Janina.

s_A, s_Φ - resztkowe odchylenia standardowe zmiennych zależnych.

Równanie:		$\frac{A}{d\varrho} = a_1\varrho + b_1$				$\frac{\Phi}{d\varrho} = a_2\varrho + b_2$			
l.p.	W [%]	a_1 [dB/m]	b_1 [dBm ² /kg]	w-nik kore- lacji	s_A	a_2 [rd/m]	b_2 [rdm ² /kg]	w-nik kore- lacji	s_Φ
1	24,0	0,000584	0,140	0,9456	0,011	0,000122	0,224	0,8940	0,003
2	22,5	0,000481	0,095	0,9886	0,005	0,000119	0,204	0,9390	0,003
3	22,0	0,000451	0,070	0,9819	0,005	0,000111	0,195	0,9422	0,002
4	20,9	0,000410	0,066	0,9617	0,005	0,000099	0,188	0,6934	0,005
5	19,5	0,000275	0,137	0,9849	0,005	0,000063	0,198	0,6088	0,003
6	19,0	0,000288	0,110	0,9738	0,003	0,000035	0,216	0,7755	0,001
7	18,4	0,000182	0,182	0,8563	0,004	brak korelacji			
8	18,0	0,000219	0,144	0,9497	0,002	brak korelacji			
9	14,1	0,000122	0,153	0,9539	0,001	0,000036	0,176	0,9437	0,0004

Wartości współczynników równań regresji dla zależności $\frac{A}{dQ}(\rho)$ oraz $\frac{\Phi}{dQ}(\rho)$ przy $W = \text{const}$.
 obliczone dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,2 mm, pochodzących z kopalni Jaworzno-
 Brzęczkowice. s_A, s_Φ - resztkowe odchylenia standardowe zmiennych zależnych.

Równanie:		$\frac{A}{dQ} = a_1 \rho + b_1$				$\frac{\Phi}{dQ} = a_2 \rho + b_2$			
l.p.	W [%]	a_1 [dB/m]	b_1 [dBm ² /kg]	w-nik kore- lacji	s_A	a_2 [rd/m]	b_2 [rdm ² /kg]	w-nik kore- lacji	s_Φ
1	24,5	0,000495	0,359	0,9825	0,0047	0,000119	0,258	0,9645	0,0017
2	21,5	0,000357	0,339	0,9737	0,0066	0,000122	0,226	0,8809	0,0051
3	21,2	0,000471	0,154	0,9914	0,0043	0,000048	0,251	0,8087	0,0024
4	18,9	0,000440	0,066	0,9588	0,0083	0,000173	0,134	0,9293	0,0044
5	17,5	0,000343	0,051	0,9569	0,0057	0,000042	0,201	0,7882	0,0018
6	18,8	0,000452	0,032	0,9969	0,0019	0,000146	0,148	0,9559	0,0024
7	15,2	0,000242	0,073	0,9747	0,0027	0,000057	0,172	0,9677	0,0007
8	11,5	0,000121	0,096	0,9708	0,0010	0,000064	0,132	0,9177	0,0009

Wartości współczynników równań regresji dla zależności $\frac{A}{dQ}(Q)$ oraz $\frac{\phi}{dQ}(Q)$ przy $W = \text{const.}$ obliczone dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,4 mm, pochodzących z kopalni Staszic.
 s_A, s_ϕ - resztkowe odchylenia standardowe zmiennych zależnych.

Równanie:		$\frac{A}{dQ} = a_1 Q + b_1$				$\frac{\phi}{dQ} = a_2 Q + b_2$			
l.p.	W [%]	a_1 [dB/m]	b_1 [dBm ² /kg]	w-nik korelacji	s_A	a_2 [rd/m]	b_2 [rdm ² /kg]	w-nik korelacji	s_ϕ
1	13,5	0,000160	0,364	0,8818	0,0064	-0,000116	0,353	-0,9547	0,0027
2	12,7	0,000196	0,262	0,8157	0,0110	0,000075	0,185	0,7964	0,0045
3	11,6	0,000336	0,089	0,9418	0,0073	0,000115	0,139	0,9383	0,0026
4	10,8	0,000198	0,138	0,9057	0,0063	0,000076	0,155	0,9276	0,0021
5	10,1	0,000346	0,190	0,9817	0,0037	brak	korelacji		
6	9,9	0,000158	0,133	0,8789	0,0057	0,000105	0,121	0,7988	0,0052
7	8,5	0,000138	0,105	0,9300	0,0034	brak	korelacji		
8	7,0	0,000145	0,062	0,9554	0,0026	0,000025	0,150	0,7098	0,0014
9	5,7	0,000096	0,061	0,9532	0,0010	0,000039	0,124	0,9371	0,0005
10	4,5	0,000110	0,010	0,9488	0,0014	0,000021	0,127	0,8724	0,0005
11	3,3	0,000071	0,005	0,9322	0,0009	brak	korelacji		

c. Wpływ wilgotności całkowitej, przemijającej i higroskopijnej.

Jak już wspomniano we wprowadzeniu, z punktu widzenia technologicznego niezwiązana chemicznie woda w węglu stanowi takzwaną wilgotność higroskopijną, wyznaczaną w temperaturze 105°C oraz wilgotność przemijającą, wyznaczaną w temperaturze pokojowej.

Zawartość wody higroskopijnej W_h koreluje z zawartością pierwiastka C i w przybliżeniu jest równa zawartości wody związanej fizycznie w porach węgla.

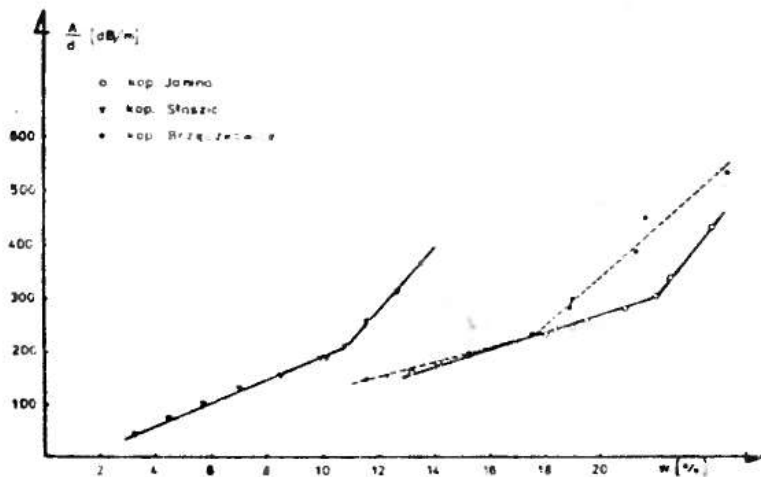
Wilgotność przemijająca W_p zależy od tego jakim procesom technologicznym został poddany węgiel, a jej oznaczenia zależą od wilgotności względnej powietrza otaczającego suszoną próbkę.

Celem badań przedstawionych w tym rozdziale jest określenie wpływu, jaki obydwie rodzaje wilgotności wywierają na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu.

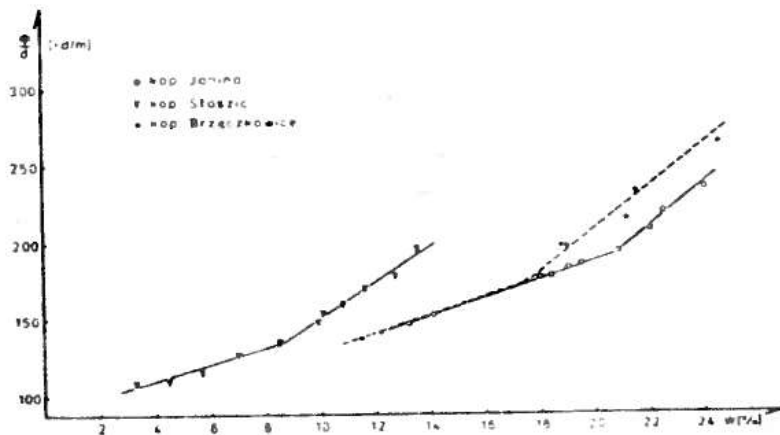
Zależności tłumienia i przesunięcia fazy przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla, od jego wilgotności całkowitej, będącej sumą wilgotności przemijającej i higroskopijnej, przy stałej gęstości objętościowej przedstawiono na rysunkach

19 i 20. W celu sporządzenia tych zależności wykorzystano funkcje $\frac{A}{d}$ i $\frac{\Phi}{d}$ przy $W = \text{const.}$, z których znaleziono wartości $\frac{A}{d}$ i $\frac{\Phi}{d}$ przy ustalonej gęstości objętościowej 750 kg/m³ dla różnych wilgotności próbek.

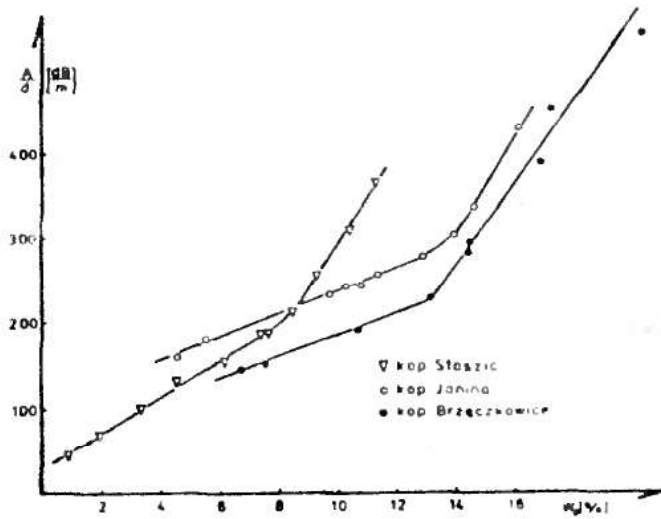
Przedstawione na rysunkach 19 i 20 zależności nie odbiegają swoim kształtem od zależności spotykanych w literaturze. Można je przybliżyć dwoma prostymi przecinającymi się przy $W = W_{kr.}$ Równania regresji tych prostych zostały zebrane w tabelach 13 i 14.



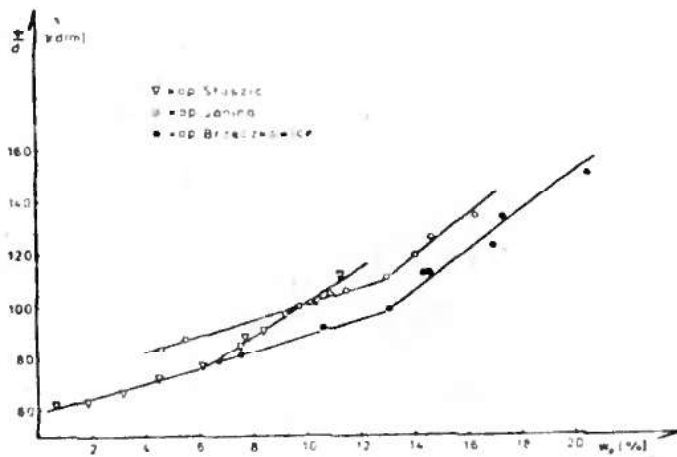
Rys. 19. Zależność tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności całkowitej, przy gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$.
Próbki węgla pochodziły z kopalni Janina (granulacja 0 - 1,4 mm, $W_h = 9,2 \%$), Staszic (0 - 1,4 mm, $W_h = 6,2 \%$) i Jaworzno-Brzęczkowice (0-1,2mm, $W_h = 5,1\%$)



Rys. 20. Zależność przesunięcia fazy mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności całkowitej, przy gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, dla tych samych próbek węgla, dla których sporządzono rysunek poprzedni.



Rys. 21. Zależności tłumienia mikrofal przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności przemijającej, przy stałej gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$. Próbki węgla te same, dla których sporządzono rysunek 19 .



Rys. 22. Zależności przesunięcia fazy mikrofal przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności przemijającej, przy stałej gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$. Próbki węgla te same, dla których sporządzono rysunek 19 .

Wartości współczynników równań regresji liniowej, obliczone dla zależności $\frac{A}{d}(W)$ przy gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$. W tabeli podano również wartości resztkowych odchyłeń standardowych zmiennych zależnych s_A i niezależnych s_W .

kopalnia	granu- lacja [mm]	zakres zmian wilgotności [% H ₂ O]	w-nik kieru- nkowy [dB/m %]	wyraz wolny [dB/m]	w-nik kore- lacji R	s_W [% H ₂ O]	s_A [dB/m]
Jaworzno- Brzęczko- wice	0 - 1,2	17,5 - 24,5	45,894	-574,0	0,9866	0,41	19,18
		11,5 - 17,5	13,780	-16,2	0,9971	0,21	2,94
Janina	0 - 1,4	22,0 - 24,0	62,769	-1072,2	0,9999	0,01	0,73
		13,2 - 22,0	15,594	-44,1	0,9940	0,33	5,25
Staszic	0 - 1,4	10,8 - 13,5	56,164	-397,4	0,9979	0,07	4,31
		3,3 - 10,8	21,430	-25,8	0,9983	0,16	3,49

Wartości współczynników równań regresji liniowej, obliczone dla zależności $\frac{\phi}{d}(w)$ przy gęstości objętościowej $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$. W tabeli podano również wartości resztkowych odchyłeń standardowych zmiennych zależnych s_{ϕ} i niezależnych s_w .

kopalnia	granu- lacja [mm]	zakres zmian wilgotności [% H ₂ O]	w-nik kieru- nkowy [rd/m %]	wyraz wolny [rd/m]	w-nik kore- lacji R	s_w [% H ₂ O]	s
Jaworzno- Brzęczko- wice	0 - 1,2	18,8 - 24,5	11,900	-27,815	0,9798	0,47	5,66
		11,5 - 17,5	5,920	70,052	0,9995	0,09	0,52
Janina	0 - 1,4	22,0 - 24,0	13,352	-82,700	0,9816	0,20	2,70
		13,2 - 20,9	6,104	66,540	0,9999	0,05	0,30
Staszic	0 - 1,4	10,8 - 13,5	13,200	15,690	0,9792	0,25	3,36
		3,3 - 10,1	6,669	81,810	0,9792	0,54	3,65

Z rysunków 19 i 20 widać, że dla próbek węgla o różnej zawartości wilgotności higroskopijnej, pochodzących z różnych kopalń, otrzymano różne krzywe $\frac{A}{d}(W)$ i $\frac{\Phi}{d}(W)$.

Na rysunkach 21 i 22 pokazano zależności tłumienia i przesunięcia fazy przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla od zawartości wilgotności przemijającej $\frac{A}{d}(W_p)$ i $\frac{\Phi}{d}(W_p)$. Z przedstawionych wykresów widać, że mimo wyeliminowania wilgotności higroskopijnej, dla próbek węgla pochodzących z różnych kopalń istnieją różnice w wielkości tłumienia i przesunięcia fazy przy tej samej wartości wilgotności przemijającej. Można przypuszczać, że te różnice są spowodowane różnymi własnościami dielektrycznymi powietrzno-suchego węgla pochodzącego z różnych kopalń.

8.2. Dyskusja wyników i wnioski.

Jak już wspomniano, celem badań była ocena wpływu gęstości objętościowej węgla na krzywe wzorcowania mikrofalowej metody oznaczania jego wilgotności.

Wpływ ten można ocenić badając współczynnik:

$$K = \frac{\frac{\partial(\frac{A}{d})}{\partial \rho}}{\frac{\partial(\frac{A}{d})}{\partial W}} \quad (8.3)$$

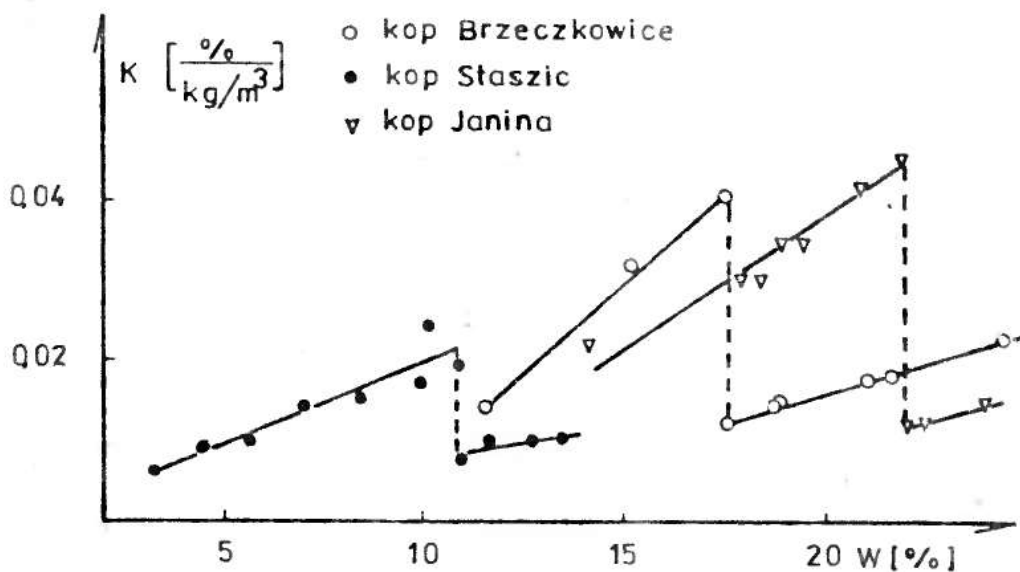
w całym zakresie zmian wilgotności węgla. Wartość współczynnika K określa jaki jest wpływ zmian gęstości objętościowej na dokładność oznaczeń wilgotności z krzywych wzorcowania $\frac{A}{d}(W)$. Korzystając z doświadczalnych zależności $\frac{A}{d}(\rho)$ przy $W = \text{const.}$

i $\frac{A}{d}(W)$ przy $\rho = \text{const.}$ (tabele 4 - 9 i 13 - 14),
wzór (8.3) można inaczej zapisać:

$$K = \frac{a_1}{a_2} \quad (8.4)$$

gdzie: a_1 - współczynnik kierunkowy zależności $\frac{A}{d}(\rho) \Big|_{W=\text{const.}}$
 a_2 - współczynnik kierunkowy zależności $\frac{A}{d}(W) \Big|_{\rho=\text{const.}}$

Zależności współczynnika K od wilgotności, obliczone dla próbek węgla pochodzących z różnych kopalń przedstawiono na rysunku 23 .



Rys. 23 . Zależność współczynnika K od wilgotności próbek węgla.

Z przedstawionych na tym rysunku zależności $K(W)$ widać, że dla próbek węgla pochodzących z tej samej kopalni, wartość współczynnika K rośnie ze wzrostem wilgotności.

Wzrost ten nie jest monotoniczny - przy $W = W_{kr}$ K zmniejsza się w sposób skokowy i dalej rośnie wraz z wilgotnością, jednak znacznie wolniej niż w zakresie $W < W_{kr}$.

Wynikają stąd następujące wnioski:

1. Wpływ gęstości objętościowej na wyniki oznaczeń wilgotności węgla z krzywych wzorcowania w zakresie $W > W_{kr}$ jest znacznie mniejszy niż w zakresie $W < W_{kr}$;
2. W obu zakresach zmian wilgotności, wpływ gęstości objętościowej na wyniki oznaczeń wilgotności węgla wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności.

T a b e l a 15.

Wartości współczynników korelacji liniowej oraz resztkowe odchylenia standardowe zmiennej zależnej s_W dla zależności:

$$\frac{A}{d}(W) \quad \text{i} \quad \frac{A}{dQ}(W) .$$

kopalnia	zakres wilgotności	$\frac{A}{d}(W)$		$\frac{A}{dQ}(W)$	
		w-nik korelacji	s_W [% H ₂ O]	w-nik korelacji	s_W [% H ₂ O]
Staszic	$W > W_{kr}$	0,9638	0,11	0,9857	0,07
	$W < W_{kr}$	0,9780	0,15	0,9977	0,05
Janina	$W > W_{kr}$	0,9267	0,15	0,9755	0,09
	$W < W_{kr}$	0,8900	0,35	0,9806	0,15
Jaworzno-Brzęczkowice	$W > W_{kr}$	0,9450	0,28	0,9653	0,22
	$W < W_{kr}$	0,9789	0,23	0,9950	0,11

W punkcie b. rozdziału 8.1 stwierdzono, że gęstość objętościowa ma mniejszy wpływ na względne tłumienie $\frac{A}{d \rho}$ niż na tłumienie przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla $\frac{A}{d}$.

Wynika stąd, że przy zmieniających się gęstościach objętościowych próbek węgla, korzystniej jest stosować jako krzywą wzorcowania mikrofalowej metody oznaczania wilgotności zależność $\frac{A}{d \rho}(W)$ niż $\frac{A}{d}(W)$.

Potwierdzeniem tego wniosku jest fakt, że odchylenia standardowe s_W obliczone dla zależności $\frac{A}{d \rho}(W)$ są mniejsze niż dla zależności $\frac{A}{d}(W)$ przy zmieniających się gęstościach objętościowych dla tych samych próbek węgla. Ilustruje to tablica 15.

9. Badania nad wpływem wielkości ziarna na tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w węglu.

Celem przeprowadzonych badań jest oszacowanie w jakim zakresie wielkość ziarna ogranicza stosowalność mikrofalowej metody do oznaczania zawartości wilgotności w węglu, oraz próba oceny istotności wpływu różnych zjawisk: rozpraszania Rayleigha, zmian stałej tłumienia i odbicia fal elektromagnetycznych na tłumienie mikrofal.

Doświadczenia przeprowadzono dla różnych frakcji graulometrycznych węgli rozdrobnionych (0 - 5 mm) i dla różnych produktów wzbogacania węgla. Przeprowadzono również doświadczenie "referencyjne" dla próbek o zmiennej granulacji tego samego węgla.

9.1. Wyniki.

Na rysunku 24 przedstawiono zależności przesunięcia fazy mikrofal przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla od wilgotności $\frac{\Phi}{d}(w)$ dla trzech frakcji: 0 - 1,2 mm;

1,2 - 3 mm; 3 - 5 mm, wydzielonych z próbki węgla z kopalni Jaworzno-Brzęczkowice. Widać z rysunku, że w zakresie wilgotności mniejszych od w_{kr} punkty doświadczalne odpowiadające poszczególnym frakcjom układają się wokół jednej wspólnej prostej. Wpływ granulacji na przesunięcie fazy zaznacza się dopiero przy wilgotnościach większych od w_{kr} .

Rysunek 25 przedstawia zależności między tłumieniem mikrofal przypadającym na jednostkę grubości warstwy węgla a zawartością wilgotności dla tych samych frakcji tej samej próbki węgla z kopalni Jaworzno-Brzęczkowice.

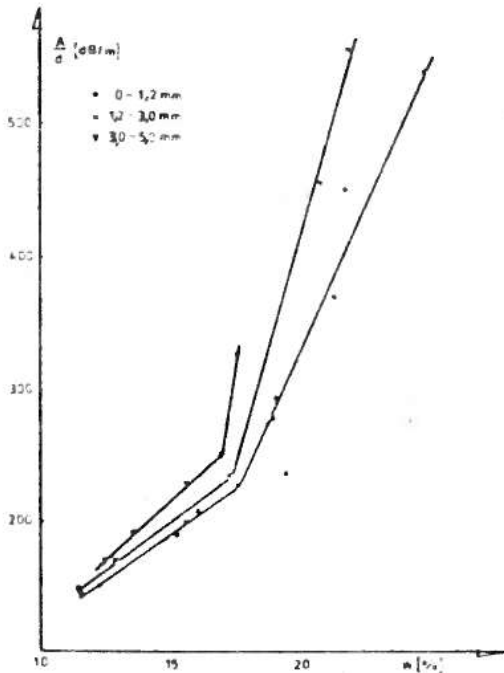
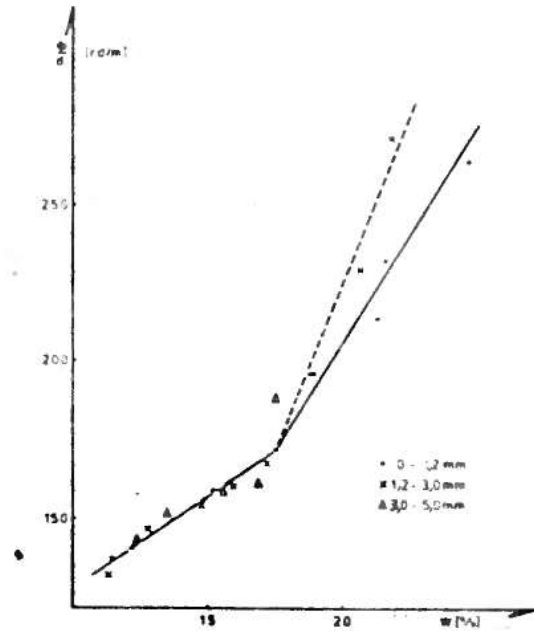
Rys. 24.

Zależności przesunięcia fazy mikrofal przypadające na jednostkę grubości warstwy węgla od wilgotności przy $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ dla różnych frakcji ziarnowych próbki węgla z kopalni Jaworzno-Brzęczkowice. Wspólna dla różnych frakcji ziarnowych część krzywej opisana jest

$$\frac{\Phi}{d} = (5,42 W + 75,68)$$

rd/m, ze współczynnikiem

korelacji $R = 0,9748$. Pomiar przeprowadzono za pomocą układu pomiarowego nr 1.



Rys. 25.

Zależności tłumienia przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od wilgotności, przy $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$, dla różnych frakcji ziarnowych węgla z kopalni Jaworzno-Brzęczkowice. Pomiar przeprowadzono stosując układ pomiarowy nr 1.

Z rysunku 25 widać, że wraz ze wzrostem frakcji ziarnowej rośnie wartość $\frac{A}{d}$

T a b e l a 16.

Wartości współczynników kierunkowych krzywych $\frac{A}{d}$ (W) dla $W < W_{kr}$ dla próbek węgla o różnej granulacji, pochodzących z kopalni Jaworzno-Erzęczkowice. W tabeli podano również 95-procentowy przedział ufności współczynnika kierunkowego Δb , oraz resztkowe odchylenie standardowe zmiennych zależnych s_A .

granulacja [mm]	w-nik kierunkowy [dB/m·%]	Δb [dB/m·%]	s_A [dB/m]
0 - 1,2	13,77	1,600	2,93
1,2 - 3	13,80	4,210	5,50
3 - 5	18,46	0,793	0,50

Nie ma natomiast istotnych różnic między współczynnikami kierunkowymi krzywych wzorcowania dla frakcji 0 - 1,2 mm i 1,2 - 3 mm w zakresie $W < W_{kr}$, (tabela 16). Jedynie dla frakcji 3 - 5 mm współczynnik kierunkowy krzywej różni się od pozostałych w sposób istotny statystycznie, (z prawdopodobieństwem 0,99) .

Na rysunku 26 przedstawiono wykresy funkcji $\frac{A}{dQ}$ (W) dla różnych produktów wzbogacania węgla z kopalni Anna, to jest koncentratu, przerostów i odpadów oraz dla węgla z nadawy stanowiącej mieszaninę tych produktów. Wyniki analizy regresji tych funkcji zestawiono w tabeli 17 . Precyzja pomiarów względnego tłumienia zmienia się od 0,05 dBm²/kg (dla nadawy) do 0,015 dBm²/kg (dla odpadów) . Współczynnik korelacji

dla odpadów wynosi 0,92, zaś dla pozostałych produktów jest wyższy od 0,98.

T a b e l a ----- 17.

Wartości współczynników krzywych wzorcowania dla nadawy i produktów wzbogacania węgla z kopalni Anna. Granulacja próbek 0 - 20 mm

s_W - reszkowe odchylenie standardowe zmiennej niezależnej.

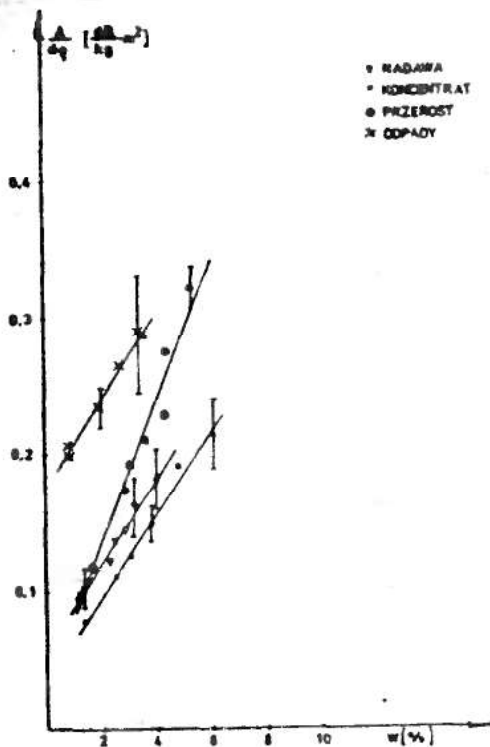
s_A - reszkowe odchylenie standardowe zmiennej zależnej.

$\frac{A}{d\varrho} = a W + b$						
l.p	produkt	$\left[\frac{dBm^2}{kg \cdot \%} \right]$	$\left[\frac{dBm^2}{kg} \right]$	s_W [%]	s_A [$\frac{dBm^2}{kg}$]	w-nik korelacji
1	nadawa	0,031	0,058	0,15	0,005	0,9870
2	koncentrat	0,030	0,034	0,19	0,006	0,9936
3	przerost	0,052	0,029	0,27	0,014	0,9827
4	odpady	0,033	0,178	0,42	0,015	0,9194

Reszkowe odchylenie standardowe wyrażone w jednostkach zawartości wody wynosi 0,42 % H_2O dla odpadów, dla pozostałych produktów zmienia się od 0,15 do 0,27 % H_2O . Współczynnik kierunkowy krzywej wzorcowania dla przerostów wynosi 0,052 $dBm^2/kg \cdot \%$ zaś dla pozostałych produktów zmienia się od 0,030 do 0,033 $dBm^2/kg \cdot \%$.

Zmiany tłumienia w poszczególnych produktach wzbogacania i nadawie o tej samej klasie ziarnowej (0 - 20 mm), spowodowane są różnicami gęstości rzeczywistej, zawartości

popiołu oraz różnymi zawartościami poszczególnych frakcji granulometrycznych: 0 - 3 mm, 3 - 20 mm. I tak, zawartości frakcji gruboziarnistej w odpadach, przerostach, nadawie i koncentracie wynoszą odpowiednio: 89,6 %, 75,4 %, 62,5 % i 58,4 %.



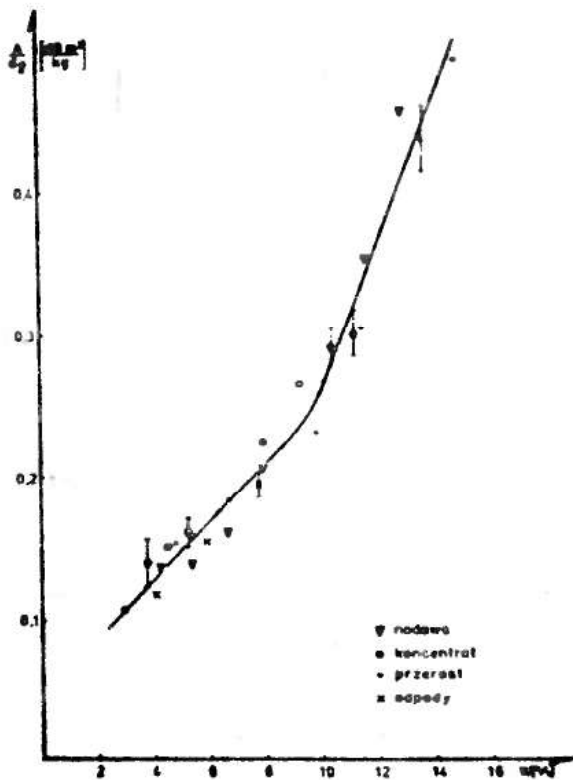
Rys. 26.

Zależność względnego tłumienia mikrofal w próbkach węgla nadawy i produktów wzbogacania pochodzących z kopalni Anna. Granulacja próbek 0 - 20 mm. Pomiar wykonano przy wykorzystaniu układu pomiarowego nr 2.

Widać z rysunku 26, że wzrost względnego tłumienia koreluje ze wzrostem zawartości grubych ziaren w próbce.

Na rysunku 27 przedstawiono krzywą wzorcowania $\frac{A}{dQ} (W)$ sporządzoną dla próbek wszystkich produktów wzbogacania i nadawy, rozdrobnionych do klasy ziarnowej 0 - 3 mm. Z porównania tego rysunku i rysunku 26 wynika, że zmiany zawartości popiołu i gęstości rzeczywistej węgla mają mniejszy wpływ na tłumienie niż wielkość ziarna.

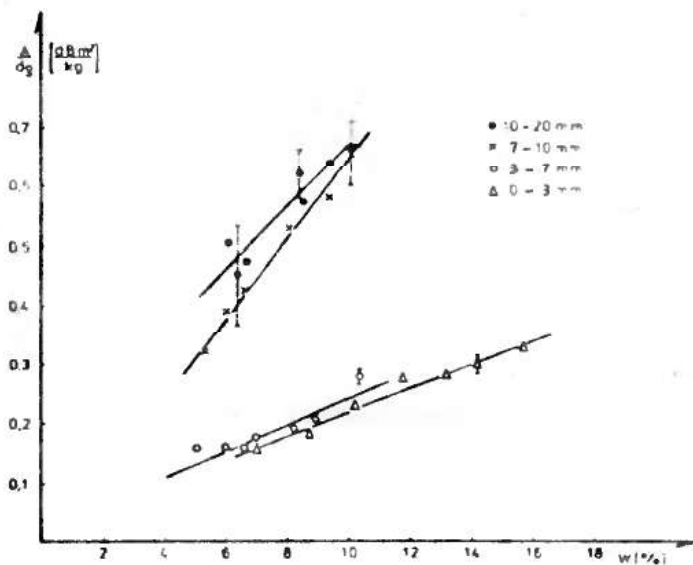
O tym, że frakcje gruboziarniste wpływają w istotny sposób na wzrost tłumienia świadczą zależności $\frac{A}{dQ} (W)$ przedstawione na rysunku 28.



Rys. 27 .

Zależność względnego tłumienia mikrofal w próbkach węgla nadawy i produktów wzbogacania pochodzących z kopalni Anna. Próbki były zmielone do granulacji 0 - 3 mm. Pomiaru wykonano przy wykorzystaniu układu pomiarowego nr 2.

Poszczególne frakcje ziarnowe dla których sporządzono wykresy uzyskano przez kruszenie jednej bryły węgla, mają więc one jednakowe własności fizykochemiczne (poza wielkością ziarna).

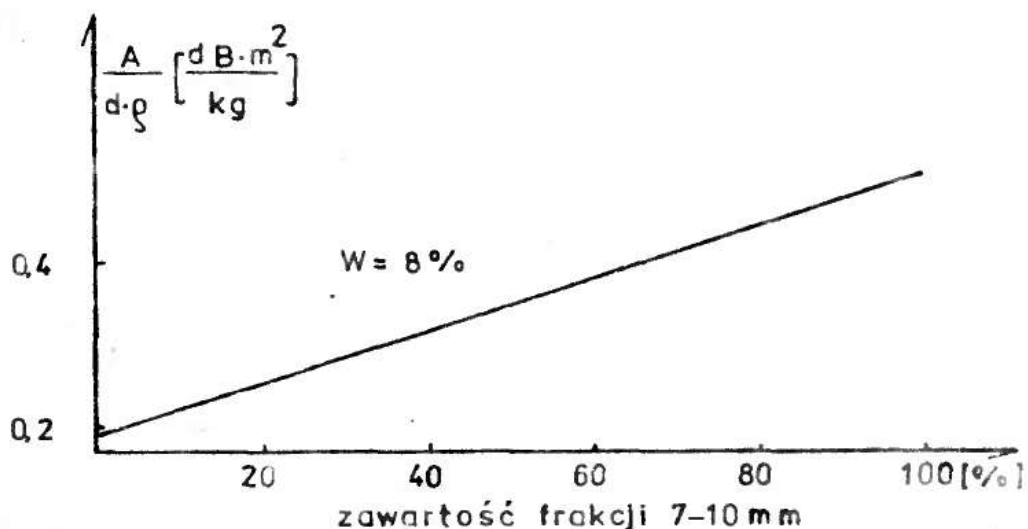


Rys. 28. Zależności względnego tłumienia mikrofal, zmierzonego w układzie nr 2, od wilgotności węgla dla różnych frakcji granulometrycznych uzyskanych przez rozdrobienie jednej bryły węgla.

Lepszą ilustrację wpływu wielkości ziarna na wartość tłumienia przedstawia wykres $\frac{\bar{A}}{d\varrho}$ w funkcji procentowej zawartości frakcji gruboziarnistej przedstawiony na rysunku 29. Wykres ten sporządzono na podstawie danych z rysunku 28, uwzględniając, że

$$\left(\frac{\bar{A}}{d\varrho}\right) = \sum_i \alpha_i \left(\frac{A}{d\varrho}\right)_i \quad (9.1)$$

gdzie: $\left(\frac{A}{d\varrho}\right)_i$ - tłumienie dla i-tej frakcji granulometrycznej,
 α_i - zawartość i-tej frakcji granulometrycznej w próbce,
 $\left(\frac{\bar{A}}{d\varrho}\right)$ - obliczone tłumienie dla próbki.



Rys. 29. Zależność obliczonego wg wzoru (9.1) względnego tłumienia od zawartości frakcji 7 - 10 mm w próbce węgla przy stałej wilgotności.

Dyskusja.

Uzyskane rezultaty badań, są zbieżne z wynikami opisanymi przez innych autorów [28, 21] w dwóch punktach:

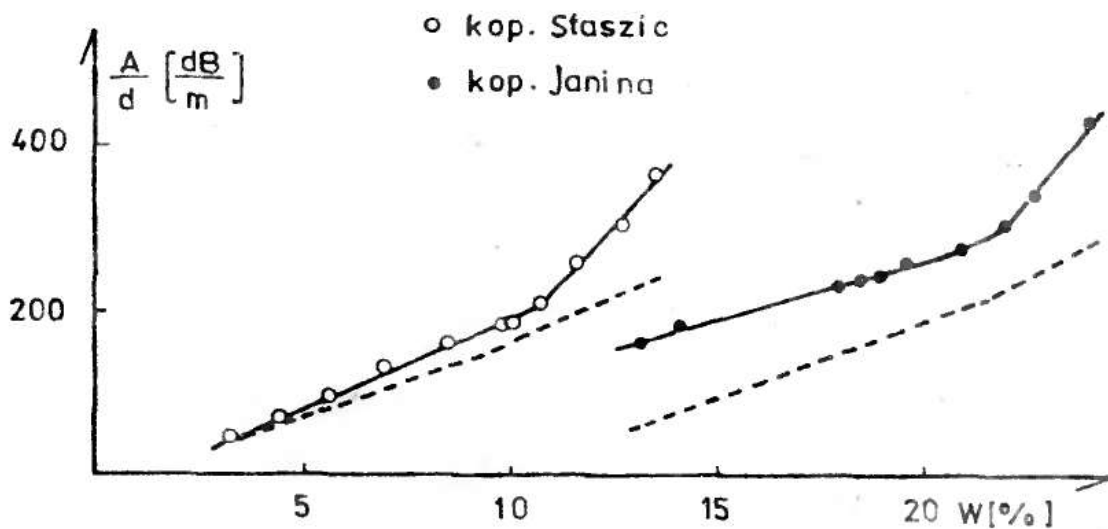
1. W miarę wzrostu wielkości ziarna wzrasta tłumienie mikrofal.
2. Dla ustalonego składu ziarnowego, zmiany składu chemicznego i zawartości substancji mineralnej mają mały wpływ na tłumienie.

Nie uzyskano jednak pełnej zgodności z twierdzeniem, że w miarę wzrostu wielkości ziarna wzrasta czułość pomiaru wilgotności [21].

Z przedstawionych w tabeli 16 danych wynika bowiem, że współczynniki kierunkowe (czułość) dla frakcji 0 - 1,2 mm i 1,2 - 3 mm nie różnią się od siebie w sposób istotny statystycznie. Dla frakcji gruboziarnistych (rys. 28), istotny wzrost współczynnika kierunkowego obserwuje się dopiero dla klasy ziarnowej powyżej 7 mm.

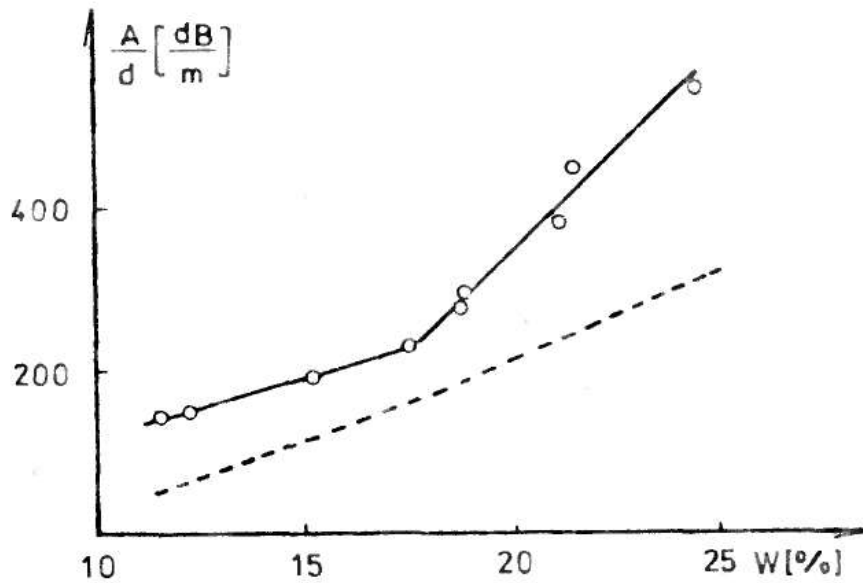
10. Porównanie wyników doświadczalnych z obliczonymi na podstawie modelu ziarnowo-warstwowego.

Na rysunkach 30 i 31 są przedstawione doświadczalne i teoretyczne zależności tłumienia mikrofal przypadającego na jednostkę grubości warstwy węgla od jego wilgotności.



Rys. 30. Teoretyczne (linie przerywane) i doświadczalne zależności $\frac{A}{d}$ od wilgotności przy $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,4 mm z kopalni Staszic i Janina. Stała tłumienia węgla powietrzno-suchego z kopalni Staszic wynosi $12,2 \text{ m}^{-1}$ ($\epsilon' = 2,410$; $\epsilon'' = 0,080$), z kopalni Janina - $18,9 \text{ m}^{-1}$ ($\epsilon' = 3,036$; $\epsilon'' = 0,329$).

Zależności teoretyczne zostały obliczone wg wzoru (4,8) przy założeniu, że stała tłumienia wody równa jest stałej tłumienia wody swobodnej $394,6 \text{ m}^{-1}$.



Rys. 31. Teoretyczne (linia przerywana) i doświadczalne zależności $\frac{A}{d}$ od wilgotności przy $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$ dla węgla o granulacji 0 - 1,2 mm z kopalni Jaworzno-Brzęczkowice. Stała tłumienia węgla powietrzno-suchego wynosi $16,7 \text{ m}^{-1}$ ($\epsilon' = 2,891$; $\epsilon'' = 0,288$).

Stałe tłumienia węgla powietrzno-suchego obliczono wstawiając do wzoru (1.7) wartości ϵ' i ϵ'' obliczone z przybliżonych zależności [33]:

$$\epsilon' = 1 + \left(\frac{c}{2\pi\gamma} \frac{\phi}{d} \right)^2$$

$$\epsilon'' = \frac{c\sqrt{\epsilon'}}{8,686\pi} \frac{A}{d}$$

przy czym ϕ i A były zmierzone przy wykorzystaniu układu pomiarowego nr 1.

W przypadku wszystkich teoretycznych zależności $\frac{A}{d}(W)$ do obliczeń brano średni promień ziarna odpowiadający danej próbce węgla.

Na rysunkach widać, że zależności teoretyczne nie są liniowe i podobnie jak w przypadku zależności doświadczalnych można je przybliżyć dwiema przecinającymi się prostymi. Jednak nachylenie krzywych teoretycznych w zakresie $W > W_{kr}$ jest znacznie mniejsze, niż w przypadku krzywych doświadczalnych.

Na rysunkach widać również, że dla wszystkich próbek obliczone teoretycznie wartości tłumienia są niższe niż wartości doświadczalne, przy tych samych wilgotnościach. Wynika to z faktu, że we wzorze (4.8) nie uwzględnia się wszystkich efektów mających wpływ na tłumienie.

11. Metody pomiaru wilgotności węgla kamiennego
w warunkach zmieniającej się gęstości objętościowej.

11.1. Metoda amplitudowo-fazowa.

W metodzie tej, opracowanej przez Kraszewskiego i Kulińskiego [32], wykorzystano fakt, że zarówno tłumienie jak i przesunięcie fazy mikrofal w materiale zależą nie tylko od wilgotności, lecz także od gęstości objętościowej tego materiału.

Zależność tę można w sposób ogólny zapisać:

$$A = F_1 \left(\frac{m_o}{V}, \frac{m_w}{V} \right) \quad (11.1)$$

$$\phi = F_2 \left(\frac{m_o}{V}, \frac{m_w}{V} \right) \quad (11.2)$$

gdzie: m_o - masa suchego materiału w próbce,
 m_w - masa wody w próbce,
 V - objętość próbki.

Rozwiązując ten układ równań ze względu na m_o i m_w oraz wstawiając otrzymane wyrażenia do wzoru na wilgotność otrzymujemy:

$$W = \frac{m_w}{m_o + m_w} = \frac{f_1(A, \phi)}{f_1(A, \phi) + f_2(A, \phi)} \quad (11.3)$$

gdzie: $f_1(A, \phi)$ i $f_2(A, \phi)$ są rozwiązaniami układu równań (11.1) i (11.2).

Autorzy metody podają, że jeżeli spełnione są następujące warunki:

1. Można założyć, że wilgotny materiał jest jednorodny.
2. Równania (11.1) i (11.2) można zapisać w postaci:

$$A = d \left(\frac{m_w}{V} a_1 + \frac{m_o}{V} a_2 \right) \quad (11.4)$$

$$\phi = d \left(\frac{m_w}{V} a_3 + \frac{m_o}{V} a_4 \right) \quad (11.5)$$

gdzie: a_1, a_2, a_3, a_4 są współczynnikami liczbowymi charakterystycznymi dla danego materiału,
 d - grubość warstwy materiału.

to otrzymuje się następujące wyrażenie na wilgotność:

$$W = \frac{a_4 A - a_2 \phi}{(a_1 - a_2) \phi - (a_3 - a_4) A} \quad (11.6)$$

Powyższe wyrażenie jest słuszne w przypadku gdy grubość warstwy materiału jest stała.

Wyniki oznaczeń wilgotności materiału metodą amplitudowo-fazową przy wykorzystaniu wzoru (11.6) są niezależne od gęstości objętościowej [32].

11.2. Wykorzystanie metody amplitudowo-fazowej do oznaczeń wilgotności węgla kamiennego.

Metoda amplitudowo-fazowa nie była dotąd stosowana do oznaczeń wilgotności węgla kamiennego. Dlatego też podjęto badania mające na celu sprawdzenie, czy dla węgla metoda ta znajduje zastosowanie.

Wyrażenie (11.6) służące do obliczania wilgotności materiału jeżeli znane jest tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal przy przechodzeniu przez próbkę, Kraszewski i Kuliński

otrzymali wykorzystując następujące założenia:

1. Przy braku próbki (tzn. $\frac{m_o}{V} = 0$ i $\frac{m_w}{V} = 0$) tłumienie i przesunięcie fazy mikrofal w materiale (piasek budowlany) jest zerowe.

2. W obecności próbki istnieje liniowa zależność tłumienia i przesunięcia fazy od $\frac{m_o}{V}$ i $\frac{m_w}{V}$ w postaci (11.4) , (11.5).

W przypadku węgla kamiennego funkcje F_1 i F_2 (równania 11.1 i 11.2) znaleziono przez dopasowanie funkcji liniowych do wyników pomiarów tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal w próbkach węgla o różnych wilgotnościach i różnych gęstościach objętościowych. Sposób wykonania pomiarów opisano w rozdziale 6.1.

Stosując metodę najmniejszych kwadratów obliczono współczynniki równań liniowych w następującej postaci:

$$\frac{A}{d} = a_1 \frac{m_w}{V} + a_2 \frac{m_o}{V} + c_1 \quad (11.7)$$

$$\frac{\Phi}{d} = a_3 \frac{m_w}{V} + a_4 \frac{m_o}{V} + c_2 \quad (11.8)$$

Współczynniki równań regresji były liczone oddzielnie dla dwóch przedziałów zmian wilgotności $W \leq W_{kr}$ i $W \geq W_{kr}$. Współczynniki równań (11.7), (11.8) obliczone dla pomiarów próbek węgla z kopalń Janina, Staszic i Jaworzno-Brzęczkowice zebrane zostały w tabeli 18 .

Rozwiązanie układu równań (11.7) i (11.8) prowadzi do następującej zależności na wilgotność węgla:

$$W = \frac{a_4 \frac{A}{d} - a_2 \frac{\Phi}{d} + (a_2 c_2 - a_4 c_1)}{\frac{A}{d} (a_4 + a_3) + \frac{\Phi}{d} (a_1 - a_2) + [c_1 (a_3 - a_4) + c_2 (a_2 - a_1)]} \quad (11.9)$$

Wartości współczynników równań regresji wielorakiej oraz ogólne współczynniki korelacji dla zależności $A(m_w, m_0)$ i $\phi(m_w, m_0)$ obliczone metodą najmniejszych kwadratów. Równania były obliczone dla próbek węgla z kopalni Staszic, Janina i Jaworzno-Brzęczkowice.

kopalnia (granulacja)	zakres zmian wilgotności	Równania regresji w postaci: $\frac{A}{d} = a_1 \frac{m_w}{V} + a_2 \frac{m_0}{V} + c_1$			Równania regresji w postaci: $\frac{\phi}{d} = a_3 \frac{m_w}{V} + a_4 \frac{m_0}{V} + c_2$			współczynnik korelacji wielorakiej
		a_1 [dBm ² /kg]	a_2 [dBm ² /kg]	c_1 [dB/m]	a_3 [rdm ² /kg]	a_4 [rdm ² /kg]	c_2 [rd/m]	
Staszic (0 - 1,4 mm)	W < W _{kr}	0,1145	0,0828	-102,146	0,1430	0,1323	-27,819	0,9790
	W > W _{kr}	-0,2593	-0,3303	-114,850	0,0662	0,0477	-28,810	0,9799
Janina (0 - 1,4 mm)	W < W _{kr}	0,1900	0,1708	-152,517	0,1316	0,1234	-27,245	0,9872
	W > W _{kr}	-0,9658	-1,0468	-241,471	-0,0173	-0,0350	-55,594	0,9930
Jaworzno- Brzęczkowice (0 - 1,2 mm)	W < W _{kr}	0,1455	0,1250	-133,915	0,1233	0,1153	-17,030	0,9882
	W > W _{kr}	-0,3877	-0,4506	-254,955	0,0440	0,0271	-63,754	0,9798

T a b e l a 19.

Wartości wilgotności próbek węgla z kopalni Janina wyznaczone metodą amplitudowo-fazową. W_0 -wartość wilgotności wyznaczona metodą suszarkową, W_1 -wartość wilgotności wyznaczona w/g (11.6) W_2 - wartość wilgotności wyznaczona w/g wzoru (11.9) .

l.p.	$\frac{A}{d}$ [dB/m]	$\frac{\Phi}{d}$ [rd/m]	W_0 [%]	W_1 [%]	W_2 [%]
1	300,0	180,6	24,0	23,3	23,9
2	341,0	179,2	24,0	23,7	24,1
3	359,0	206,4	24,0	23,8	23,9
4	231,0	166,3	22,5	21,8	22,5
5	251,0	173,6	22,5	22,1	22,6
6	271,0	188,1	22,5	22,1	22,3
7	226,0	168,0	22,0	21,6	22,2
8	234,0	171,9	22,0	21,7	22,2
9	243,0	177,3	22,0	21,7	22,1
10	214,0	163,9	20,9	17,4	19,3
11	233,0	168,0	20,9	18,2	19,8
12	233,0	174,3	20,9	18,5	18,9
13	218,0	163,3	19,5	18,5	21,7
14	228,0	168,6	19,5	19,1	21,6
15	239,0	175,2	19,5	19,6	20,7
16	213,0	166,6	19,0	16,5	16,8
17	225,0	171,7	19,0	17,6	17,8
18	235,0	176,0	19,0	18,2	17,8
19	220,0	165,8	18,4	18,1	20,4
20	233,0	173,6	18,4	18,7	19,5
21	238,0	176,2	18,4	19,1	19,5
22	214,0	167,3	18,0	16,5	16,7
23	224,0	172,1	18,0	17,3	17,1
24	234,0	177,6	18,0	17,8	17,0
25	181,0	152,3	14,1	13,8	15,0
26	187,0	155,5	14,1	14,2	15,0
27	193,0	158,4	14,1	14,7	15,2
28	153,0	141,1	13,2	11,3	12,5
29	161,0	146,2	13,2	11,7	12,1

. Wartości wilgotności obliczone przy wykorzystaniu tego wzoru dla próbek węgla z kopalni Janina podane są w tabeli 19 .

Dla porównania obliczono również wilgotności węgla wykorzystując wzór na wilgotność w postaci podanej przez Kraszewskiego i Kulińskiego.

T a b e l a 20.

Wartości współczynników a_1, a_2, a_3 i a_4 dla wzoru (11.6), obliczone dla węgla kamiennego. Grubość warstwy próbki $d = 8\text{cm}$.

kopalnia	granulacja [mm]	a_1	a_2	a_3	a_4	zakres wilgotności
Staszic	0-1,4	0,00023	-0,02872	0,11189	0,10196	$W < W_{kr}$
		-0,44674	-0,52029	0,01915	-0,00003	$W > W_{kr}$
Janina	0-1,4	0,02536	0,00862	0,10219	0,09441	$W < W_{kr}$
		-1,26561	-1,34460	-0,08632	-0,10358	$W > W_{kr}$
Jaworzno-Brzeczkwice	0-1,2	0,00859	-0,00928	0,10590	0,09822	$W < W_{kr}$
		-0,68197	-0,74138	-0,02960	-0,04557	$W > W_{kr}$

W tym celu obliczono współczynniki równań regresji wielorakiej dla zależności $\frac{A}{d} \left(\frac{m_o}{V}, \frac{m_w}{V} \right)$ i $\frac{\phi}{d} \left(\frac{m_o}{V}, \frac{m_w}{V} \right)$ w postaci (11.4) i (11.5). Obliczone w ten sposób wartości współczynników a_1, a_2, a_3 i a_4 zebrane są w tabeli 20 .

Natomiast obliczone ze wzoru (11.6) wartości wilgotności przedstawiono w tabeli 19 .

W tabeli 21 podano średnie odchylenia standardowe błędów oznaczeń wilgotności przy wykorzystaniu wzoru (11.6) i (11.9) . Z danych przedstawionych w tej tablicy widać,

że błędy oznaczeń wilgotności w przypadku stosowania wzoru (11.9), są mniejsze niż w przypadku stosowania wzoru (11.6), z jednym tylko wyjątkiem - kopalnia Janina, $W < W_{kr}$.

T a b e l a _____ 21 .

Średnie odchylenia standardowe błędów oznaczeń wilgotności metodą jednoczesnego pomiaru tłumienia i przesunięcia fazy mikrofal.

s_1 - odchylenie standardowe przy stosowaniu wzoru (11.6),
podanego przez A. Kraszewskiego i S. Kulińskiego,

s_2 - odchylenie standardowe przy stosowaniu wzoru podanego
przez autora niniejszej pracy.

kopalnia	zakres wilgotności	s_1 [% H ₂ O]	s_2 [% H ₂ O]
Staszic	$W < W_{kr}$	0,532	0,475
	$W > W_{kr}$	0,347	0,344
Janina	$W < W_{kr}$	1,588	1,788
	$W > W_{kr}$	0,400	0,159
Jaworzno- Brzęczkowice	$W < W_{kr}$	1,445	0,975
	$W > W_{kr}$	0,804	0,644

Wniosek.

Jak widać z danych zawartych w tablicach 18 i 20, współczynniki liczbowe występujące we wzorach (11.6) i (11.9) mają różne wartości w zależności od tego, z jakiej kopalni pochodzi węgiel, oraz od tego czy wyznaczana wilgotność jest mniejsza czy większa od krytycznej.

Fakt ten stwarza wiele niedogodności w stosowaniu metody amplitudowo-fazowej do oznaczania wilgotności węgla ponieważ:

- konieczna jest znajomość wartości wilgotności krytycznej,
- należy stosować różne wzory do obliczania wilgotności w różnych jej zakresach zmian.
- przed wyznaczeniem wilgotności próbki węgla należało by przewidzieć czy jej wartość jest mniejsza, czy większa od krytycznej.

Mimo tych niedogodności metoda amplitudowo-fazowa pozwala na wyznaczenie wilgotności próbki węgla w sposób niezależny od zmian gęstości objętościowej, pod warunkiem, że grubość warstwy jest stała.

Do wyznaczenia wilgotności można stosować wzór w postaci (11.6) lub (11.9) , z tym, że lepsze dokładności uzyskuje się przy stosowaniu wzoru (11.9).

12. Metoda mikrofalowo - radiometryczna.

Jak wiadomo z przeglądu literatury, oraz z rozdziału 8 pracy, wyniki oznaczeń wilgotności węgla kamiennego metodą mikrofalową przy wykorzystaniu krzywych wzorcowania $A(W)$, są zależne od gęstości objętościowej warstwy węgla oraz od jej grubości.

Zachowanie stałej grubości warstwy węgla podczas pomiarów wilgotności w warunkach laboratoryjnych nie jest trudne. Natomiast zachowanie stałej gęstości objętościowej węgla w trakcie pomiarów jest trudne do zrealizowania, bowiem gęstość objętościowa węgla zależy od wielu czynników między innymi od jego wilgotności i sposobu nasypywania próbki do naczynia pomiarowego.

Udowodniono w rozdziale 8.2, że znaczne zmniejszenie wpływu zmian gęstości objętościowej na wyniki oznaczeń węgla kamiennego uzyskuje się stosując jako krzywą wzorcowania zależność względnego tłumienia mikrofal od wilgotności $\frac{A}{d \cdot g}(W)$.

Jednak sposób ten wymaga każdorazowego pomiaru gęstości objętościowej próbki węgla, której wilgotność jest oznaczana. Jest to łatwe do realizacji w warunkach laboratoryjnych. Natomiast w warunkach przemysłowych, gdy węgiel przenoszony jest na taśmociągu, pomiar jego gęstości objętościowej w sposób ciągły jest trudny.

Dlatego, w celu oznaczania wilgotności węgla kamiennego w sposób niezależny od jego gęstości objętościowej oraz grubości jego warstwy zaproponowano w tej pracy metodę polegającą na jednoczesnym pomiarze tłumienia fal elektromagnetycznych o częstotliwości 9,4 GHz i względnego osłabienia natężenia promieniowania gamma w węglu kamiennym.

Wychodząc ze znanego prawa osłabienia monoenergetycznej wiązki promieniowania gamma przechodzącej przez warstwę materiału o grubości d i gęstości ρ :

$$J = J_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho} d \rho\right)}$$

gdzie: J - natężenie promieniowania gamma po przejściu przez warstwę materii o grubości d i gęstości ρ ,

J_0 - natężenie promieniowania padającego na warstwę,

$\frac{\mu}{\rho}$ - masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma,

otrzymujemy:

$$d \cdot \rho = \frac{\ln \frac{J_0}{J}}{\frac{\mu}{\rho}}$$

A więc tłumienie mikrofal wprowadzone przez jednostkę grubości warstwy i jednostkę gęstości objętościowej można zapisać:

$$\frac{A}{d \cdot \rho} = \frac{A \frac{\mu}{\rho}}{\ln \frac{J_0}{J}}$$

Jeśli masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma dla węgla kamiennego nie zależy od jego wilgotności, to dla danego typu węgla można zapisać:

$$\frac{A}{d \cdot \rho} \sim \frac{A}{\ln \frac{J_0}{J}}$$

Można wtedy krzywą wzorcowania mikrofalowego miernika wilgotności sporządzić w układzie współrzędnych $\left(\frac{A}{\ln \frac{J_0}{J}}, W \right)$.

Ciągła metoda oznaczania wilgotności węgla polegałaby na jednoczesnym pomiarze tłumienia mikrofal i względnego osłabienia promieniowania gamma przechodzących przez warstwę węgla. Nie byłoby wtedy konieczne ustalanie grubości warstwy węgla ani jego gęstości objętościowej. Metoda ta będzie w dalszej części pracy nazywana metodą mikrofalowo-radiometryczną.

13. Pomiar gęstości powierzchniowej węgla
metoda osłabienia promieniowania gamma.

Warunkiem, który pozwala na zastosowanie metody mikrofalowo-radiometrycznej do oznaczeń wilgotności węgla kamiennego jest znajomość zależności współczynników osłabienia promieniowania gamma od zawartości w nim wody.

W tym rozdziale podano wyniki badań nad wpływem wilgotności węgla na masowe współczynniki osłabienia promieniowania gamma.

13.1 Pomiary masowych współczynników
osłabienia promieniowania gamma.

W celu znalezienia masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma przeprowadzono pomiary względnego osłabienia promieniowania gamma $\frac{I_0}{I}$ przechodzącego przez próbki węgla o zmieniającej się gęstości powierzchniowej $\rho \cdot d$. Pomiary przeprowadzono przy wykorzystaniu układu pomiarowego nr 3 w sposób opisany w rozdziale 6.2 .

Wykorzystując wyniki przeprowadzonych pomiarów obliczono metodą najmniejszych kwadratów współczynniki kierunkowe równań:

$$\ln \frac{I_0}{I} = a \cdot \rho \cdot d$$

będące masowymi współczynnikami osłabienia promieniowania gamma.

Znalezione w ten sposób masowe współczynniki osłabienia promieniowania gamma zostały zebrane w tabelach 22 - 24 .

W tabelach tych podano również 95-procentowe przedziały ufności tych współczynników, które przyjęto jako miarę błędów wyznaczenia.

czenia masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma.

T a b e l a 22.

Wartości masowych współczynników osłabienia $\frac{\mu}{\rho}$ promieniowania gamma źródła ^{60}Co , zmierzone dla próbek węgla o różnych wilgotnościach z kopalni Piast.

l.p.	granulacja [mm]	W[%]	$\frac{\mu}{\rho}$ [m ² /kg] $\times 10^{-2}$	95 % przedział ufności [m ² /kg] $\times 10^{-2}$
1	0 - 20	11,8	0,5404	0,0258
2		11,2	0,5316	0,0722
3		10,9	0,5447	0,0658
4		8,5	0,5301	0,0616
5		8,4	0,5509	0,0541
6		8,3	0,5193	0,0605
7		7,6	0,5198	0,0339
1	0 - 3	17,0	0,5214	0,0422
2		15,6	0,5267	0,0341
3		14,5	0,5226	0,0289
4		13,2	0,5167	0,0193
5		12,3	0,5355	0,0555
6		11,6	0,5191	0,0219
7		10,7	0,5284	0,0872
8		8,8	0,5238	0,0271
9		8,7	0,4916	0,0353
10		0,0	0,5241	0,0619

T a b e l a ----- 23.

Masowe współczynniki osłabienia $\frac{\mu}{\rho}$ promieniowania gamma źródła ^{60}Co , zmierzone dla próbek węgla o różnych wilgotnościach z kopalni Staszic.

l.p.	granulacja [mm]	W [%]	$\frac{\mu}{\rho}$ [m ² /kg] $\times 10^{-2}$	95 % [m ² /kg] $\times 10^{-2}$ przedział ufności
1	0 - 20	10,0	0,5362	0,0340
2		9,4	0,5172	0,0252
3		9,3	0,5356	0,1126
4		8,9	0,5508	0,1086
5		8,2	0,5062	0,0208
6		7,2	0,5225	0,0307
7		5,9	0,5140	0,0303
1	0 - 1,4	13,0	0,5059	0,0300
2		12,5	0,5126	0,0144
3		8,9	0,5109	0,0161
4		6,7	0,5006	0,0141
5		6,2	0,5218	0,0225

T a b e l a24.

Masowe współczynniki osłabienia $\frac{\mu}{\rho}$ promieniowania gamma źródła ^{60}Co zmierzone dla próbek węgla o różnych wilgotnościach z kopalni Anna. Granulacja 0 - 3 mm .

l.p.	produkt wzbogacania	W[%]	$\frac{\mu}{\rho}$ [m ² /kg] $\times 10^{-2}$	95 % przedział ufności [m ² /kg] $\times 10^{-2}$
1	NADAWA	12,8	0,5376	0,0738
2		11,5	0,4757	0,0397
3		10,3	0,5154	0,0960
4		7,9	0,4884	0,0425
5		6,6	0,5072	0,0547
6		5,4	0,5263	0,0266
7		4,2	0,4906	0,0364
1	KONCENTRAT	11,4	0,5487	0,0553
2		9,2	0,5776	0,0591
3		7,9	0,5096	0,0378
4		6,9	0,5058	0,0319
5		5,2	0,4805	0,0813
6		4,5	0,4877	0,0400
7		3,8	0,4942	0,0253
8		2,9	0,5155	0,0175
1	PRZEROST	16,1	0,4818	0,0644
2		14,6	0,4770	0,0911
3		13,5	0,5020	0,0477
4		11,4	0,4776	0,0405
5		9,8	0,4923	0,0466
6		6,7	0,5254	0,0422
7		4,8	0,5254	0,0228

13.2. Dyskusja wyników i wnioski.

W skład węgla kamiennego wchodzi takie pierwiastki jak: C, Al, Si, O, K, Ca, Mg, Fe, S, Na, N. W celu oszacowania teoretycznej wartości $\frac{\mu}{\rho}$ dla węgla kamiennego, skorzystano ze znanych wzorów na wartość masowego współczynnika osłabienia promieniowania gamma substancji wieloskładnikowych.

Jeżeli potraktujemy węgiel jako mieszaninę wyżej wymienionych pierwiastków i wody, to masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma dla węgla kamiennego można zapisać:

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \alpha_i \quad (13.1)$$

gdzie: $\frac{\mu}{\rho}$ - masowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma dla węgla kamiennego.

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ - masowy współczynnik osłabienia i-tego składnika węgla kamiennego.

α_i - wagowy udział i-tego składnika.

Wartości masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co dla pierwiastków wchodzących w skład węgla kamiennego podane są w tabeli 25. Tabelę sporządzono na podstawie danych zawartych w monografii O.I. Lejpunskiego i in. [38]. Ponieważ współczynniki dla pierwiastków wchodzących w skład węgla niewiele różnią się między sobą, co widoczne jest z danych przedstawionych w tabeli 25, można więc węgiel rozpatrywać jako mieszaninę wody i "suchej części" o prawie stałym współczynniku osłabienia $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_S$. Można więc wyrażenie (13.1) zapisać w postaci:

$$\frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_S \cdot (1 - W) + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{H}_2\text{O}} \cdot W \quad (13.2)$$

gdzie: $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_S$ - masowy współczynnik osłabienia dla suchego

węgla

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{H_2O}$ - masowy współczynnik osłabienia dla wody.

W - zawartość wody w węglu.

T a b e l a 25.

Wartości masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co według O.I. Lejpuskiego i in. [38].

symbol pierwiastka	$[m^2/kg] \times 10^{-2}$
C	0,5770
O	0,5770
Na	0,5520
Mg	0,5695
Al	0,5570
Si	0,5760
S	0,5770
K	0,5615
Ca	0,5760
Fe	0,5400
N	0,5760
H ₂ O	0,6405

Przekształcając wyrażenie (13.2) otrzymujemy:

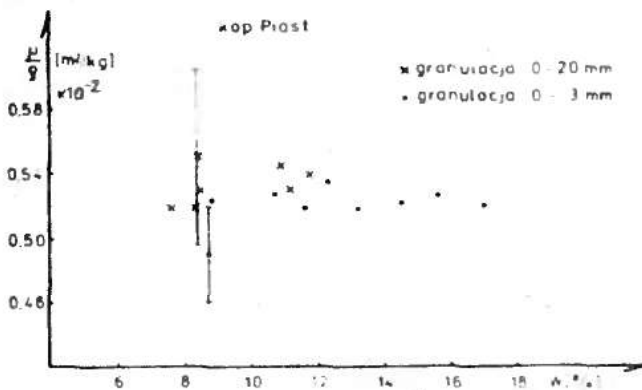
$$\Delta \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \Delta W \left[\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{H_2O} - \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_S \right] \quad (13.3)$$

gdzie $\Delta \left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ jest zmianą wartości masowego współczynnika osłabienia promieniowania gamma spowodowaną zmianą wilgotności węgla o ΔW . Wstawiając do ostatniego wyrażenia wartość $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ znalezioną z pomiarów (tabela 22), oraz $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{H_2O}$

(tabela 25) , otrzymujemy:

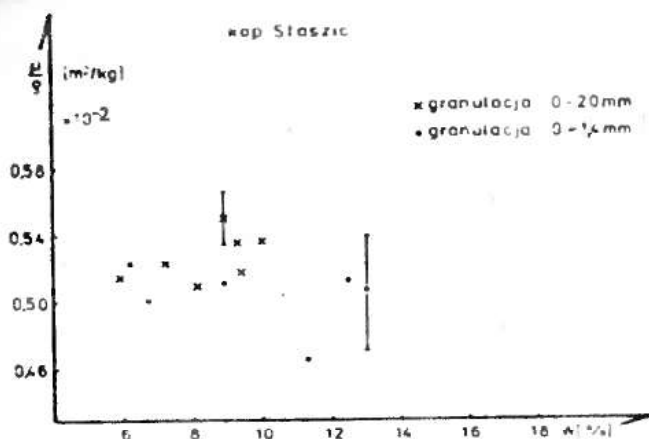
$$\Delta\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = 0,1164 \cdot 10^{-2} \Delta W \quad [\text{m}^2/\text{kg}]$$

Oznacza to, że zmiana wilgotności węgla o 1% powoduje zmianę masowego współczynnika osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co o $\Delta\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = 0,001164 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{kg}$. Wartość ta jest o rząd wielkości mniejsza od błędu masowego współczynnika osłabienia promieniowania gamma wyznaczonego doświadczalnie (tabele 22 - 24) . Można więc wnioskować, że praktycznie wpływ wilgotności węgla na jego współczynnik osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co jest do zaniedbania.

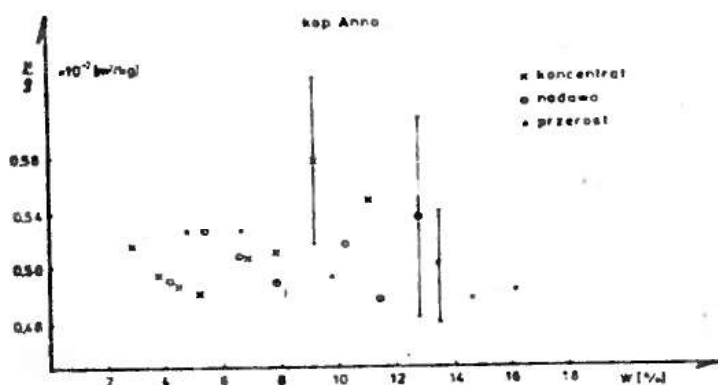


Rys.32. Zależność masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co dla węgla z kopalni Piast od jego wilgotności.

Wniosek ten potwierdzają wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawione na rysunkach 32 - 34 . Widać z tych rysunków, że masowe współczynniki osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co dla węgla nie zależą od jego wilgotności w granicach błędu pomiarowego.



Rys. 33. Zależność masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co dla węgla z kopalni Staszic od jego wilgotności.



Rys. 34. Zależność masowych współczynników osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co dla węgla z kopalni Anna od jego wilgotności.

Wniosek.

Z przeprowadzonych badań wynika, że pomiar gęstości powierzchniowej węgla kamiennego metodą osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co jest w granicach błędów pomiaru niezależny od jego wilgotności.

14. Zastosowanie metody mikrofalowo - radiometrycznej do oznaczeń wilgotności węgla kamiennego.

W metodzie mikrofalowo - radiometrycznej wykorzystano możliwość wyznaczania gęstości powierzchniowej węgla w sposób niezależny od jego wilgotności przez pomiar względnego osłabienia promieniowania gamma źródła ^{60}Co .

Metoda mikrofalowo-radiometryczna polega na jednoczesnym pomiarze tłumienia mikrofal oraz względnego osłabienia natężenia promieniowania gamma źródła ^{60}Co w próbce węgla. Jako krzywą wzorcowania wykorzystano zależność stosunku tłumienia mikrofal do logarytmu naturalnego ze względnego osłabienia promieniowania gamma od wilgotności $\frac{A}{\ln J_0/J}(W)$.

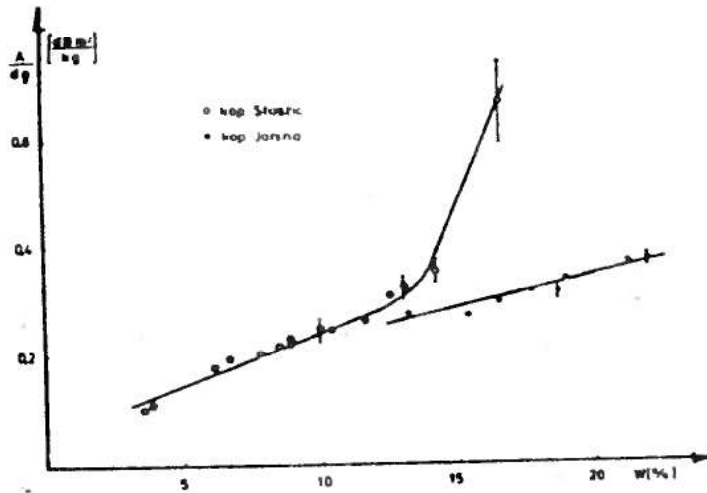
Do badań nad zastosowaniem tej metody do oznaczania wilgotności węgla, wykorzystano laboratoryjny miernik tłumienia mikrofal opisany w rozdziale 5.2, oraz układ do pomiaru gęstości powierzchniowej opisany w rozdziale 5.3.

Umieszczając próbkę węgla pomiędzy antenami układu pomiarowego nr 2, a następnie pomiędzy źródłem promieniowania gamma i detektorem w układzie nr 3, otrzymano krzywe wzorcowania w układzie współrzędnych $\left(\frac{A}{\ln(J_0/J)}, W\right)$ oraz $\left(\frac{A}{d \cdot \rho}, W\right)$, to znaczy dla metody mikrofalowo - radiometrycznej i mikrofalowej. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowej były sporządzone w celu porównania dokładności obu metod.

14.1. Krzywe wzorcowania przy stałej grubości warstwy węgla.

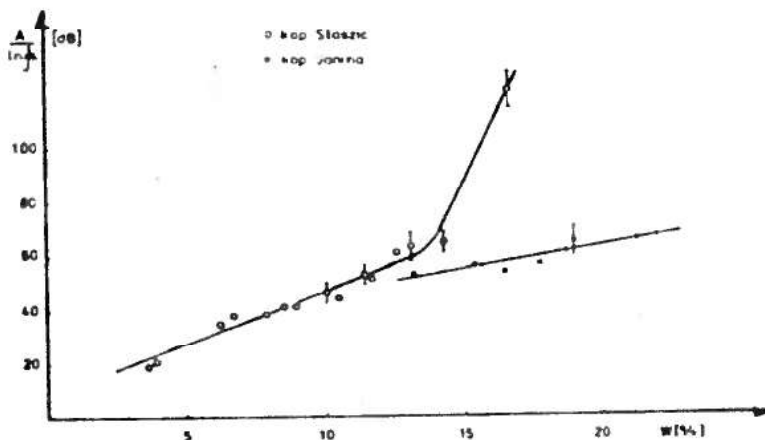
Na rysunku 35 przedstawiono krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowej, sporządzone dla próbek węgla o granula-

cji 0 - 1,4 mm.

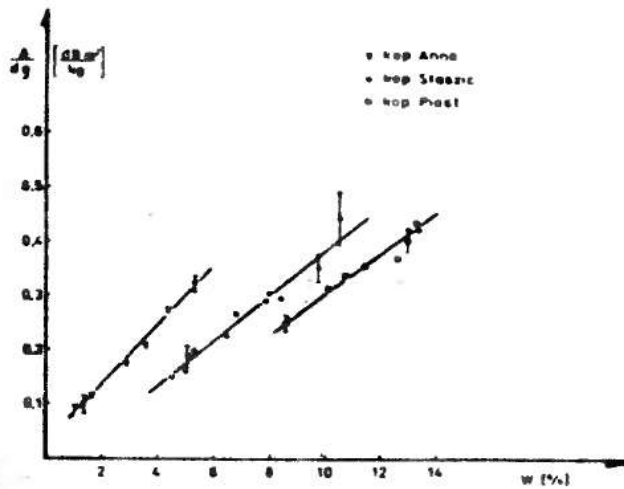


Rys.35. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowej dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,4 mm. Próbi pochodziły z kopalni Janina i Staszic.

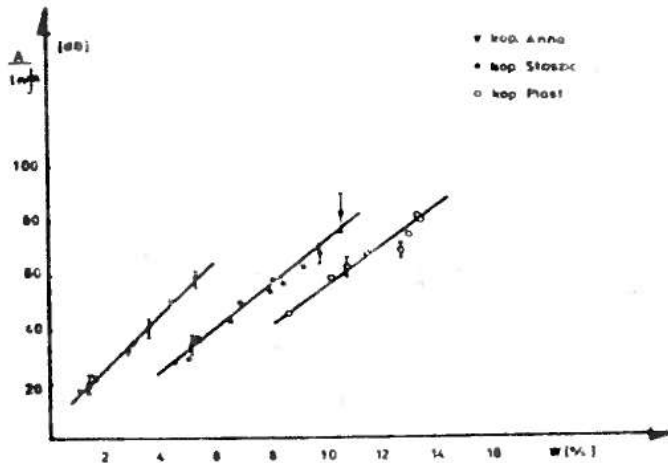
Rysunek 36 przedstawia krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo - radiometrycznej sporządzone dla tych samych próbek węgla.



Rys.36. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo - radiometrycznej dla próbek węgla o granulacji 0 - 1,4 mm. Próbkę pochodziły z kopalni Janina i Staszic.



Rys.37. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowej, dla próbek węgla o granulacji 0 - 20 mm.



Rys.38. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo-radiometrycznej, dla próbek węgla o granulacji 0 - 20 mm.

Krzywe wzorcowania dla obu metod sporządzone dla węgla o wielkości ziarna 0 - 20 mm przedstawione zostały na rysunkach 37 i 38. Wszystkie te krzywe sporządzone były przy zmieniającej się gęstości objętościowej lecz przy stałej grubości warstwy ($d = 12,5 \text{ cm}$).

Obliczone równania regresji liniowej, dla krzywych wzorcowania przedstawionych na rysunkach 35 , 36 , 37 i 38 podano w tabelach 26 i 27 . W tabelach tych podano również wartości współczynników korelacji i reszkowych odchyień standardowych zmiennych niezależnych.

T a b e l a ----- 26.

Równania krzywych wzorcowania dla metody mikrofalowej $\frac{A}{d \cdot g}$ (W), obliczone metodą najmniejszych kwadratów dla próbek węgla z kopalni Janina, Staszic, Piast i Anna.

kopalnia	granulacja [mm]	w-nik kierunkowy [dBm ² /kg%]	wyraz wolny [dBm ² /kg]	w-nik korelacji	reszkowe odchylenie standardowe [% H ₂ O]
Anna	0 - 20	0,0522	0,0291	0,9827	0,27
Piast	0 - 20	0,0386	-0,0830	0,9618	0,47
Janina	0 -1,4	0,0120	0,1090	0,9675	0,74
Staszic	0 - 20	0,0426	-0,0412	0,9768	0,43
Staszic W < W _{kr}	0, -1,4	0,0218	0,0323	0,9854	0,50
Staszic W > W _{kr}	0 -1,4	0,1354	-1,5700	0,9623	0,34

Stosując test F [53] porównano reszkowe odchylenia standardowe obliczone dla obu metod i stwierdzono, że nie różnią się one na poziomie istotności statystycznej 0,05. Nie zauważa się też istotnych różnic pomiędzy współczynnikami korelacji krzywych wzorcowania dla obu metod.

T a b e l a 27.

Równania krzywych wzorcowania dla metody mikrofalowo-radiometrycznej $\frac{A}{\ln J_0/J} (W)$ obliczone metodą najmniejszych kwadratów dla próbek węgla z kopalni Janina, Staszic, Piast i Anna.

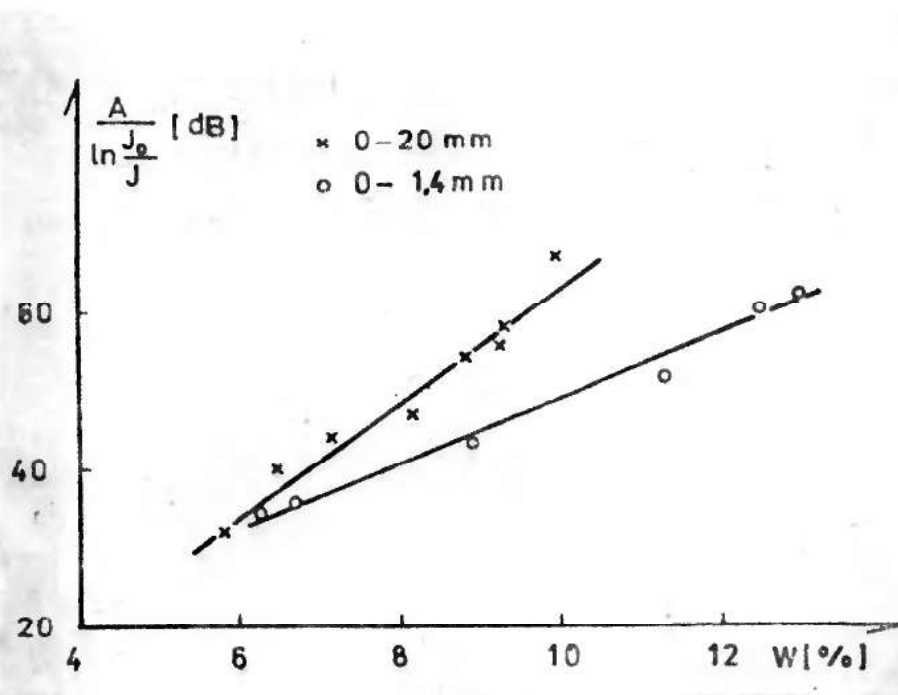
kopalnia	granulacja [mm]	w-nik kierunkowy [dB/%]	wyraz wolny [dB]	w-nik korelacji	resztkowe odchylenie standardowe [% H ₂ O]
Anna	0 - 20	9,508	5,746	0,9859	0,24
Piast	0 - 20	7,462	-18,592	0,9588	0,48
Janina	0 -1,4	1,708	30,152	0,9127	1,20
Staszic	0 - 20	8,245	-9,270	0,9833	0,37
Staszic $W < W_{kr}$	0 -1,4	4,290	5,118	0,9766	0,63
Staszic $W > W_{kr}$	0 -1,4	24,260	-278,84	0,9879	0,20

Wynika stąd, że krzywe wzorcowania metody mikrofalowo-radiometrycznej, zostały sporządzone z dokładnością nie gorszą niż krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowej.

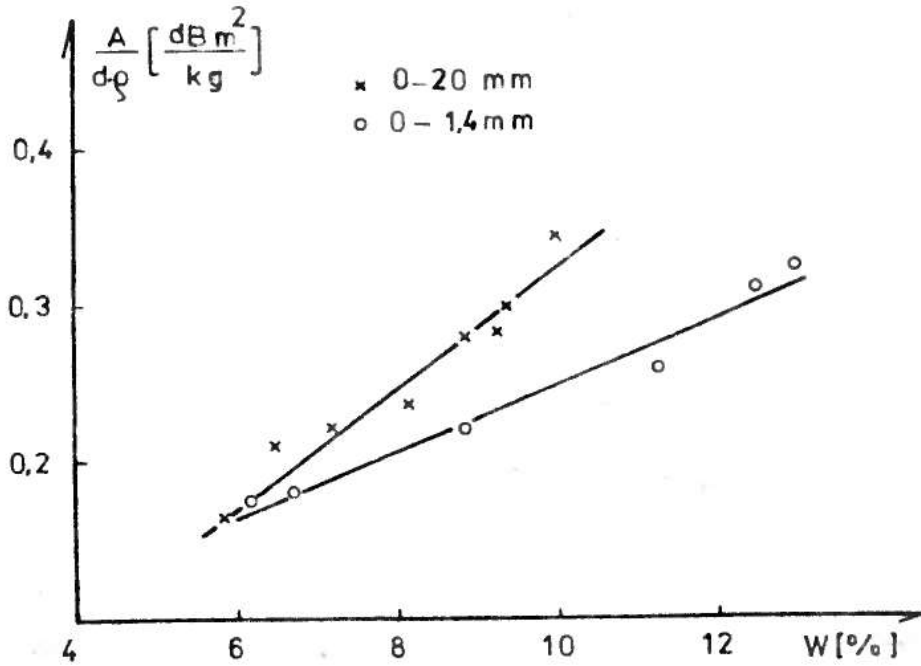
14.2. Krzywe wzorcowania przy zmieniającej się gęstości objętościowej i grubości warstwy węgla.

Na rysunkach 39 - 42 przedstawiono krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo-radiometrycznej i mikrofalowej przy zmiennej grubości warstwy węgla. Każdy punkt na rysunkach

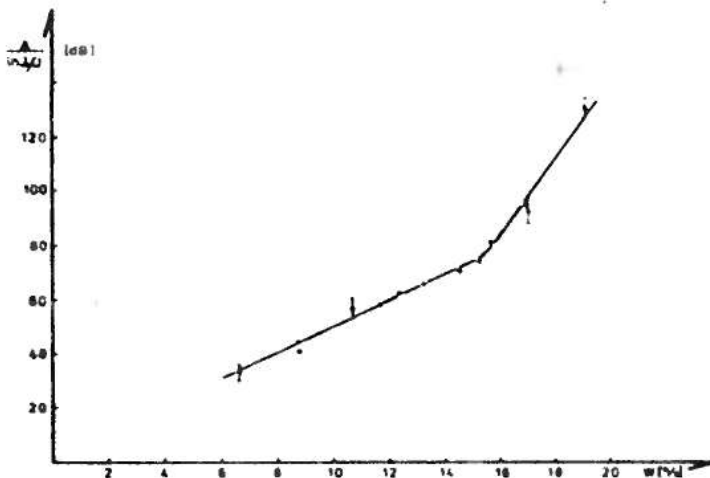
39 i 40 odpowiada średniej wartości z pomiarów wykonywanych przy zmieniających się gęstościach objętościowych próbek, oraz przy czterech różnych grubościach warstwy 4,5 ; 8,5 ; 10,5 i 12,5 cm , natomiast na rysunkach 41 i 42 (kop. Piast) - średniej wartości z pomiarów wykonywanych przy grubościach warstwy 4,5 i 8,5 cm.



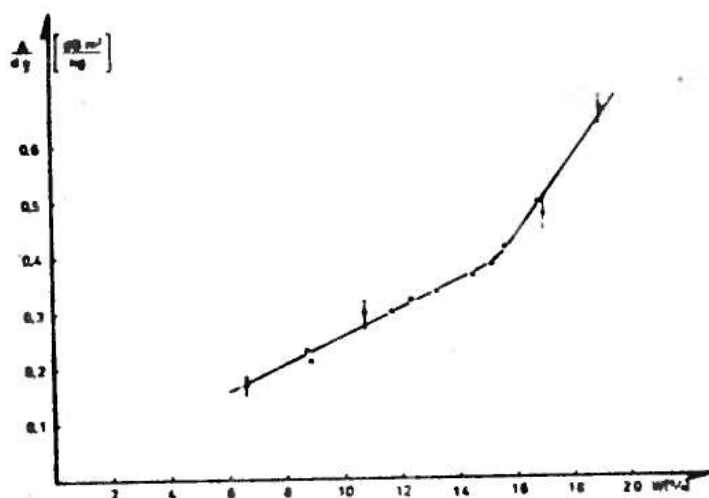
Rys. 39. Krzywe wzorcowania metody mikrofalowo-radiometrycznej dla węgla z kopalni Staszic. Każdy punkt na wykresie odpowiada średniej wartości $\frac{A}{\ln J_0/J}$ z pomiarów wykonanych przy czterech różnych grubościach warstwy węgla: 4,5 cm, 8,5 cm, 10,5 cm i 12,5 cm.



Rys. 40. Krzywe wzorcowania metody mikrofalowej dla węgla z kopalni Staszic. Każdy punkt na wykresie odpowiada średniej wartości $\frac{A}{d \cdot g}$ z pomiarów wykonywanych przy czterech różnych grubościach warstwy węgla: 4,5 cm, 8,5 cm, 10,5 cm i 12,5 cm.



Rys. 41. Krzywa wzorcowania metody mikrofalowo-radiometrycznej dla węgla o granulacji 0 - 3 mm z kopalni Piast. Punkty na wykresie są średnimi wartościami $\frac{A}{\ln J_0/J}$ z pomiarów przy dwóch różnych grubościach warstwy 4,5 i 8,5 cm.



Rys. 42. Krzywa wzorcowania metody mikrofalowej dla węgla o granulacji 0 - 3 mm z kopalni Piast. Punkty na wykresie są średnimi wartościami $\frac{A}{d \cdot g}$ z pomiarów wykonywanych przy dwóch różnych grubościach warstwy: 4,5 i 8,5 cm.

Mniejszy zakres zmian grubości warstwy węgla z kopalni Piast jest związany z tym, że próbki te były silnie zawilgoczone co powodowało, że przy grubszych warstwach tłumienie mikrofal było zbyt duże i przekraczało zakres pomiarowy miernika.

Równania opisujące poszczególne krzywe wzorcowania podane są w tabeli 28.

Porównując resztkowe odchylenia standardowe zmiennej niezależnej obliczone dla krzywych wzorcowania obu metod można stwierdzić, że nie różnią się one na poziomie istotności statystycznej 0,05. Można więc wnioskować, że krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo-radiometrycznej zostały sporządzone z dokładnością nie gorszą niż dla metody mikrofalowej.

Wpływ zmian grubości warstwy węgla na wyniki oznaczeń wilgotności obydwoma metodami można prześledzić na rysunkach

T a b e l a 28.

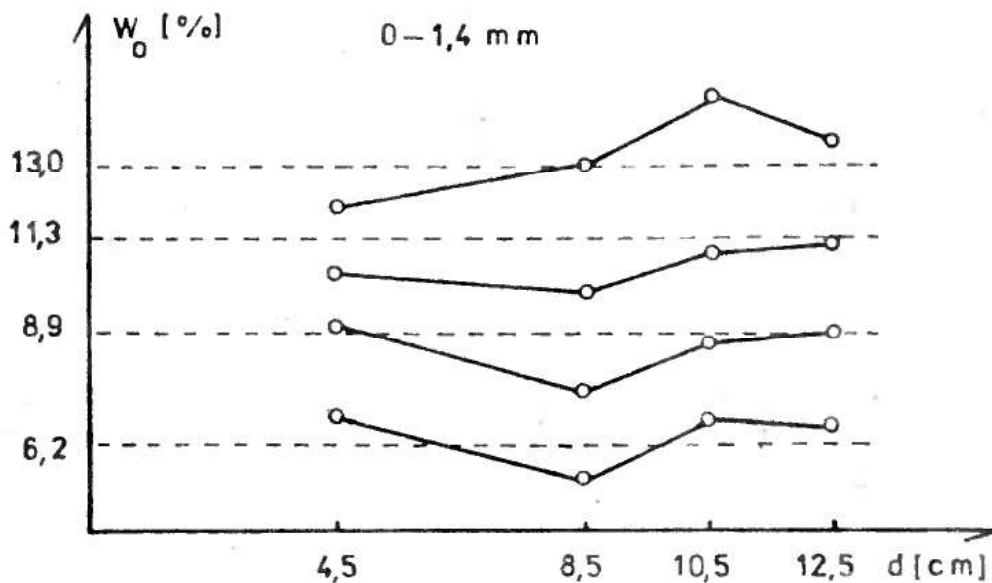
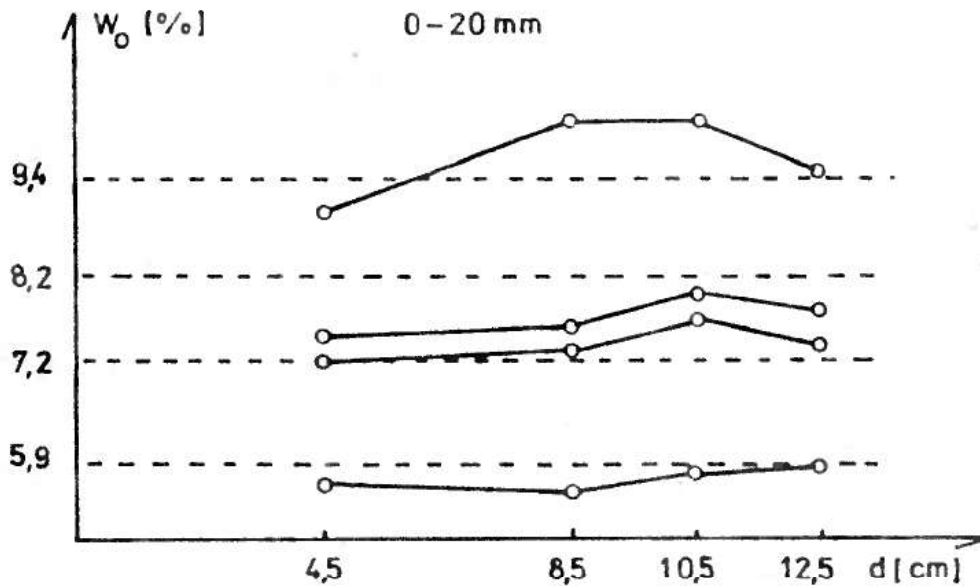
Równania krzywych wzorcowania dla metody mikrofalowej i mikrofalowo radiometrycznej. Krzywe zostały sporządzone dla zmieniającej się grubości warstwy węgla.

$s(W)$ - reszkowe odchylenie standardowe zmiennej W przyjęte jako miara błędu metody.

postać równania: $\frac{A}{d \cdot g} = bW + a$; r - współczynnik korelacji					
kopalnia	granulacja [mm]	b	a	$s(W)$	r
Staszic	0 - 1,4	0,0216	0,034	0,54	0,9831
Staszic	0 - 20	0,0368	-0,045	0,33	0,9758
Piast $W < W_{kr}$	0 - 3	0,0253	0,006	0,42	0,9891
Piast $W > W_{kr}$	0 - 3	0,0731	-0,732	0,28	0,9794
postać równania: $\frac{A}{\ln J_0/J} = bW + a$; r - jak wyżej					
kopalnia	granulacja [mm]	b	a	$s(W)$	r
Staszic	0 - 1,4	4,041	8,287	0,46	0,9879
Staszic	0 - 20	7,255	-9,808	0,34	0,9741
Piast $W < W_{kr}$	0 - 3	4,876	1,671	0,40	0,9900
Piast $W > W_{kr}$	0 - 3	14,359	-144,837	0,27	0,9806

Na rysunkach tych, na osi rzędnych odłożono rzeczywiste wartości wilgotności próbek węgla z kopalni Staszic.

Punkty odpowiadają wartościom wilgotności oznaczonym metodą mikrofalowo-radiometryczną dla próbek o różnych grubościach warsty węgla, przy wykorzystaniu wspólnej dla wszystkich grubości krzywej wzorcowania (rysunek 41 , tabela 28) .



Rys. 43. Zależność oznaczeń wilgotności węgla z kopalni Staszic metodą mikrofalowo-radiometryczną od grubości warstwy dla dwóch różnych granulacji.

Odchylenia punktów od przerywanej linii są miarą błędów, jaki popełniany jest przy stosowaniu wspólnej krzywej wzorcowania dla różnych grubości warstw węgla. Jak widać z rysunków brak jest systematycznej zależności wielkości tych błędów od grubości warstwy. Można wyciągnąć stąd wniosek, że wyniki oznaczeń wilgotności metodą mikrofalowo-radiometryczną nie zależą od zmian grubości warstwy węgla.

Wnioski.

1. Krzywe wzorcowania dla metody mikrofalowo-radiometrycznej są nie mniej dokładne niż dla laboratoryjnej metody mikrofalowej.
2. Przy stałej grubości warstwy węgla dokładność krzywych wzorcowania metody mikrofalowo-radiometrycznej dla węgla o granulacji 0 - 20 mm wynosi:
od 0,24 % (kop. Anna) do 0,48 % (kop. Piast),
natomiast dla węgla mielonego o granulacji 0 - 1,4 mm od 0,20 % (kop. Staszic) do 1,20 % (kop. Janina).
3. Przy zmieniającej się grubości warstwy węgla dokładność krzywych wzorcowania metody mikrofalowo-radiometrycznej jest nie gorsza niż 0,46 %.
4. Stosowanie metody mikrofalowo-radiometrycznej nie wymaga każdorazowego pomiaru lub ustalania gęstości objętościowej i grubości warstwy węgla.
Stwarza to możliwość zastosowania tej metody do ciągłego oznaczania wilgotności węgla przenoszonego na taśmociąg.

15. Dyskusja i wnioski.

W pracy przedstawiono metodę pomiaru zawartości wilgoci w węglu kamiennym, polegającą na równoczesnym pomiarze gęstości powierzchniowej próbki metodą osłabienia natężenia promieniowania gamma i tłumienia mikrofal o częstotliwości 9,4 GHz.

Metoda ta pozwala na pomiar zawartości wilgoci przy zmianach grubości warstwy węgla od 4,5 do 12,5 cm i gęstości objętościowej w zakresie 500 - 900 kg/m³. Rezultat ten osiągnięto na podstawie badań tłumienia mikrofal w węglach o granulacji do 20 mm, z różnych kopalń Zagłębia Górnośląskiego, jak również na podstawie opracowanej teorii tłumienia (wzór na stałą tłumienia dla niejednorodnych ośrodków ziarnistych).

Wyniki badań teoretycznych pozwoliły na uzyskanie interpretacji efektów związanych z wpływem gęstości objętościowej na tłumienie. Nie są one jednak wystarczające dla interpretacji wpływu pozostałych czynników jak zmiana wielkości ziarna, czy też własności fizyko-chemiczne powierzchni ziarna węgla. Dla pełnego opisu zjawisk związanych ze zmianą wielkości ziarna należałoby uwzględnić jeszcze rozproszenie rejlejowskie oraz odbicie mikrofal na granicy węgiel - woda i woda - powietrze. Ilościowe oszacowanie tych efektów wymaga znajomości odpowiednich przenikalności elektrycznych. Jednak w przypadku ośrodków niejednorodnych dokładne ich wartości nie są znane. Uwzględnienie efektów rozproszenia i odbicia pozwala w sposób jakościowy zinterpretować wpływ wielkości ziarna i wilgotności na tłumienie mikrofal. Dla ziaren mniejszych od długości fali stała ekstynkcji jest proporcjonalna do trzeciej potęgi

promienia ziarna:

$$\alpha_R = k^* r^3$$

gdzie k^* jest stałą zależną od długości fali i własności dielektrycznych ośrodka.

Z tego wzoru wynika, że w zakresie małych ziaren wzrost rozproszenia rejlejowskiego ze wzrostem r może kompensować zmniejszenie się stałej tłumienia.

W zakresie dużych ziaren o promieniu porównywalnym z długością fali można oczekiwać wpływu odbić. Współczynnik odbicia mikrofal na granicy woda - węgiel można w przybliżeniu opisać wzorem

$$R = \frac{r_{12} (1 - e^{-2\delta 2r})}{1 - r_{12}^2 e^{-2\delta 2r}}$$

gdzie: r_{12} - amplitudowy współczynnik odbicia na granicy woda - węgiel,

δ - stała propagacji dla ziarna węgla.

Z tego wzoru wynika, że w miarę wzrostu wielkości ziarna wzrasta R , a więc wzrasta tłumienie.

Przy oszacowaniu zgodności teorii z doświadczeniem przyjęto stałą tłumienia wody niezwiązanej. Takie założenie oparte jest na fakcie, że stosunkowo nieduża ilość wody okalającej ziarno tworzy warstwy związane z węglem.

W tej pracy nie rozstrzygnięto również w jakim stopniu wpływa na tłumienie woda higroskopijna, a w jakim woda powierzchniowa. Z przeprowadzonych badań dla węgli o różnych wartościach W_h nie uzyskano jednolitych krzywych wzorcowania, niezależnie od przyjętego układu współrzędnych $(\frac{A}{d}, W)$ i $(\frac{A}{d}, W_p)$.

Rozstrzygnięcie tego problemu wymaga dalszych badań i znacznie przekracza ramy tej pracy.

Stąd też zaproponowana w pracy metoda może być stosowana jedynie w tych przypadkach, gdzie na podstawie badań doświadczalnych ustali się istotną statystycznie korelację pomiędzy tłumieniem i wilgotnością. Rodzaj wyznaczanej wilgotności nie jest tutaj ważny.

Z przedstawionych badań wynika, że radiometryczna metoda pomiaru gęstości powierzchniowej jest słabo zależna od własności fizyko-chemicznych węgla i nie stanowi ona istotnego ograniczenia dla metody oznaczania wilgotności.

W n i o s k i .

1. Przez jednoczesny pomiar tłumienia mikrofal i natężenia przechodzącego promieniowania gamma można wyznaczać wilgotność w sposób niezależny od grubości i gęstości próbki z błędem nie większym od 0,46 % H₂O.
2. Pomiar można przeprowadzać dla węgla rozdrobnionych poniżej 3 mm, jak i węgla o klasie ziarnowej 0 - 20 mm.
3. Istotnym czynnikiem obniżającym dokładność jest zmiana zawartości ziaren o klasie powyżej 7 mm.
4. Warunkiem koniecznym na stosowanie tej metody jest istnienie korelacji pomiędzy względnym tłumieniem mikrofal $\frac{A}{d \rho}$ i wilgotnością węgla.

B i b l i o g r a f i a .

1. Balanis C.A., Rice W.S., Smith N.S.: "Microwave measurements of coal". Radio Science, Vol 11, No 4, p 413-418, 1976.
2. Bandzeladze A.E., Šukin A.J.: "Elektronnyj vlagomer dla ugla tipa PVUK - 1". Ugol, No 9, p 34-35, 1961.
3. Benzar V.K.: "Opredelenie vlažnosti kapillarnoporistych materialov po pogloščeniju radiovoln". Inženerno-fizičeskij Žurnal, Vol XVIII, No 6, p 1131-1136, 1970.
4. Benzar V.K.: "S.V.Č. vlagomer dla izmiereniya vlažnosti tvierdyh i sypučich materialov". Izmeritelnaja Technika, No 3, p 87, 1971.
5. Benzar V.K., Rimkievič J.M.: "Laboratornaja ustanovka dla opredeleniya vlažnosti kapillarnoporistych materialov metodom S.V.Č. pogloščeniya". Inženerno-fizičeskij Žurnal, Vol XXII, No 6, p 1068-1071, 1972.
6. Berliner M.A., Demjanov A.A. Cier M.S.: "K ispolzovaniju sverchwysokočastotnyh vlagomerov s zondami - izlučateljami i zondami - indikatorami". Zavodskaja Laboratorija, No 3, 1975.
7. Berliner M.A., Ivanov V.A.: "Charakteristiki vlagomerov sverchvysokich častot". Pribory i Sistemy Upravlenija, No 3, 1967.
8. Berliner M.A., Poliščuk S.A.: "Charakteristiki fazovyh vlagomerov S.V.Č.". Pribory i Sistemy Upravlenija, No 12, p 26-28, 1971.

9. Borowczyk M., Czubek J., Dziunikowki B., Jurkiewicz J., Krzuk J., Niewodniczański J., Rossiński B., Zuber A.: "Określanie wilgotności i ciężaru objętościowego gruntów sypkich in situ, metodami radiometrycznymi". *Archiwum Inżynierii Lądowej*, Vol VII, No 22, 1961.
10. Borowczyk M., Czubek J., Dziunikowski B., Niewodniczański J., Zuber A.: "Aparatura do radiometrycznego oznaczania ciężaru objętościowego i wilgotności gruntów w warunkach terenowych". *Nukleonika*, Vol IX, No 11-12, p 871-884, 1964.
11. Böttcher C.J.: "Theory of Electric Polarization". Elsevier, Amsterdam, 1952. cyt. za : A. Chełkowski *Fizyka dielektryków* W-wa 1979.
12. Bruggeman D. *Ann.Phys.* 24, 636, 1935 cyt. za A. Chełkowski *Fizyka dielektryków* W-wa 1979.
13. Burek R., Żurawicz J.K., Wójcik K., Goebel H., Mikołajczak B.: "Oznaczanie zawartości wilgoci przemijającej w węglu metodą radiometryczną". *Przegląd Górniczy*, No 3, p 138-139, 1980.
14. Busker L.H.: "Microwave Moisture Measurement". *Instruments and Control Systems*, Vol 41, p 89-92, Dec. 1968.
15. Chełkowski A.: "Fizyka dielektryków". W-wa 1979.
16. Coulson C.A., Jeffrey A.: "Fale - modele matematyczne". W-wa 1982.
17. Grant E.H., Buchanan T.J., Cook H.F.: "Dielectric Behavior of Water at Microwave Frequencies". *The Journal of Chemical Physics*, Vol 26, No 1, p 156-161, 1957.
18. Groenewege M.P., Schuyer J., Van Krevelen D.W.: "Chemical Structure and Properties of Coal X-Dielectric

Constants of Low Rank and Bituminous Coals".
Fuel, Vol 34, p 339-344, 1955.

19. Guzenda D., Zieliński W.: "Próba zastosowania metody mikrofalowej do pomiarów wilgoci miazłów węgla kamiennego". Zeszyty Naukowe A.G.H. 2.87 Górnictwo 1976.
20. Hall D.A., Morris G.F., Scott C.: "The continuous determination of moisture in coal". Mining and Minerals Engineering, No V, 1969.
21. Hall D.A., Sproson J.C., Gray W.A.: "The rapid determination of moisture in coal using microwaves". Part 1: Laboratory investigations. Journal of the Institute of Fuel, p 350-354, Sept. 1970.
22. Hall D.A., Sproson J.C., Gray W.A.: "The rapid determination of moisture in coal using microwaves". Part 2: Plant trials. Journal of The Institute of Fuel, p 163-167, March 1972.
23. Von Hippel A.R.: "Dielektryki i fale". PWN W-wa 1963.
24. Jackson J.D.: "Elektrodynamika klasyczna". W-wa 1982.
25. Jackson W., Saxton J.A.: "High - frequency absorption phenomena in liquids and solids".
The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol 96, p 77-80, March 1949.
25. Kent M.: "Complex permittivity of protein powders at 9,4 GHz as a function of temperature and hydration".
J.Phys. D. Appl. Phys. Vol 5, 1972.
27. Kirkwood J.G.: J.Chem.Phys. 7, 94, 1939. cyt. za Chełkowski "fizyka dielektryków".

28. Klein A.: "Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften feuchter Steinkohle in Hinblick auf die Anwendbarkeit des Mikrowellenverfahrens zur Wassergehaltsbestimmung". Rozprawa doktorska, 1978.
29. Kołodziej H.A., Jones C.P., Davies M.: J.C.S. Faraday II, 71, 269, 1975. cyt. za Chełkowski "Fizyka dielektryków".
30. Kraszewski A.: "Microwave Instrumentation for Moisture Content Measurement". Journal of Microwave Power, Vol 8, No 3-4, p 323-334, 1973.
31. Kraszewski A.: "Determination of the Strength of Water Suspensions Using a Microwave Bridge Technique". Journal of Microwave Power, Vol 9, No 4, 1974.
32. Kraszewski A., Kuliński S.: "An Improved Microwave Method of Moisture Content Measurement and Control". IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol IECI 23, No 4, p 364-370, Nov. 1976.
33. Kraszewski A., Kuliński S., Matuszewski M.: "Dielectric properties and a model of biphasic water suspension at 9,4 GHz". Journal of Applied Physics, Vol 47, No 4, p 1275-1277, April 1976.
34. Kraszewski A., Stuchły S., Kaliński J.: "Sposób pomiaru zawartości wody w warstwach stałych i ciekłych i układ do stosowania tego sposobu". Opis Patentowy 61790, 1970.
35. Van Krevelen D.W., Schuyer J.: "Wągiel - chemia węgla i jego struktura". W-wa 1959.

36. Lander W.R., Wheatley R.: "NMR measure moisture on coals: effect of mineral matter and size".
Journal of The Institute of Fuel, July 1966.
37. Łapiński M., Kostyrko K., Włodarski W.: "Nowoczesne metody pomiaru i regulacji wilgotności". WNT W-wa 1968.
38. Lejpunskij O.J., Novožilov B.V., Sacharov V.N.: "Rasprostranienie gamma - kwantov v vješčestvie".
Moskva 1960.
39. Malsh J.: "Phys. Z." 29, 770, 1928 i 30, 837, 1929.
cyt. za Chełkowski "Fizyka dielektryków".
40. Mielecki T.: "Wiadomości o badaniu i własnościach węgla".
Wydawnictwo "Śląsk" Katowice 1972.
41. Morawski T., Gwarek W.: "Teoria pola elektromagnetycznego".
WNT W-wa 1978.
42. Panecki M., Litwin R., Drozdowicz L.: "Teoria i technika mikrofalowa". PWN W-wa 1961.
43. Piersiak M.: "Dynamika utraty wilgoci w trakcie suszenia próbki węgla w generatorze mikrofalowym".
Przegląd Górniczy, No 4, 1979.
44. Piersiak-Żurawicz M.: "Badania nad dokładnością oznaczeń wilgotności węgla metodą mikrofalową".
Archiwum Górnictwa, Vol 26, No 3, 1981.
45. Roga B., Wnękowska L.: "Analiza węgla i koksu". W-wa 1966.
46. Shah M.A., Hasted J.B., Moore L.: "Microwave absorption by water in building materials: aerated concrete".
Brit. J. Appl. Phys. , Vol 16, p 1747-1754, 1965.
47. Skrzypek A., Rogowski T.: "Ciągły pomiar wilgotności węgla i perspektywy jego zastosowania w procesach technologicznych". Wzbogacanie i Utylizacja Kopalini, No 6-7, 1973.

48. Stuchły S.: "Dielectric Properties of Some Granular Solids Containing Water". Journal of Microwave Power, Vol 5, No 2, p 62-68, 1970.
49. Stuchły S., Kraszewski A.: "Pomiary wilgotności ciał stałych i cieczy metodą mikrofalową". Pomiary, Automatyka, Kontrola., No 4, p 112-117, 1966.
50. Stuchły S., Kraszewski A.: "Pomiary wilgotności niektórych substancji stałych metodą mikrofalową". Pomiary, Automatyka, Kontrola., No 8-9, 1966.
51. Wasilewski P., Kobel-Najzarek E.: "Budowa i własności węgla kamiennego". Gliwice 1973.
52. Wert Ch.A., Thomson R.M.: "Fizyka ciała stałego". PWN W-wa 1974.
53. Volk W.: "Statystyka stosowana dla inżynierów". W-wa 1965.
54. Zehnder C.B.: "Application of the Combination Microwave-Gamma Ray Gange to Wood Chip Weight and Moisture Measurement". Pulp and Paper Magazine of Canade., December 1967.
55. Zieliński W.: "Automatyzacja kontroli jakości węgla w oparciu o układ wilgociomierza mikrofalowego". ICAMC, Ostrawa 1977.

U z u p e ł n i e n i e I.

Wyprowadzenie zależności między gęstością objętościową
zawilgoconego i suchego węgla kamiennego.

Wykorzystując definicję wilgotności węgla:

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_s} = \frac{\frac{m_w}{V}}{\frac{m_w + m_s}{V}} \quad (1)$$

oraz jego gęstości objętościowej:

$$\rho = \frac{m_w + m_s}{V} \quad (2)$$

gdzie: m_w - masa wody w próbce węgla,

m_s - masa suchego węgla, tzn. bez wilgoci przemijającej
i higroskopijnej,

V - objętość próbki węgla,

otrzymujemy:

$$\frac{m_w}{V} = W \cdot \rho$$

lub:

$$\frac{\rho \cdot W \cdot V}{V} = W \quad (3)$$

oraz:

$$\frac{m_w}{V} = \rho (1 - W)$$

lub:

$$\frac{\rho_s V_s}{V} = \rho (1 - w) \quad (4)$$

gdzie: ρ_s - gęstość objętościowa suchego węgla,

V_s - gęstość zajmowana przez suchy węgiel wraz z powietrzem,

ρ_w - gęstość wody,

V_w - objętość zajmowana przez wodę.

Na podstawie wyrażenia (4), gęstość objętościowa suchego węgla jest równa:

$$\rho_s = \frac{\rho (1 - w)}{\frac{V_s}{V}} = \frac{\rho (1 - w)}{1 - \frac{V_s}{V}}$$

Wstawiając do ostatniego wyrażenia $\frac{V_w}{V}$ z równania (3),

otrzymujemy:

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot (1 - w)}{1 - \frac{w}{\rho_w} \rho} = \frac{\rho_w \cdot \rho \cdot (1 - w)}{\rho_w - w \cdot \rho} \quad (5)$$

Jest to szukana zależność między gęstością objętościową zawilgoconego i suchego węgla.

U z u p e ł n i e n i e II.

Wyprowadzenie wzoru na grubość warstwy wody otaczającej
powietrzno-suche ziarno węgla.

W oparciu o ziarnowo-warstwowy model próbki węgla kamiennego zakładamy, że ziarno węgla ma kształt sześcianu. Wilgotność powierzchniowa takiego ziarna jest równa:

$$W_p = \frac{\rho_w V_w}{\rho_c V_c + \rho_w V_w} \quad (1)$$

gdzie: ρ_c - gęstość rzeczywista powietrzno-suchego węgla,
 V_c - objętość ziarna powietrzno-suchego węgla.

Biorąc pod uwagę, że:

$$V_c = (2r)^3$$

$$V_w = (2r + 2x)^3 - (2r)^3$$

gdzie: x - jest grubością warstwy wody otaczającej ziarno,
 r - połowa boku sześciennego ziarna powietrzno-suchego węgla - "promień" ziarna,

otrzymujemy:

$$W_p = \frac{\rho_w [(r + x)^3 - r^3]}{\rho_c r^3 + \rho_w [(r + x)^3 - r^3]} \quad (2)$$

stąd:

$$W_p \left(\rho_c + \frac{x^3}{r^3} \rho_w + 3 \frac{x}{r} \rho_w + 3 \frac{x^2}{r^2} \rho_w \right) = \frac{x^3}{r^3} \rho_w + 3 \frac{x}{r} \rho_w + 3 \frac{x^2}{r^2} \rho_w \quad (3)$$

Dla $x \ll r$ (tzn. dla niezbyt dużych W_p) wyrażenie (3) przybiera postać:

$$W_p \left(\rho_c + 3 \frac{x}{r} \rho_w \right) = \rho_w 3 \frac{x}{r}$$

stąd:

$$x = \frac{1}{3} \frac{W_p}{1 - W_p} \frac{\rho_c}{\rho_w} r$$

jest to szukany wzór na grubość warstwy wody otaczającej powietrzno-suche ziarno węgla.

U z u p e ł n i e n i e III.

Wyprowadzenie wzoru na grubość warstwy powietrza otaczającego ziarno zawilgoconego węgla w próbce.

Wzór wyprowadzono przy takich samych założeniach jak w Uzupełnieniu II. Wykorzystano definicję gęstości objętościowej próbki węgla:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_c + m_w + m_p}{V} \quad (1)$$

gdzie: m - masa próbki węgla o objętości V ,

m_c - masa suchego węgla,

m_w - masa wody,

m_p - masa powietrza, przy czym $m_p \approx 0$.

Przenosząc rozważania od całej próbki do jednego ziarna węgla w tej próbce, wyrażenie (1) można zapisać:

$$\rho = \frac{r^3 \rho_c + [(r+x)^3 - r^3] \rho_w}{(r+x+y)^3}$$

gdzie y - jest szukaną grubością warstwy powietrza.

Stąd po przekształceniach otrzymujemy:

$$\frac{y^3}{(r+x)^3} + 3 \frac{y^2}{(r+x)^2} + 3 \frac{y}{r+x} = \frac{r^3(\rho_c - \rho_w) + (r+x)^3(\rho_c - \rho)}{(r+x)^3 \rho}$$

Zakładając, że $y \ll (r+x)$ w powyższym równaniu można zaniedbać wyrazy: $y/(r+x)^3$ i $y/(r+x)^2$.

Otrzymamy wtedy:

$$y = \frac{1}{3} \left[\frac{r^3 (\rho_c - \rho_w)}{(r+x)^2 \rho} + \frac{(\rho_w - \rho)(r+x)}{\rho} \right]$$

przy czym x jest grubością warstwy wody, obliczoną w Uzupełnieniu II.

U z u p e ł n i e n i e IV.

Charakterystyka próbek węgla użytych do badań.

Ogólną charakterystykę próbek węgla zawiera tabela I.

W tabeli I próbki nr 8,9 i 10 otrzymano przez odsiewanie próbki nr 7 (Jaworzno-Brzęczkowice).

W tabeli II podano charakterystykę próbek węgla nadawy i produktów wzbogacania pochodzących z kopalni Anna.

T a b e l a I.

Ogólna charakterystyka próbek węgla.

Nr	Kopalnia	granulacja [mm]	W_h [%]	ρ_c [kg/m ³]	A^r [%]	V^b [%]
1	Janina	0 - 1,4	9,2	1600	15,4	39
2	Staszic	0 - 20	3,5	1620	24,5	-
3	Staszic	0 - 1,4	2,6	1616	24,2	38,5
4	Piast	0 - 20	5,8	1680	20,5	-
5	Piast	0 - 1,4	7,3	1651	18,5	37,0
6	Anna	0 - 20	1,2	1377	8,0	35,0
7	Jaworzno- Brzęczko- wice	0 - 5	5,1	1686	16,9	40,9
8		0 - 1,2	5,1	1659	-	-
9		1,2- 3,0	5,1	1670	-	-
10		3,0- 5,0	5,1	1623	-	-

W_h - wilgoć higroskopijna, ρ_c - gęstość rzeczywista,

A^r - zawartość popiołu, V^b - zawartość części lotnych.

T a b e l a II.

Średnia zawartość popiołu, zawartość frakcji 0 - 3 mm i 2 - 20 mm oraz gęstości rzeczywiste nadawy i produktów wzbogacania próbek pochodzących z kopalni Anna.

produkt	średnia zawartość popiołu [%]	gęstość rzeczywista [kg/m ³]	procentowa zawartość frakcji [%]	
			0-3 mm	3-20 mm
nadawa	20,0	1493	37,5	62,5
koncentrat	8,0	1377	41,6	58,4
przerosty	25,0	1395	24,6	72,4
odpady	60,0	1772	10,4	89,6

