

# Dobór optymalnego detektora promieniowania gamma dla miernika WALKER 2

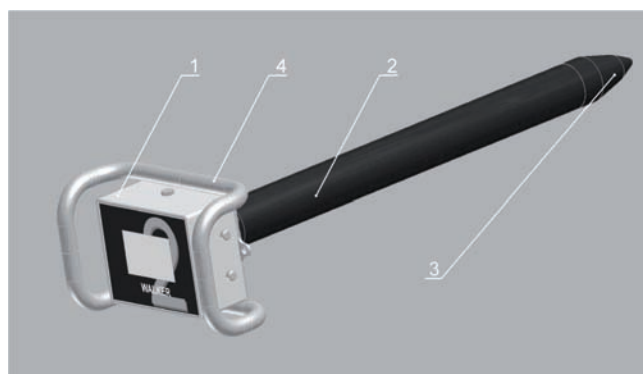
Marian Gola, Piotr Loska, Jarosław Smyła, Waldemar Sobierajski, Piotr Szymała  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań jednego z etapów prac projektowych przenośnego miernika parametrów jakościowych węgla nowej generacji WALKER 2. Przeprowadzone badania obejmowały ocenę właściwości materiałów scyntylacyjnych i geometrii pomiarowej pod względem uzyskania optymalnych warunków pomiaru zawartości popiołu w węglu. Miernik WALKER 2 przeznaczony jest do pomiaru zawartości popiołu, wilgoci i wyznaczenia na ich podstawie wartości opałowej węgla na składowiskach, w ciężarówkach, wagonach itp. Zawartość popiołu określa się na podstawie pomiaru natężenia naturalnego promieniowania gamma węgla. W badaniach uwzględniono detektory z różnymi scyntylatorami. Ich wyniki pokazują, że zastosowanie droższych scyntylatorów ma pomijalny wpływ na wynik pomiaru zawartości popiołu wyznaczony na podstawie promieniowania naturalnego węgla. Większe znaczenie ma, aby węgiel, którego parametry są określane, znajdował się możliwie blisko detektora, a materiał osłony detektora nie powinien znacząco osłabiać naturalnego promieniowania węgla. Za optymalny uznano detektor ze scyntylatorem wykonanym z NaI(Tl) w osłonie z poliamidu POM-C, chroniącej też detektor przed uszkodzeniami mechanicznymi. Podczas badań porównawczych uzyskiwano korzystniejsze wartości współczynnika detekcji i niepewności pomiaru niż dla miernika poprzedniej generacji, popiołomierza WALKER, traktowanego jako odniesienie.

**Słowa kluczowe:** popiołomierz przenośny, naturalna promieniotwórczość gamma, pomiar zawartości węgla, sonda scyntylacyjna, test t Studenta

## 1. Wprowadzenie

Wyznaczanie zawartości popiołu w węglu na podstawie pomiaru jego naturalnej promieniotwórczości gamma jest zagadnieniem dobrze znanym. Metodę tę wykorzystano w opracowanych w Instytucie EMAG popiołomierzach RODOS (do pomiarów ciągłych) i przenośnym popiołomierzu WALKER. Popiołomierz WALKER opracowano kilkanaście lat temu. Wówczas stanowił bardzo nowoczesną konstrukcję. W ocenie większości użytkowników przewyższał rozwiązania konkurencyjne. Z czasem jednak wzrosły wymagania rynku względem rozwiązań tego typu. Część elementów wykorzystywanych w konstrukcji popiołomierza WALKER wycofano z produkcji. Z tych względów zdecydowano się opracować przenośny miernik parametrów jakościowych węgla nowej generacji WALKER 2 (rys. 1).



Rys. 1. Wygląd zewnętrzny miernika parametrów jakościowych węgla Walker 2 [opracowanie własne]; 1 – skrzynka elektroniczna, 2 – cylindryczna osłona sondy (korpus), 3 – grot, 4 – uchwyt  
Fig. 1. Outside view of coal quality meter WALKER 2 [own elaboration]; 1 – electronic circuitry housing, 2 – detector shell, 3 – conical tip, 4 – handle

Jednym z etapów prac projektowo-badawczych było przeprowadzenie badań pozwalających ocenić właściwości różnych rodzajów materiałów scyntylacyjnych pod względem zapewnienia najefektywniejszego pomiaru natężenia naturalnego promieniowania gamma. Opis badań i uzyskane wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu.

### Autor korespondujący:

Waldemar Sobierajski, w.sobierajski@ibemag.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 04.06.2018 r., przyjęty do druku 25.06.2018 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

## 2. Właściwości materiałów scyntylacyjnych

Popiolumierz WALKER (pierwszej generacji) wyposażony został w detektor z kryształem scyntylacyjnym z jodku sodu aktywowanego talem NaI(Tl). Wielkość kryształu detektora oraz materiał, z jakiego został wykonany, gwarantują uzyskanie zadowalających wyników pomiarów, gdzie deklarowana niepewność urządzenia została określona na poziomie  $\sigma \leq 1,5\%$  A (procent zawartości popiołu). Wybór detektorów podyktowany był określonymi założeniami. Przyjęto m.in., że zakres mierzonych energii musi obejmować piki charakterystyczne dla  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ . Zakres jest stosunkowo szeroki – od kilkudziesięciu keV do prawie 2 MeV, przez co wykluczone zostały scyntylatory plastikowe, które charakteryzują się stosunkowo małą wydajnością i amplitudą sygnału [1]. Ze względu na ograniczone możliwości techniczne zrezygnowano z detektorów półprzewodnikowych, częściej wykorzystywanych w urządzeniach laboratoryjnych, w których zwykle stosowane są dodatkowo układy chłodzenia. Na rynku dostępne są również inne detektory scyntylacyjne, często wykorzystywane w przemyśle i medycynie (detektor BGO ( $\text{Bi}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) czy CsI(Tl) (jodek ceszu aktywowany talem)). Detektory BGO cechuje duża gęstość, a przez to wydajność. Uzyskuje się większą liczbę zliczeń względem NaI(Tl) i CsI(Tl), ale przy minimalnie gorszej rozdzielczości.

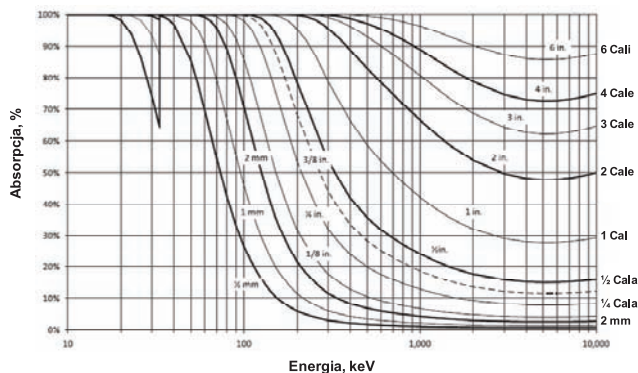
Jednak wyniki badań prowadzone w Instytucie EMAG podczas projektu *Wykorzystanie spektroskopii scyntylacyjnej promieniowania gamma do oznaczeń parametrów jakości węgla* (nr projektu 4T10B07822) pokazały, że w przypadku pomiaru naturalnej promieniotwórczości węgla w warunkach ruchomych (tj. charakteryzujących się krótkim czasem pomiaru nieprzekraczającym 300 s) przewaga detektorów BGO względem NaI(Tl) nie jest znacząca. Tym samym nie zaobserwowano wyraźnego wzrostu dokładności pomiaru zawartości popiołu w węglu przez pomiar jego naturalnej promieniotwórczości gamma. Dlatego rozważano jeszcze zastosowanie detektora CsI(Tl). Porównanie parametrów detektorów wyposażonych w kryształy scyntylacyjne NaI(Tl) i CsI(Tl) przedstawiono w tabeli 1. Rozdzielczość detektorów określana jest zwykle przez szerokość połówkową (mierzoną w połowie wysokości) piku charakterystycznego danego źródła promieniowania. Rozdzielczość określa się skrótem FWHM (ang. *full width of half maximum*) i można wyrazić w wartości bezwzględnej (np. w keV) bądź względnej, wyrażonej w procentach. Lepsze parametry detektorów CsI(Tl) przekładają się także na wyższą cenę.

Oprócz rodzaju zastosowanego kryształu, istotna jest też jego wielkość. Stosowanie większych detektorów pozwala na rejestrację większej liczby impulsów z danej próbki względem mniejszych detektorów tego samego rodzaju. Jednak zależność ta nie

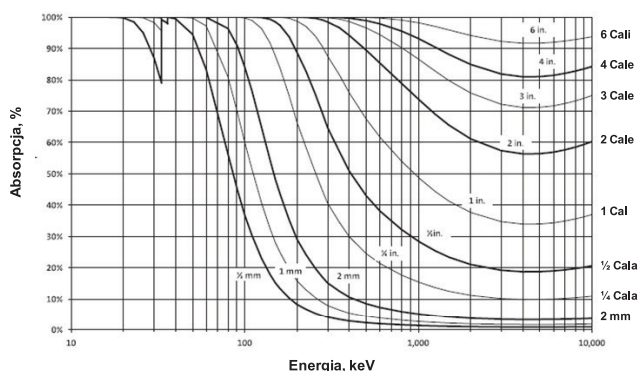
**Tabela 1. Podstawowe parametry techniczne detektorów NaI(Tl) i CsI(Tl) [4, 5]**

Table 1. Basic characteristics of NaI(Tl) and CsI(Tl) detectors [4, 5]

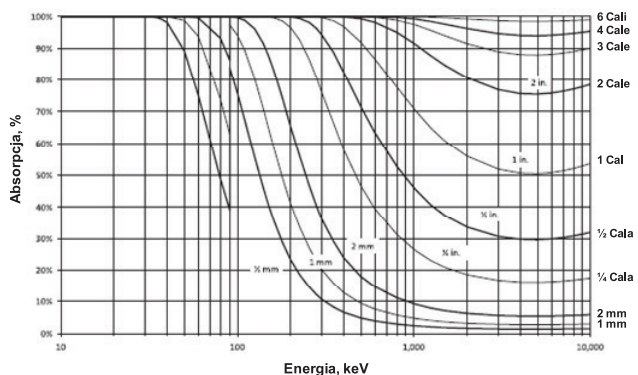
Parametr	NaI(Tl)	CsI(Tl)
% FWHM dla Cs-137	6	8
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	3,67	4,51
Czas zaniku [ns]	250	1000
Wydajność świetlna [fotony/keV]	38	54
Higroskopijność	tak	słaba
Długość fali odpowiadająca maksimum emisji [nm]	415	550



**Rys. 2. Wydajność detektora NaI(Tl) dla różnych grubości kryształu [4, 7]**  
Fig. 2. Absorption efficiency of NaI(Tl) detector for different crystal thicknesses [4, 7]



**Rys. 3. Wydajność detektora CsI(Tl) dla różnych grubości kryształu [4, 7]**  
Fig. 3. Absorption efficiency of CsI(Tl) detector for different crystal thicknesses [4, 7]

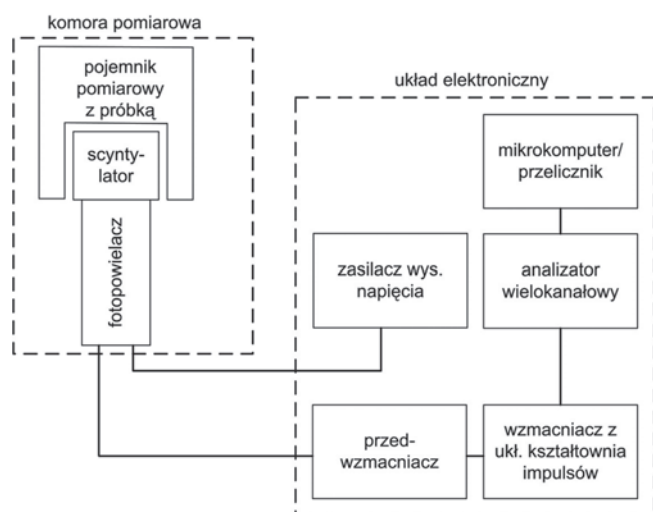


**Rys. 4. Wydajność detektora BGO dla różnych grubości kryształu [4, 7]**  
Fig. 4. Absorption efficiency of BGO detector for different crystal thicknesses [4, 7]

jest liniowa. Poniżej przedstawiono, jak kształtuje się wydajność popularnych detektorów NaI(Tl), CsI(Tl) i BGO dla poszczególnych energii promieniowania gamma, przy różnej grubości kryształów (rys. 2 – rys. 4) [4, 7].

Z powodów ergonomicznych i funkcjonalnych, w popiolumierzu WALKER zastosowano detektory o wymiarach 2" x 2". Ze względu na różnice w cenie między detektorami NaI(Tl) i CsI(Tl) oraz różnice ich parametrów wykonano badania porównawcze detektorów, aby zdecydować, które zostaną wykorzystane w przenośnym analizatorze węgla WALKER 2. Do tego celu przygotowano stanowisko badawcze złożone z:

- komory pomiarowej o konstrukcji ramowej, której ściany wyłożone zostały cegłami ołowianymi o grubości 50 mm. W górnej części komory umieszczono wąż wypełniony ołowiem o grubości 50 mm. W dnie komory wykonano otwór o średnicy 80 mm umożliwiającą zamontowanie detektora oraz wyprowadzenie



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

Fig. 5. Block diagram of measuring position

przewodów. Wymiary wewnętrzne komory wynoszą 400 mm × 400 mm × 700 mm (długość × szerokość × wysokość),  
 – dwóch detektorów: NaI(Tl) 3" × 3" oraz CsI(Tl) 3" × 3" (nie dysponowano mniejszym detektorem CsI(Tl), a kluczowe było porównanie detektorów z kryształami o identycznych gabarytach),  
 – analizatora wielokanałowego i urządzenia rejestrującego.

### 3. Opis i wyniki badań

Do badań wykorzystano próbki węgla pochodzące z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Łącznie przygotowano dwadzieścia próbek z czterech różnych kopalń. Węgiel pobierano z taśmociągów lub zwalów. Masa mierzonych próbek węgla wynosiła 5 kg. W próbkach oznaczono parametry jakościowe zgromadzonego materiału, a także stężenie promieniotwórcze izotopów  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  i  $^{40}\text{K}$ . Stężenie promieniotwórcze wyrażone jest jako stosunek wyznaczonej aktywności promieniotwórczej i masy lub objętości próbki. Wyniki oznaczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Zawartość popiołu w badanych próbkach węgla oraz stężenie promieniotwórcze naturalnych pierwiastków promieniotwórczych [opracowanie własne]

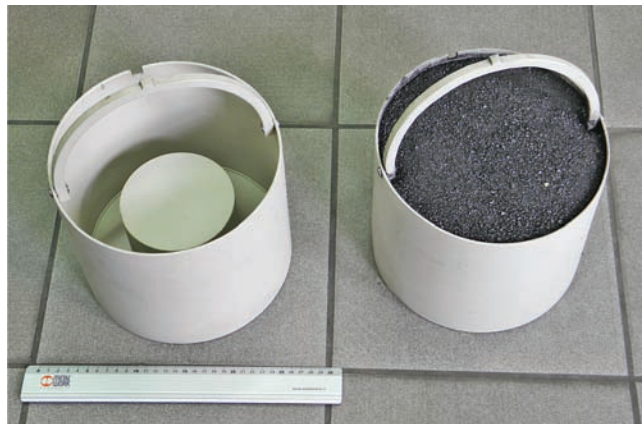
Table 2. Ash contents of tested samples of coal and radioactive concentration of natural radioactive elements [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	Nr próbki	A <sup>a</sup> , % wart. średnia	$^{226}\text{Ra}$ , Bq/kg	$^{228}\text{Ra}$ , Bq/kg	$^{40}\text{K}$ , Bq/kg
1	1	9,6	11,3	10,5	35,7
	2	16,5	17,3	16,7	125,3
	3	21,1	19,8	18,6	155,0
	4	34,4	28,8	28,8	254,0
	5	64,6	51,2	50,9	557,0
2	1	12,1	21,6	12,6	62,5
	2	19,2	27,2	14,9	82,0
	3	20,0	24,8	15,3	88,1
	4	23,6	22,6	15,5	98,7
	5	25,1	27,8	17,2	112,0
3	1	8,3	20,2	12,5	26,3
	2	15,1	27,2	14,9	82,0
	3	24,4	32,8	22,1	129,0
	4	30,6	46,6	31,5	227,0
	5	30,8	43,0	28,5	207,0
4	1	10,1	28,8	16,4	65,9
	2	15,7	26,3	20,3	99,5
	3	23,3	36,0	28,6	172,0
	4	25,5	40,4	27,7	193,0
	5	33,1	48,3	35,3	243,0

**Tabela 3. Analiza zależności stężenia promieniotwórczego naturalnych pierwiastków promieniotwórczych i zawartości popiołu w węglu [opracowanie własne]**

Table 3. Analysis of relation between radioactive concentration of natural radioactive elements and ash contents of coal [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	$A^a = f(^{226}\text{Ra})$		$A^a = f(^{228}\text{Ra})$		$A^a = f(^{40}\text{K})$	
	r	$\sigma$ [%]	r	$\sigma$ [%]	r	$\sigma$ [%]
1	0,9989	0,83	0,9988	0,88	0,9951	1,77
2	0,3337	4,77	0,9258	1,59	0,9529	1,27
3	0,9448	2,68	0,9455	2,66	0,9606	2,26
4	0,8877	3,44	0,9823	1,36	0,9929	0,86



**Rys. 6. Wygląd pojemnika pomiarowego: pustego (po lewej) i z próbką węgla (po prawej)**

Fig. 6. View of measuring container: empty (on the left) and with sample of coal (on the right)

**Tabela 4. Parametry statystyczne wybranych zależności (sonda NaI(Tl)) [opracowanie własne]**

Table 4. Statistical parameters of selected relations (NaI(Tl) detector) [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	$A^a = f(N_c)$	
	r	[%]
1	0,9942	1,65
2	0,9306	1,34
3	0,9507	2,19
4	0,9884	0,96

**Tabela 5. Wyniki analizy istotności korelacji (detektor NaI(Tl)) [opracowanie własne]**

Table 5. Results of correlation significance analysis (NaI(Tl) detector) [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	$A^a = f(N_c)$			
	$ t $	relacja	$t_{kryt}$	hipoteza
1	16,0117	>	3,1824	$H_1$
2	4,4035	>	3,1824	$H_1$
3	5,3099	>	3,1824	$H_1$
4	11,2723	>	3,1824	$H_1$

Na początku badań, w oparciu o wyniki analiz laboratoryjnych, zweryfikowano zależność między stężeniem naturalnych izotopów promieniotwórczych  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  i  $^{40}\text{K}$  a zawartością popiołu. Parametry opisujące regresję liniową (tj. odchylenie standardowe reszt, inaczej błąd standardowy  $\sigma$  oraz współczynnik korelacji liniowej Pearsona  $r$ ) przedstawiono w tabeli 3.

Próbki węgla zostały następnie zmierzone z wykorzystaniem testowanych detektorów. Dla uzyskania wiarygodnych wyników, próbki posiadały możliwie zbliżoną masę, wilgotność oraz uziarnienie. Węgiel umieszczano w naczyniach typu Marinelli (tj. naczyniach cylindrycznych, pozwalających na rozłożenie mierzonego materiału równomiernie wokół sondy – rys. 6).

Przeprowadzono analizę uzyskanych widm promieniowania gamma, z wyszczególnieniem kilku przedziałów energii. Wydzielone zostały obszary widma charakterystyczne dla piku izotopów  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  i  $^{40}\text{K}$ . Jednak ze względu na niestabilne położenie widma względem przyjętych progów pomiarowych (mimo zastosowanej elektronicznej stabilizacji), zdecydowano się przyjmować do analizy liczbę rejestrowanych zliczeń uzyskanych z detektorów w całym zakresie mierzonym  $N_c$  (tj. do wartości ok. 2 MeV). Czas pomiaru wynosił 300 s.

Dodatkowo przeprowadzono analizę istotności obliczonego równania regresji, korzystając z testu t Studenta [2, 3]:

$$t = \frac{r\sqrt{n_p - 2}}{\sqrt{1 - r^2}}$$

gdzie:  $t$  – wynik testu t-Studenta,  $n_p$  – liczba obserwacji,  $r$  – współczynnik korelacji liniowej Pearsona.

Jako hipotezę zerową  $H_0$  przyjęto, że korelacja jest nieistotna, jeśli  $|t| < t_{kryt}$  (poziom istotności  $\alpha = 0,05$ . W przypadku, gdy  $|t| \geq t_{kryt}$  należy przyjąć hipotezę  $H_1$  o istotności korelacji. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 5.



Analogiczne pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem detektora CsI(Tl). Wyniki analizy przedstawiono w tabelach 6 i 7.

**Tabela 6. Parametry statystyczne wybranych zależności – sonda CsI(Tl) [opracowanie własne]**

Table 6. Statistical parameters of selected relations (CsI(Tl) detector) [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	A <sup>a</sup> = f(N <sub>C</sub> )	
	r	σ [%]
1	0,9932	1,79
2	0,9342	1,30
3	0,9558	2,08
4	0,9823	1,18

**Tabela 7. Wyniki analizy istotności korelacji (detektor CsI(Tl) [opracowanie własne]**

Table 7. Results of correlation significance analysis (CsI(Tl) detector) [own elaboration]

Symbol zakładu wydobywczego	A <sup>a</sup> = f(N <sub>C</sub> )			
	t	relacja	t <sub>kryt</sub>	hipoteza
1	14,7764	>	3,1824	H <sub>1</sub>
2	4,5356	>	3,1824	H <sub>1</sub>
3	5,6306	>	3,1824	H <sub>1</sub>
4	9,0831	>	3,1824	H <sub>1</sub>

Następnie porównano wartości średnie współczynników korelacji liniowej Pearsona i wartości odchyłeń standardowych reszt (tabela 8).

**Tabela 8. Wartości średnie parametrów statystycznych wybranych zależności [opracowanie własne]**

Table 8. Mean values of statistical parameters of selected relations [own elaboration]

Detektor/kryształ	A <sup>a</sup> = f(N <sub>C</sub> )	
	r <sub>sr</sub>	σ <sub>sr</sub> [%]
NaI(Tl)	0,9659	1,54
CsI(Tl)	0,9664	1,59

W przypadku powyższych pomiarów (czas pomiaru nieprzekraczający 300 s) z wykorzystaniem detektorów NaI(Tl) jak i CsI(Tl) nie widać wyraźnej różnicy w zależnościach, co potwierdzono testami statystycznymi (test t-Studenta dla par zależnych). Uzyskane rezultaty wskazują, że w przypadku projektowania urządzeń do technologicznych pomiarów parametrów jakościowych węgla, przez pomiar jego naturalnej promieniotwórczości, jako kryterium oceny prezentowanych rodzajów sond scyntylacyjnych, można przyjąć ich cenę i dostępność. Z tego powodu w analizatorze WALKER 2 również zastosowano detektor NaI(Tl), który jest rozwiązaniem tańszym.

Chociaż w mierniku WALKER 2 zastosowano identyczny rodzaj detektora, co w popiolomierzu poprzedniej generacji, to istotną zmianą, która może wpływać na pomiar naturalnej promieniotwórczości gamma jest materiał, z jakiego wykonano korpus popiolomierza (stanowiący zarazem osłonę detektora). Dotąd korpus wykonywano ze stali nierdzewnej. W opisywanym rozwiązaniu zastosowano poliamid POM-C, którego gęstość jest około cztery razy mniejsza niż stali. Oznacza to, że krotność osłabienia promieniowania gamma pochodząca od węgla jest zdecydowanie niższa. Z drugiej strony, dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej, korpus miernika WALKER 2 ma średnicę większą o 10 mm. Wyniki pomiaru naturalnej promieniotwórczości zależą od tego, w jakiej odległości znajduje się analizowany materiał względem sondy. Żeby zobrazować, jak wygląda obszar pomiarowy wokół detektora wykonano kolejne doświadczenie. Posłużono się słabym źródłem (kobalt) umieszczonym w kolimatorze. Źródło ustawiano w różnych odległościach od detektora. Na rys. 7 przedstawione zostały wartości szybkości zliczeń N<sub>C</sub> zarejestrowane przez sondę scyntylacyjną, zależne od odległości źródła od sondy. Obszar ten nie jest jednakowy na całej powierzchni sondy.

Widząc, jak istotna na wynik pomiaru jest odległość mierzonego materiału

3 cm od kryształu	185,4 imp/s			206,2 imp/s	220,7 imp/s	
	1 cm od kryształu	245,4 imp/s			302,2 imp/s	324,1 imp/s
		0 cm od kryształu	349,5 imp/s			439,9 imp/s
169,3 imp/s	219,5 imp/s	259,5 imp/s	kryształ (scyntylator)			
216,0 imp/s	305,9 imp/s	414,0 imp/s				
221,5 imp/s	324,8 imp/s	450,1 imp/s				
193,0 imp/s	278,7 imp/s	365,0 imp/s				

**Rys. 7. Analiza przestrzeni roboczej sondy scyntylacyjnej [opracowanie własne]**

Fig. 7. Analysis of working space of scintillation detector [own elaboration]

od sondy, stwierdzono, że mierzony węgiel powinien znajdować się jak najbliżej kryształu. W celu oceny, który wariant obudowy przynosi lepsze efekty, wykonano testy porównawcze obu wersji popiołomierzy, ale z zastosowaniem tego samego detektora. Przygotowano sześć próbek węgla kamiennego o masie 25 kg każda. Próbkę umieszczono w komorze pomiarowej o grubości ścianek 50 mm. W warunkach rzeczywistych (zwały, wagony itp.) materiał mierzony ma masę kilku ton. Strefę pomiarową w przybliżeniu stanowi kula o średnicy 120 mm, której środek wyznacza detektor. Materiał znajdujący się poza strefą pomiarową stanowi naturalny ekran, osłabiający wpływ promieniowania tła na wynik. Na potrzeby testów nie dysponowano tak dużymi próbkami, dlatego wprowadzono ekran ołowiany w postaci wspomnianej komory. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 9. Czas pojedynczego pomiaru wyniósł 100 s.

**Tabela 9. Pomiar naturalnej promieniotwórczości węgla (WALKER i WALKER 2) [opracowanie własne]**

Table 9. Measurements of natural radioactivity of coal (WALKER and WALKER 2) [own elaboration]

	WALKER (I generacja)	WALKER 2 (II generacja)
$A^r_{lab}$	$N_c$	$N_c$
%	imp/s	imp/s
14,2	60,8	70,0
22,4	74,5	86,1
23,7	77,5	90,4
26,2	87,4	101,8
27,2	92,0	106,1
32,9	102,3	118,1

W nowym mierniku WALKER 2 rejestrowana była większa liczba zliczeń (odniesionych do czasu pomiaru). Oznacza to, że osłona detektora z tworzywa sztucznego pod względem metrologicznym jest lepszym rozwiązaniem. Zwiększona średnica obudowy nie wpływa negatywnie na pomiar naturalnej promieniotwórczości węgla. Większe znaczenie ma tutaj gęstość materiału z jakiego wykonano korpus. Tym samym, poprawił się współczynnik detekcji  $k$ :

$$k = \frac{\Delta N_c}{\Delta A^r} \left[ \frac{imp}{s \cdot \%} \right]$$

gdzie:  $N_c$  –liczba zliczeń w jednostce czasu rejestrowana w całym oknie pomiarowym [imp/s],  $A^r$  – zawartość popiołu w stanie roboczym [%]

Współczynnik  $k$  określa zmianę natężenia promieniowania gamma w skutek zmiany zawartości popiołu o 1%. Im jego wartość jest większa, tym mniejsza jest niepewność pomiaru. W przypadku porównywanych urządzeń I i II generacji, dla przedstawionych próbek, wartość współczynnika  $k$  wyniosła odpowiednio: 2,8 imp/(s · %) i 3,2 imp/(s · %). Należało się spodziewać się, że w warunkach rzeczywistych, współczynniki te będą odpowiednio większe.

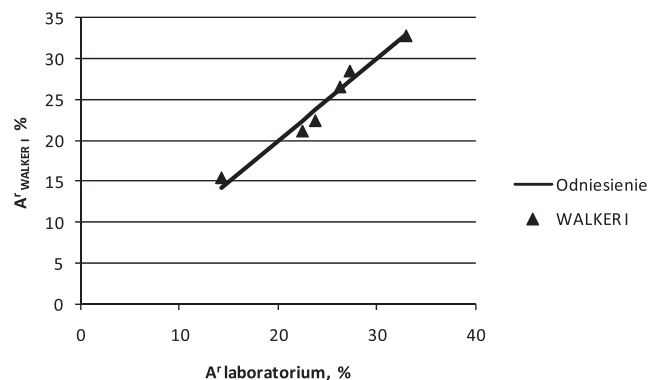
Pomiary porównawcze wykonane w warunkach rzeczywistych potwierdziły to przypuszczenie. Dla pryzmy węgla o zawartości popiołu  $A^r = 24\%$  dla miernika WALKER i WALKER 2 uzyskano wartości współczynnika detekcji odpowiednio 6,0 imp/s i 7,5 imp/s.

Na podstawie danych z tab. 9 wyznaczono parametry opisujące zależność  $A^r = f(N_c)$  dla obu urządzeń. Określone zostały: błąd standardowy  $\sigma$  (odchylenie standardowe reszt) oraz współczynnik korelacji liniowej Pearsona  $r$ . Wyniki przedstawiono w tabeli 10.

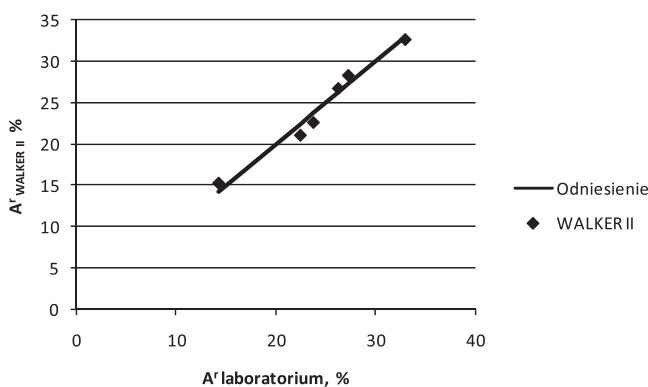
**Tabela 10. Wyniki analizy regresji liniowej [opracowanie własne]**  
Table 10. Results of linear regression analysis [own elaboration]

	WALKER (I generacja)	WALKER 2 (II generacja)
$A^r = f(N_c)$		
$\sigma$	1,28	1,19
$r$	0,9576	0,963

Wyniki pomiarów przedstawiono również graficznie na rysunkach 8 i 9. Porównanie detekcji promieniowania gamma obu wersji urządzeń w warunkach laboratoryjnych potwierdziło słuszność przyjętych założeń.



**Rys. 8. Porównanie wyników pomiaru zawartości popiołu wyznaczonej za pomocą popiołomierza WALKER z oznaczeniami odniesienia [opracowanie własne]**  
Fig. 8. Comparison of results of ash contents measurements obtained by ashmeter Walker with reference determinations [own elaboration]



**Rys. 9. Porównanie wyników pomiaru zawartości popiołu wyznaczonej za pomocą analizatora WALKER 2 z oznaczeniami odniesienia [opracowanie własne]**  
Fig. 9. Comparison of results of ash contents measurements obtained by analyzer Walker 2 with reference determinations [own elaboration]

## 4. Podsumowanie

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań uznano, że jako optymalny detektor dla miernika WALKER 2 należy przyjąć sondę ze scyntylatorem wykonanym z NaI(Tl). Stosowanie droższych detektorów CsI(Tl) nie wpływa istotnie na zmniejszenie niepewności pomiarowej urządzenia, dlatego zdecydowano się na wprowadzenie zmian w konstrukcji korpusu przenośnego popiolomierza.

Ze względów mechanicznych WALKER 2 ma zwiększoną średnicę zewnętrzną korpusu, jednak niski współczynnik absorpcji promieniowania gamma użytego materiału pozwala uzyskać korzystniejszy współczynnik detekcji, względem cieńszej, aczkolwiek stalowej obudowy urządzenia poprzedniej generacji. Wyniki badań sugerują także, że dzięki wprowadzonym zmianom konstrukcyjnym miernik WALKER 2 charakteryzuje się mniejszą wartością niepewności pomiaru zawartości popiołu niż jego poprzednik.

Zmiany konstrukcyjne przyniosły na tyle zadawalające efekty, że zrezygnowano z wyposażania mierników WALKER 2 w sondy inne niż NaI(Tl). Specyfika pomiarów technologicznych (ruchomych), sprawia, że jest to rozwiązanie optymalne. Miernik WALKER 2 w odróżnieniu od poprzedniej generacji, wyposażony został dodatkowo w czujnik wilgoci. Tu zastosowano inną technikę pomiarową, co nie jest związane z wyborem detektorów promieniowania gamma.

## Bibliografia

1. Aglincew K.K., *Dozymetria promieniowania jonizującego*, PWN 1961.
2. Kryszicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach*, PWN 1986.
3. Greń J., *Statystyka matematyczna modele i zadania*. PWN, Warszawa 1976.
4. Gamma and X-Ray Detection, Mirion Technologies (Canberra) Inc. [dostęp 1.05.2018 r.], [www.canberra.com/literature/fundamental-principles/pdf/Gamma-Xray-Detection.pdf](http://www.canberra.com/literature/fundamental-principles/pdf/Gamma-Xray-Detection.pdf).
5. Physical Properties of Common Inorganic Scintillators, Saint-Gobain Crystals. [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/products/crystal-scintillation-materials](http://www.crystals.saint-gobain.com/products/crystal-scintillation-materials).
6. Scintillation Materials and Assemblies, Saint-Gobain Crystals. [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sgc-scintillation-materials-and-assemblies.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sgc-scintillation-materials-and-assemblies.pdf).
7. Efficiency Calculations for Selected Scintillators, Saint-Gobain Crystals. [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/efficiency\\_calculations\\_brochure\\_69670.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/efficiency_calculations_brochure_69670.pdf).
8. NaI(Tl) and Polyscint NaI(Tl) Sodium Iodide Scintillation Material. Saint-Gobain Crystals [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sodium-iodide-material-data-sheet\\_0.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/sodium-iodide-material-data-sheet_0.pdf).
9. CsI(Tl), CsI(Na) Cesium Iodide Scintillation Material, Saint-Gobain Crystals [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/csitl-and-na-material-data-sheet.pdf).
10. BGO Bismuth Germanate Scintillation Material [PDF]. Saint-Gobain Crystals [dostęp 1.05.2018 r.], [www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bgo-material-data-sheet\\_69763.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bgo-material-data-sheet_69763.pdf).

## Selection of the Optimal Gamma Detector for the WALKER 2

**Abstract:** The paper presents findings of research being one of the element of the designing work of portable coal quality meter WALKER 2. The conducted research included the evaluation of the properties of scintillation materials and measuring geometry in terms of obtaining optimal conditions for measuring the ash content in coal. The WALKER 2 meter is designed to measure the ash content, moisture content and determine the calorific value of coal on stacking yards, in trucks, wagons, etc. The ash content is determined by measuring the intensity of natural gamma-ray radiation. Therefore, it is very important to obtain the highest possible value of the gamma detection factor. The tests included detectors with scintillators made of NaI (Tl), CsI (Tl) and BGO. CsI (Tl) and BGO are characterized by better absorption efficiency than NaI (Tl), especially for higher gamma radiation energy. However, studies show that the use of more expensive scintillators with CsI (Tl) or BGO has a negligible effect on the result of measuring the ash content determined on the basis of natural gamma radiation of coal. It is more important that the coal whose parameters are determined should be as close as possible to the detector, and the detector shield material should not significantly attenuate the natural radiation of coal. The detector with the NaI (Tl) scintillator placed in the POM-C polyamide shell protecting the detector against mechanical damage was considered optimal. In this case, more favorable values of the detection factor and measurement uncertainty were obtained during the comparative tests than for the previous generation meter, the WALKER ash meter, treated as a reference.

**Keywords:** portable ashmeter, natural gamma radioactivity, measurement of ash content of coal, coal quality, scintillation detector

### mgr inż. Marian Gola

m.gola@ibemag.pl

Absolwent Wydziału Fizyki i Techniki Jądrowej oraz Wydziału Zarządzania i Marketingu Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 1995 r. zatrudniony w Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG w Katowicach, obecnie Instytut Technik Innowacyjnych EMAG. Autor i współautor patentów i wzorów użytkowych urządzeń związanych z pomiarami jakości węgla. Obecnie zatrudniony w Zakładzie Badawczo-Rozwojowym na stanowisku asystenta naukowo-badawczego.



### mgr inż. Piotr Loska

p.loska@ibemag.pl

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od 2010 r. zatrudniony w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG w Katowicach. Aktualnie pracuje, jako asystent naukowo-badawczy w Centrum Naukowo-Badawczym.



### dr inż. Jarosław Smyła

j.smyla@ibemag.pl

Absolwent Śląskiego Środowiskowego Studium Doktoranckiego w Głównym Instytucie Górnictwa oraz Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. Od 2007 r. zatrudniony w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG w Katowicach. Obecnie zatrudniony w Centrum Naukowo-Badawczym na stanowisku adiunkta.



### mgr inż. Waldemar Sobierajski

w.sobierajski@ibemag.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 1996 r. zatrudniony w Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG w Katowicach, obecnie Instytut Technik Innowacyjnych EMAG. Aktualnie pracuje, jako asystent naukowo-badawczy w Centrum Naukowo-Badawczym. Współautor patentów urządzeń przeznaczonych do kontroli jakości oraz procesów wzbogacania węgla.



### mgr inż. Piotr Szymała

p.szymala@ibemag.pl

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od 2010 r. zatrudniony w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG. Realizator kilku projektów NCBiR, współautor artykułów czasopism punktowanych. Obecnie zatrudniony w Centrum Naukowo-Badawczym na stanowisku asystenta naukowo-badawczego.

