

**Stanisław RYSIECKI, Marian GOLA, Waldemar SOBIERAJSKI**

INSTYTUT TECHNIK INNOWACYJNYCH EMAG  
ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice

**Nowy rodzaj roboczych pojemników źródeł izotopowych****Mgr inż. Stanisław RYSIECKI**

Absolwent Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Śląskiej w roku 1974. Po studiach podjął pracę w COBPWiUK „Separator”. Obecnie zatrudniony w Zakładzie Badawczo-Rozwojowym Instytutu Techniki Innowacyjnych „EMAG” w Katowicach na stanowisku starszego specjalisty technicznego. Autor i współautor kilkunastu patentów i wzorów użytkowych urządzeń związanych z pomiarami jakości węgla.



e-mail: [rys@emag.pl](mailto:rys@emag.pl)

**Mgr inż. Waldemar SOBIERAJSKI**

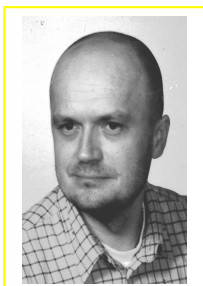
Absolwent Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Od 1996 r. zatrudniony w CEiAG „EMAG” w Katowicach, obecnie Instytut Techniki Innowacyjnych „EMAG”. Aktualnie pracuje, jako starszy specjalista techniczny w Zakładzie Badawczo – Rozwojowym. Współautor kilku patentów urządzeń przeznaczonych do kontroli jakości oraz procesów wzbogacania węgla.



e-mail: [walsobnaw@emag.pl](mailto:walsobnaw@emag.pl)

**Mgr inż. Marian GOLA**

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



e-mail: [mgola@emag.pl](mailto:mgola@emag.pl)

**Streszczenie**

W artykule opisano wykonanie projektu i przedstawiono wyniki badań, jakie prowadzono w związku z opracowaniem nowego rodzaju pojemników roboczych źródeł izotopowych; używanych między innymi w popiołomierzach absorpcyjnych. Uzasadniono celowość rozdziału źródeł izotopowych i ich indywidualnej kolimacji, wykorzystując właściwości różnych materiałów dla osiągnięcia pożądanych efektów przy pomiarach popiołu węgla.

**Słowa kluczowe:** pojemnik źródeł izotopowych.

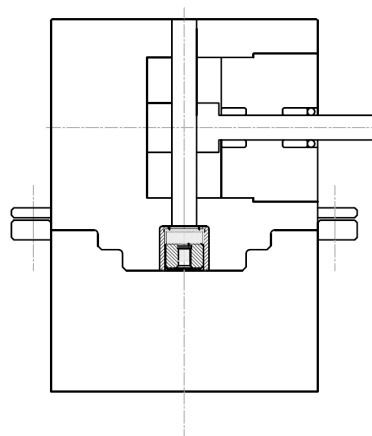
**New kind of isotope container****Abstract**

The project of a new type of isotope containers used among others in radioisotopic ash monitors was described and results of the carried out tests were presented in the article. Purposefulness of separation of radioisotopic sources and their individual collimation using properties of different materials for achieving of required results in ash measurements in coal was justified. The carried out tests and measurements allowed to select the optimal materials of collimators of radioisotopic sources Cs-137 and Am-241 under maintenance of favorable magnitude of beam of photons of required energies. The chosen variant with leaden collimator for Cs-137 and the graphite one for Am-241 allow to achieve at the outlet of the collimator a beam which is over four times greater than in previous types of containers, and to maintain the same activity of radioisotopic sources with desirable energetic structure.

**Keywords:** Radioisotope container.

**1. Wstęp**

W latach 2009-2011 prowadzono w Instytucie Techniki Innowacyjnych EMAG prace i badania związane z budową roboczego pojemnika źródeł izotopowych nowego typu; mających zastosowanie w tworzonych w Instytucie urządzeniach kontrolno - pomiarowych. Pomysł budowy nowego pojemnika zrodził się z analizy konstrukcji mechanicznej i wniosków z eksploatacji dotychczasowych pojemników C/A-2. Na rys. 1 przedstawiono przekrój pojemnika roboczego C/A-2.



Rys. 1. Przekrój pojemnika źródeł C/A-2  
Fig. 1. Cross-section of C/A-2 radioisotope container

Pojemnik ten ma sporo zalet, takich jak: zwartość konstrukcji, mała masa, łatwość sterowania przesłoną wiązką izotopowej, ale posiada jedno kłopotliwe ograniczenie, wywołane faktem umieszczenia obu źródeł w jednym miejscu. Zastosowane w urządzeniu izotopy posiadają znacznie różniące się średnice swoich powierzchni czynnych (jedna 3 mm, druga 12 mm, wynikające z wymaganej ich aktywności), ale mają jedną średnicę otworu kolimacyjnego.

W praktyce oznacza to, że jeden izotop jest umieszczony w otworze za dużym, słabo kolimującym emitowany strumień fotonów, a drugi w za małym, powodującym obcięcie części powierzchni czynnej izotopu (nawet rzędu 40%), ograniczając u źródła wielkość tego strumienia. Taki stan ma również dalsze konsekwencje. Emitowane z obu źródeł izotopowych fotony mają różny, specyficzny dla siebie zakres energii i nie jest możliwe znalezienie jednego materiału na ścianki otworu kolimacyjnego, który byłby optymalny dla całego zakresu energii emitowanych kwantów.

Stąd powstał pomysł, aby izotopy rozsunąć w pionie i oddzielnie skolimować emitowane z nich fotony, osiągając głównie dwa cele: lepszą kolimację wiązki fotonów izotopu cezu Cs-137 i pełne wykorzystanie powierzchni czynnej izotopu ameryku Am-241. W tym drugim przypadku spodziewano się wzrostu strumienia kwantów gamma z izotopu ameryku.

**2. Pomiary i badania**

Przeprowadzone pomiary i badania można podzielić na dwa etapy: pierwszy dotyczył optymalizacji geometrycznej średnicy i długości kolimatorów źródeł oraz drugi, który polegał na optymalizacji materiałów kolimatorów obu izotopów.

W celu realizacji pierwszej części badań wykonano model pojemnika i skonfigurowano stanowisko badawcze. Model zaprojektowano w ten sposób, aby umożliwić zmianę długości dróg kolimacji: izotopu Cs-137 w zakresie od 93-133 mm, a izotopu Am-241 w zakresie od 20-70 mm. Dodatkowo, dla Cs-137, przewidziano dwie możliwe średnice otworu kolimacyjnego, 4 i 6 mm, dla Am-241 tylko 12 mm.

Optymalizacja geometryczna polegała na pomiarach natężenia promieniowania gamma z wykorzystaniem możliwości zmiany średnic oraz długości kolimatorów w modelu pojemnika izotopowego. W trakcie badań wykonano pomiary dla 12 różnych wersji „układów geometrycznych”, obejmujących pełny zakres uzasadnionych możliwości pomiarowych. Do celów porównawczych, umożliwiających optymalny wybór układu kolimatorów, wykonano również pomiary dla pojemnika C/A-2, w którym zainstalowano te same źródła, jak w modelu badanego pojemnika.

Badania polegały na pomiarze osłabienia promieniowania gamma ze źródeł umieszczonych w pojemniku. Promieniowanie to po przejściu przez taśmę oraz warstwę węgla, rejestrowane jest w układzie elektronicznym w postaci liczby impulsów i zapisywane do pliku tekstowego w formie dwóch kolumn danych, odpowiadających zliczeniom dla promieniowania Am – 241 oraz Cs – 137. Poddawane są one następnie analizie umożliwiającej wyznaczenie parametru pomiarowego, proporcjonalnego do zawartości popiołu w mierzonej próbce.

W przeprowadzonych badaniach każdą próbkę mierzono dla sześciu grubości warstw z zakresu 50 – 290 mm, rejestrując z wykorzystaniem zespołu elektroniki każdorazowo wartości liczby impulsów. Pojedyncza warstwa próbki węgla mierzona była w naczyniu pomiarowym przez czas 60 s, w czterech punktach po 15 s. Na podstawie zmierzonej intensywności promieniowania źródeł wyznaczano wartość pomiarową, proporcjonalną do zawartości popiołu (1).

$$x = \frac{\ln\left(\frac{A_{WT}}{A_T}\right)}{\ln\left(\frac{C_{S_{WT}}}{C_{S_T}}\right)} \quad (1)$$

gdzie:  $A_T$  - liczba impulsów pomiarowych Am<sup>241</sup> zliczanych w ciągu sekundy po przejściu przez taśmę,  $C_T$  - liczba impulsów pomiarowych Cs<sup>137</sup> zliczanych w ciągu sekundy po przejściu przez taśmę,  $A_{WT}$  - liczba impulsów pomiarowych Am<sup>241</sup> zliczanych w ciągu sekundy po przejściu przez taśmę i warstwę pomiarową węgla,  $C_{WT}$  - liczba impulsów pomiarowych Cs<sup>137</sup> zliczanych w ciągu sekundy po przejściu przez taśmę i warstwę pomiarową węgla.

Parametr pomiarowy  $x$ , proporcjonalny do zawartości popiołu w próbce węgla pozwala na wyznaczenie równania kalibracyjnego. Dla każdego z wyżej wymienionych „układów”, –wyznaczono równania korelacyjne zawartości popiołu w próbkach, od zmierzonej wartości  $x$ .

Uznano, że najlepszym kryterium oceny przydatności poszczególnych „układów” pomiarowych będzie odchylenie standardowe  $1\sigma$ , jako wypadkowej wszystkich błędów pomiaru radiometrycznego, – od niepewności związanej ze statystyką liczby zliczeń, po błędy oznaczenia laboratoryjnego zawartości popiołu i wilgoci w próbce.

Badania dla różnych średnic oraz długości kolimatorów przeprowadzono dla powtarzalnych, stabilnych warunków pomiarowych. Mierzono za każdym razem te same próbki węgla o znanej zawartości podstawowych parametrów jakości. Dla różnych „układów” pomiarowych niepewność pomiaru  $1\sigma$  zmieniała się w zakresie 1,68 %  $A^r$  do 6,99 %  $A^r$ . Wyboru optymalnego układu kolimatorów źródeł dokonano na podstawie porównania wartości

niepewności pomiaru  $1\sigma$  dla wszystkich wykonanych kalibracji. Schemat „układu pomiarowego” zaprezentowano na rys. 2.

Rys. 2. Schemat układu pomiarowego  
Fig. 2. The measuring system diagram

## 2.1. Pomiary porównawcze i kontrolne

Dla potwierdzenia trafności oceny i wyboru właściwego doboru kolimatorów przeprowadzono pomiary kontrolne wybranej geometrii dla próbek pochodzących z innej niż użyte do badań, kopalni. Pomiary wykonano w analogiczny sposób jak wcześniejsze. Dla pełniejszego obrazu zalet wybranego układu kolimatorów wykonano również pomiary kalibracyjne z wykorzystaniem obecnie stosowanego pojemnika źródeł izotopowych C/A-2.

Przyjmując, jako kryterium oceny niepewność pomiaru  $1\sigma$  stwierdzono, że model pojemnika C/A z nowym wzajemnym rozmieszczeniem źródeł i zmianą kolimacji promieniowania, poprawia wyniki pomiaru. Poprawa dokładności pomiaru wynika z większej reprezentatywności pomiaru poprzez wykorzystanie całkowitej powierzchni czynnej promieniowania Am-241 oraz lepszej kolimacji promieniowania Cs – 137, odpowiedzialnego za kompensację grubości warstwy.

Obliczone zależności wykazały, że kompensacja grubości warstwy w przypadku modelu pojemnika jest lepsza niż dla pojemnika C/A-2. Jest to wynikiem lepszej kolimacji promieniowania Cs – 137. Dodatkowo stwierdzono, że w przypadku modelu pojemnika C/A, pomiar grubszych warstw węgla, tj. 25 – 30 cm, jest obciążony mniejszym błędem, a do detektora dociera mniej „fałszywych”, rozproszonych impulsów promieniowania o energii około 60 keV, niezwiązanych z absorpcją, których źródłem jest izotop cezu.

Rozpatrując wzrost intensywności promieniowania, otrzymano wynik nieco mniejszy od oczekiwanego. Wartość mocy dawki, mierzonej w osi otworu kolimacyjnego przy pojemniku C/A-2 jest na poziomie 45,95  $\mu\text{Sy/h}$ , a w modelu 53,95  $\mu\text{Sy/h}$ , czyli nastąpił wzrost o 17,4%. Jest to sumaryczny wzrost strumienia fotonów z obu izotopów, ale faktycznie doszło do osłabienia strumienia z izotopu cezu (wzrost długości drogi i zmniejszenie średnicy otworu kolimacyjnego) i zwiększenie o 40% wartości strumienia fotonów z Am-241, na czym zależało nam specjalnie.

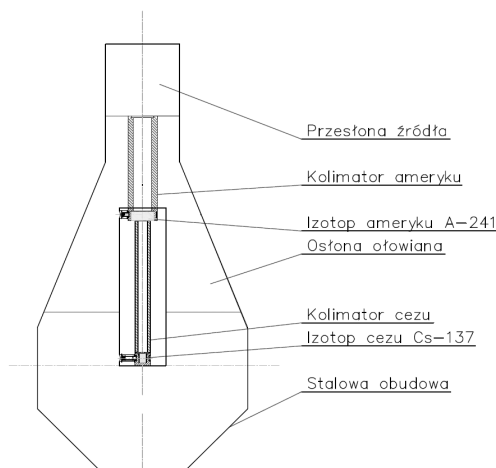
## 3. Materiałowa optymalizacja kolimatorów źródeł

Zebrane wyniki pozwoliły na opracowanie i budowę prototypu pojemnika C/A-2R (patrz rys.3) oraz realizację drugiej fazy pracy.

Rozsunięcie obu źródeł dało możliwość doboru materiału ścianek kolimatorów indywidualnie dla każdego izotopu.

Chcąc przybliżyć nieco to zagadnienie, trzeba w tym miejscu przypomnieć spektrogramy widm obu izotopów i zakresy ich energii, jakie wykorzystuje się w opracowywanych urządzeniach oraz mechanizm wzajemnego oddziaływania promieniowania gamma z różnymi substancjami.

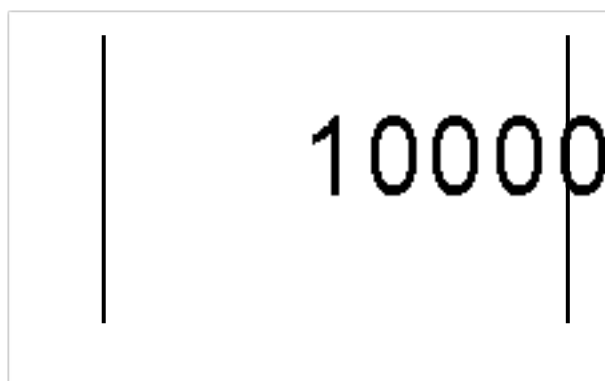
Pomiar popiołu w popiolomierzach ciągłych metodą absorpcyjną polega na rejestracji osłabienia wiązki promieniowania gamma po przejściu przez warstwę węgla z dwóch źródeł: Am – 241 oraz Cs – 137.



Rys. 3. Idea konstrukcji pojemnika C/A-2R  
Fig. 3. Conception of C/A-2R container construction

Promieniowanie ze źródła Am – 241 odpowiedzialne jest za prawidłowe wyznaczenie zawartości popiołu, natomiast promieniowanie Cs – 137, za pomiar grubości warstwy. Wzajemna kompilacja tych dwóch pomiarów pozwala na wyznaczenie zawartości popiołu z dobrą dokładnością dla węgla o dużej zmienności zawartości popiołu i grubości warstwy.

Na rys. 4 pokazano widmo promieniowania gamma ze źródła Am – 241 po przejściu przez warstwę węgla oraz bez osłabienia. Przedział energii wykorzystywany w pomiarach zawartości popiołu metodą absorpcyjną zaznaczono dwiema pionowymi liniami. Jest to zakres niskich energii pomiędzy 10 – 35 keV oraz 45 – 70 keV.

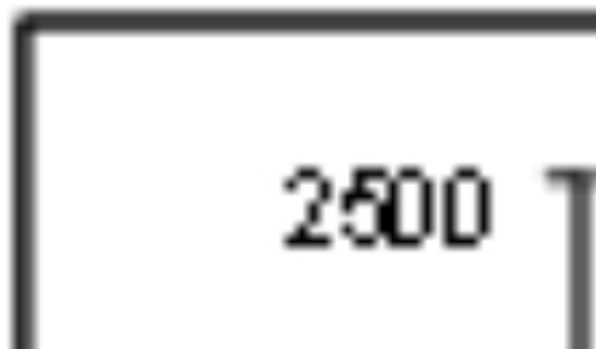


Rys. 4. Widma promieniowania gamma pochodzące ze źródła Am – 241  
Fig. 4. The gamma radiation spectrum of Am-241 radioactive source

Ważne z punktu widzenia dokładności pomiaru jest, aby jak największa liczba zliczeń z tego przedziału docierała do detektora promieniowania. W związku z tym należy minimalizować straty (absorpcję) kwantów już na początku ich drogi, czyli w kolimatorze pojemnika.

Na rys. 5 pokazano widmo izotopu Cs – 137. Jak widać na wykresie, widmo składa się z kilku pików energetycznych. W pomiarach popiołu metodą absorpcyjną wykonywanych w Instytucie EMAG wykorzystywany jest wyłącznie pik o energii 660 keV. Liniami pionowymi zaznaczono przedział energetyczny, jaki jest wykorzystywany bezpośrednio w pomiarach.

Zakres energii spoza przedziału pomiarowego (pionowe linie), jest niekorzystny pod względem pomiarowym.

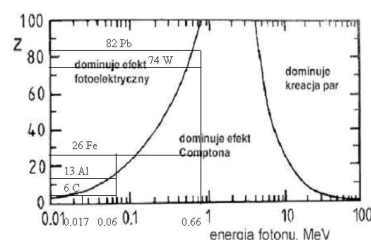


Rys. 5. Widmo promieniowania gamma pochodzące ze źródła Cs - 137  
Fig. 5. The gamma radiation spectrum of Cs-137 radioactive source

W związku z tym, należy tak dobrać materiał, z jakiego jest wykonany kolimator dla tego źródła, który z jednej strony osłabiłby niekorzystne pod względem pomiarowym kwanty gamma, a z drugiej nie wpływałby na te, o pożądanym energiiach.

Wzajemne oddziaływanie promieniowania gamma z różnymi substancjami może przebiegać wieloma drogami, ale trzy zjawiska mają zasadnicze znaczenie. Są to: fotoabsorpcja (efekt fotoelektryczny), efekt Comptona i tworzenia par. Zjawisko tworzenia par występuje dla energii kwantów gamma powyżej 1 MeV, które w przypadku popiolomierzy absorpcyjnych nie występują. Efekt fotoelektryczny z kolei, nasila się wraz ze zmniejszaniem się energii kwantów promieniowania gamma. Ze względów pomiarowych w metodzie absorpcyjnej ma to swoje złe i dobre strony.

Decydującym zjawiskiem oddziaływania promieniowania gamma z materią w przypadku oznaczenia zawartości popiołu metodą absorpcyjną ma zjawisko Comptona, w którym foton gamma ulega zderzeniu z zewnętrznym elektronem atomu substancji pochłaniającej, przy zachowaniu zarówno energii, jak i pędu; a foton oddaje część swojej energii, zmieniając pierwotny kierunek drogi.



Rys. 6. Obszary w płaszczyźnie liczby atomowej absorbenta od energii fotonu, w których dominują poszczególne procesy oddziaływania promieniowania gamma z materią. Linie wyznaczają procesy, dla których prawdopodobieństwo zajścia dwóch odpowiednich procesów jest jednakowe [2]

Fig. 6. Regions on the plane of relation between atomic number of absorber and photon energy in which predominate individual processes of gamma radiation interaction with matter. The lines determine processes for which probability of two corresponding processes is equal [2]

Na rys. 6 przedstawiono sposoby oddziaływania promieniowania gamma z materią w zależności od energii kwantu oraz liczby masowej absorbentu. Analizując ten rysunek widać, że dla zakresu energii pomiarowej promieniowania Cs – 137, optymalnym mate-

riałem na wykonanie kolimatora w zrealizowanym pojemniku jest ołów Pb, o liczbie atomowej 82; wyższą liczbę atomową ma tylko bizmut i uranowce. Dla Pb, w interesującym zakresie energii dominujący jest korzystny efekt Comptona, a jednocześnie pozostała część energii tego źródła (poniżej 500 keV), znajdzie się w obszarze fotoabsorpcji i częściowo pochłonięta będzie powodować mniejsze zakłócenia pomiaru.

Inna sytuacja jest w przypadku źródła Am – 241. W pomiarze wykorzystywane jest praktycznie całe widmo. Chcąc, aby fotony emitowane z tego źródła znalazły się w obszarze dominacji efektu Comptona, materiał, z którego powinien być wykonany kolimator powinien mieć liczbę masową poniżej 13. W praktyce możliwe do zastosowania są: glin, magnez i węgiel, w postaci grafitu lub włókna węglowego lub trudno dostępne: lit, beryl i bor.

Dotychczas w pojemnikach stosowano głównie dwa materiały do wykonania kolimatorów: ołów Pb oraz stal Fe, rzadziej msiądz. Analizując rys. 6 widać, że dla pojemnika, w którym źródła izotopowe są umieszczane razem obok siebie, optymalizacja materiałowa kolimatora nie była możliwa. To raczej był wybór mniejszego zła, umożliwiając przeprowadzenie pomiarów, ponieważ nie istnieje materiał, który spełniałby warunki dla optymalizacji obu izotopów jednocześnie.

#### 4. Podsumowanie

Efekt przeprowadzonej optymalizacji materiałowej kolimatorów zaprezentowano w tabeli 1, przedstawiając wyniki pomiarów mocy dawki w osi otworu kolimacyjnego przy jego wylocie. Wykonano pomiary dawek dla kolimatorów wykonanych z żelaza Fe, ołowiu Pb, glinu Al oraz grafitu C.

Różnica w mocy dawki pomiędzy modelem pojemnika, a prototypem wynika z zastosowania stali w kolimatorze prototypu, której głównym składnikiem jest żelazo o liczbie atomowej 23.

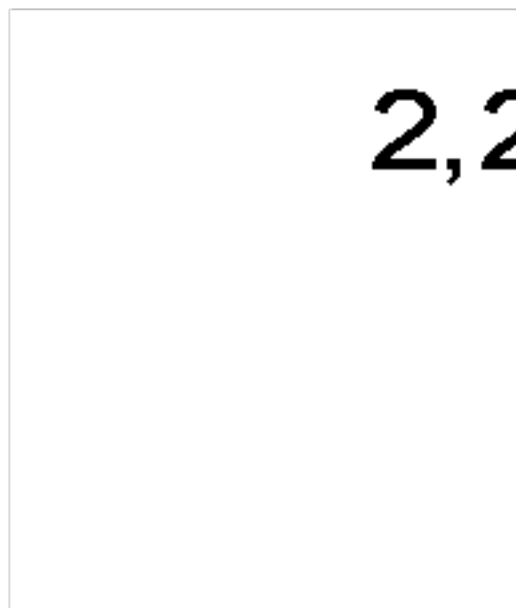
Tab. 1. Pomiary mocy dawki promieniowania gamma dla kolimatorów wykonanych z różnych materiałów

Tab. 1. Dose rate of gamma radiation measurements for collimators made of different materials

Miejsce pomiaru	Pojemnik	Dawkomierz komorowy Równoważnik mocy dawki [ $\mu\text{Sv/h}$ ] Wartości nie zawierają tła promieniowania /średnia z pięciu pomiarów/
Oś symetrii wiązki Cs-137 i Am-241	C/A-2 Pb	45,95
	Model Pb/Pb	53,95
	Prototyp C/A-2R Fe/Fe	101,25
	Prototyp C/A-2R kolimator Pb/Al	126,44
	Prototyp C/A-2R kolimator Pb/C	178,16

Odnosząc te wartości do rys. 6, można zauważyć, że dla żelaza zakres energii fotonów pozostających w obszarze „efektu Comptona” znacznie się rozszerza i obejmuje zakres 100-700 keV. Efektem jest wzrost ilości fotonów i łącznej dawki w obszarze otworu kolimatora pojemnika, ale o energii niepożądaney. Kolejne dwie pozycje w tabeli pokazują wzrost mocy dawki w porównaniu do prototypu pojemnika. Kolimatory dla źródła Am – 241 zostały w tych przypadkach wykonane z materiałów, w zakresie których, fotony emitowane przez to źródło znajdują się w obszarze, gdzie dominuje efekt Comptona, tj. glinu (liczba atomowa 13) i grafitu (liczba atomowa 6).

Skuteczność wprowadzonych zmian materiałowych najlepiej prezentuje rys. 7, przedstawiający promieniowanie gamma izotopów A-241 i C-137, umieszczonych w pojemniku C/A-2R, a kolimowanych odpowiednio: izotop cezu kolimatorem z ołowiu, a izotop ameryku z grafitu.



Rys. 7. Znormalizowane widmo promieniowania gamma izotopów A-241 i C-137 umieszczonych w pojemniku C/A-2R

Fig. 7. Normalized gamma radiation spectrum of Am-241 and Cs-137 radioisotopes placed in C/A-2R container

#### 5. Wnioski

Przeprowadzone pomiary i badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Rozdzielenie źródeł promieniotwórczych Am – 241 i Cs – 137 oraz zastosowanie do każdego z nich indywidualnego kolimatora, a także wykorzystanie całej powierzchni czynnej izotopu Am – 241 (kolimator  $\phi = 12$  mm), poprawia dokładność pomiaru zawartości popiołu.
2. Zmniejszenie średnicy kolimatora izotopu Cs – 137, z 10 mm na 6 mm poprawia kolimację promieniowania, co pozwala na pomiar popiołu z dobrą dokładnością w warstwach 250 – 300 mm.
3. Przeprowadzone badania i pomiary pozwoliły na optymalizację materiałów kolimatora izotopu cezu, jak i izotopu ameryku przy zachowaniu możliwie korzystnej wartości wielkości wiązki fotonów o pożądanych energiach. Wybrany wariant z ołowianym kolimatorem izotopu cezu i grafitowym kolimatorem izotopu ameryku pozwala na otrzymanie na wylocie z pojemnika wiązki fotonów prawie czterokrotnie większej ( $178,16 \mu\text{Sv/h} : 45 \mu\text{Sv/h} = 3,96$ ), od tej otrzymywanej ze „starego” pojemnika C/A-2, a co najistotniejsze, o pożądanej w wykonywanych pomiarach strukturze energetycznej.

Wybrane cechy pojemnika, określające geometryczne odległości rozdzielonych źródeł  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{241}\text{Am}$  oraz sam fakt ich rozdzielania, zastrzeżono w zgłoszeniu patentowym.

#### 6. Literatura

- [1] Glasstone S.: Podstawy techniki reaktorów jądrowych. PWN, 1958.
- [2] Pluta J.: Metody i techniki jądrowe w środowisku, przemyśle i medycynie. 2004.
- [3] Skarbiński M., Skarbiński J.: Technologiczność konstrukcji maszyn. WNT, 1987.
- [4] Celiński Z.: Energetyka jądrowa. PWN, 1991.

