

Pochłanianie promieniowania gamma w taśmach przenośnikowych jako czynnik ograniczający stosowanie urządzeń izotopowych

Absorption of gamma ray in conveyor belts as a limiting factor of applying devices with radioactive sources



Mgr inż. Michał Bonczyk*)



Dr hab. inż. Bogusław Michalik*)

Treść: Różne metody izotopowe stosowane w systemach automatyki kontrolno-pomiarowej wykorzystywane są niemal we wszystkich gałęziach przemysłu, szczególnie w górnictwie i energetyce. Ich zaletą jest mnogość zastosowań oraz łatwość użycia, co jednocześnie rzutuje na ich dużą niezawodność. Wykorzystywane są między innymi przy badaniu przepływów, poziomów cieczy w zbiornikach, w pomiarach gęstości i masy (tzw. wagi izotopowe) czy w systemach wykonujących ciągły pomiar zawartości popiołu w węglu (tzw. popiołomierze absorpcyjne). Idea badania gęstości, masy czy zawartości popiołu polega na pomiarze wielkości osłabienia wiązki promieniowania gamma przechodzącej przez badany obiekt. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej kalibracji takiego systemu pomiarowego można uzyskać zależność funkcyjną między wielkością osłabienia a wymienionymi parametrami. Trudność tego typu badań polega na tym, że w typowym układzie pomiarowym, wiązka promieniowania gamma przechodzi nie tylko przez badany obiekt, ale również przez taśmę transportera, której obecność istotnie wpływa na wynik pomiaru. Dzieje się tak dlatego, że pewna część promieniowania zostaje pochłonięta już w taśmie. Praca traktuje o wpływie obecności taśm transporterowych na wyniki pomiarów urządzeniami wykorzystującymi źródła promieniotwórcze.

Abstract: Industrial automation systems with radioactive sources are applied in almost all branches of industry, especially in the mining and energy ones. They are very easy to apply and strongly reliable. Radioactive sources are used in measuring the flow, levels of media in containers, density, mass and ash content in coal. These measurements rely on measurement of gamma-ray absorption which is the matter of concern. After appropriate calibration of such a measurement system, one is able to obtain relationship between absorption of radiation and mass or ash content. The major difficulty is additional absorption in conveyor belts. This additional absorption in belts usually is non-negligible. The presented work describes the influence of additional absorption in conveyor belts on the results of measurements which are performed by use of the devices with radioactive sources

Słowa kluczowe:

taśmy przenośnikowe, absorpcja promieniowania gamma

Key words:

conveyor belts, absorption of gamma ray

1. Wprowadzenie

Szeroko stosowane w górnictwie wagi izotopowe umożliwiają pomiar masy urobku jeszcze w fazie transportu taśmą przenośnikową. Idea tej metody pomiaru masy polega na badaniu stopnia absorpcji promieniowania emitowanego ze źródła izotopowego (np. ^{241}Am , 59,4 keV) umieszczonego pod taśmą transportującą urobek. Umieszczony na odpowiedniej wysokości ponad taśmą licznik zawierający na

ogół scyntylicyjny lub gazowy detektor promieniowania rejestruje docierającą do niego wiązkę promieniowania. Głównymi procesami odpowiedzialnymi za osłabienie wiązki promieniowania są absorpcja fotoelektryczna oraz zjawisko Comptona [6]. Prawdopodobieństwo wystąpienia tych zjawisk silnie zależy od składu pierwiastkowego materii penetrowanej przez wiązkę promieniowania, gęstości, grubości warstwy oraz oczywiście od energii promieniowania. W przypadku wag izotopowych stosowanych w górnictwie zakłada się stały skład chemiczny (w pewnych granicach tolerancji) badanego materiału. W związku z tym można przyjąć, że

*) Śląskie Centrum Radiometrii Środowiskowej, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

osłabienie wiązki promieniowania podczas transmisji zależy tylko od gęstości powierzchniowej, czyli ilości materiału na powierzchni taśmy zgodnie z prawem Lamberta-Beera. Po odpowiedniej kalibracji urządzenia można w łatwy i szybki sposób uzyskać informację o masie urobku znajdującego się aktualnie na taśmie.

Zasada działania popiołomierzy absorpcyjnych jest nieco bardziej skomplikowana. Zwykle, urządzenia te wykorzystują dwa źródła izotopowe (najczęściej ^{241}Am o energii promieniowania 59,4 keV oraz ^{137}Cs o energii promieniowania 661,7 keV). Różnice w absorpcji promieniowania o różnej energii w materiale urobku zależą od jego składu chemicznego. Faza mineralna tworząca popiół po spaleniu węgla różni się istotnie od węgla składem chemicznym. Zatem obserwowane zmiany absorpcji promieniowania w materiale urobku będą zależały pośrednio od zawartości popiołu. Po odpowiedniej kalibracji układ może z dobrą dokładnością mierzyć zawartość popiołu bezpośrednio w materiale transportowanym na taśmie [3, 4]

W warunkach rzeczywistych, taśma, która znajduje się pomiędzy źródłem izotopowym a badanym materiałem i detektorem powoduje dodatkowe osłabienie wiązki promieniowania. Taśma ta zazwyczaj w sposób istotny różni się składem chemicznym od materiału (urobku) będącego przedmiotem pomiaru. Jak już zaznaczono, dla niskich energii promieniowania, skład chemiczny (a dokładniej mówiąc, liczby atomowe pierwiastków tworzących materiał, z którego zbudowana jest taśma) jest istotnym czynnikiem wpływającym na ostateczną wielkość osłabienia promieniowania, a tym samym na czułość i precyzję całego układu pomiarowego. W krańcowym przypadku, zbyt dużego osłabienia promieniowania powodowanego obecnością taśmy, stosowanie wagi izotopowej lub popiołomierza staje się niemożliwe.

Kryterium możliwości użycia danej taśmy w systemach zawierających wagi izotopowe czy popiołomierze stanowi wyznaczany eksperymentalnie *współczynnik absorpcji promieniowania* w materiale taśmy. Praktyka krajowych producentów urządzeń izotopowych wskazuje, że do poprawnego funkcjonowania wagi czy popiołomierza, konieczne jest, aby obecność taśmy nie powodowała większego osłabienia wiązki niż około 35 % jej pierwotnego natężenia. Okazuje się jednak, że nie wszystkie taśmy spełniają ten wymóg. Nie funkcjonuje również nawet żaden opublikowany opis metodyki pomiaru owego współczynnika (stan na koniec 2014 roku). Odpowiednie stanowisko badawcze umożliwiłoby optymalizację konstrukcji taśmy (grubość, wytrzymałość) względem składu pierwiastkowego materiałów użytych do jej budowy.

Co więcej, żadne laboratorium w Polsce nie ma w swojej ofercie badania określającego wielkość pochłaniania promieniowania w materiale, z którego zbudowana jest taśma. Opisana w artykule metodologia została wdrożona w Pracowni Spektrometrii Promieniowania Gamma Głównego Instytutu Górnictwa oraz została włączona do oferty badawczej instytutu.

2. Transmisja promieniowania gamma

Część promieniowania fotonowego (elektromagnetycznego) o długości fali poniżej 1 \AA (10^{-10} m), co odpowiada energii promieniowania powyżej 12 keV, nazywamy promieniowaniem gamma (jądrowym). Promieniowanie takie przechodząc przez materię wywołuje wiele zjawisk fizycznych, które powodują osłabienie natężenia pierwotnie padającej wiązki. Są to m.in. zjawisko fotoelektryczne, Comptona, kreacja par. Część z tych zjawisk może być wyjaśniona wyłącznie w oparciu o nowoczesną mechanikę kwantową. Ogólnie jednak można powiedzieć, że wszystkie te zjawiska, powodują:

- zmianę natężenia promieniowania,
- zmianę energii – długości fali promieniowania,
- zmianę kierunku propagacji promieniowania,
- zmianę typu promieniowania, a co za tym idzie jego właściwości.

Makroskopowo, osłabienie wiązki promieniowania przechodzącego przez materię można opisać za pomocą prawa Lamberta-Beera

$$I = I_0 e^{-\mu dx} \quad (1)$$

gdzie:

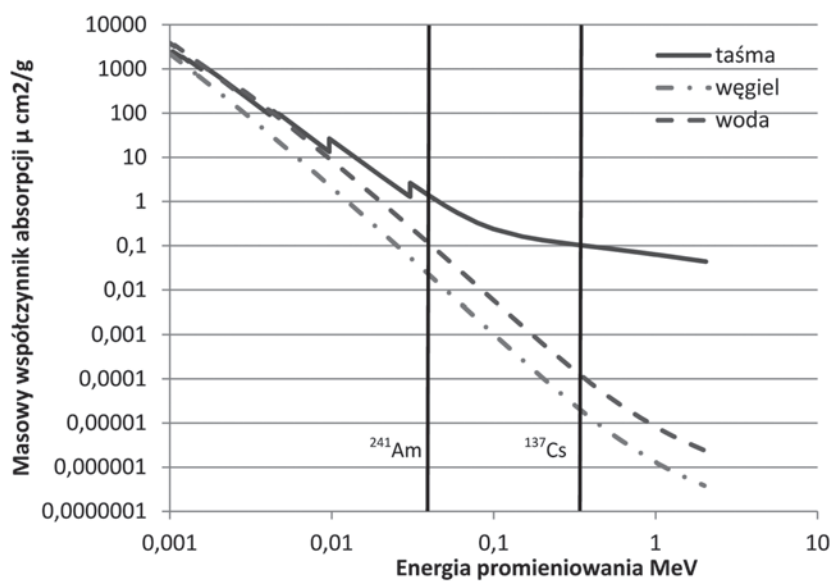
- I_0 – natężenie wiązki fotonów padającej na dany ośrodek,
- I – natężenie wiązki po przejściu przez ośrodek o gęstości d [g cm^{-3}] i grubości x [cm],
- μ – masowy liniowy współczynnik absorpcji [cm^2g^{-1}]

Aby wzór (1) można było stosować do przypadku taśm transportowanych, masowy liniowy współczynnik absorpcji μ musi uwzględniać wszystkie zjawiska związane z transportem promieniowania w materiale taśmy. Skupmy zatem uwagę na zakresie promieniowania gamma od 60 do 662 keV, co odpowiada dwóm najczęściej stosowanym źródłom zawierającym izotopy – ^{241}Am i ^{137}Cs . W tym zakresie dominującym zjawiskiem odpowiedzialnym za absorpcję promieniowania gamma przechodzącego przez taśmę jest zjawisko fotoelektryczne oraz, w mniejszym stopniu, zjawisko Comptona. Zależność liniowego masowego współczynnika absorpcji od energii promieniowania fotonowego dla materiału taśmy transportowej, węgla oraz wody przedstawia wykres na rysunku nr 1. Natomiast na wykresie (rysunek 2) przedstawiono zależność liniowego masowego współczynnika absorpcji od liczby atomowej Z materiału, w którym rozchodzi się promieniowanie gamma o energii 60 keV.

Reasumując powyższe rozważania możemy uznać, że skolimowana wiązka promieniowania gamma o określonej energii (długości fali) przechodząc przez materię – w rzeczywistym przypadku przez taśmę przENOŚNIKOWĄ i zgromadzony na niej urobek, ulega osłabieniu. Natężenie promieniowania zostaje zredukowane, w związku z czym, układ detekcyjny rejestruje zmniejszoną liczbę docierających kwantów promieniowania. Zjawisko to, zachodząc w urobku stanowi podstawę działania wag izotopowych, ale w przypadku samej taśmy jest wysoce niepożądane. Z punktu widzenia układu pomiarowego, jakim jest waga izotopowa, ważne jest, aby pochłanianie promieniowania gamma w taśmie było jak najmniejsze. Im mniej obecność taśmy będzie wpływać na pomiar osłabienia wiązki promieniowania, tym ostateczny wynik pomiaru (masa urobku, zawartość popiołu, etc.) będzie dokładniejszą.

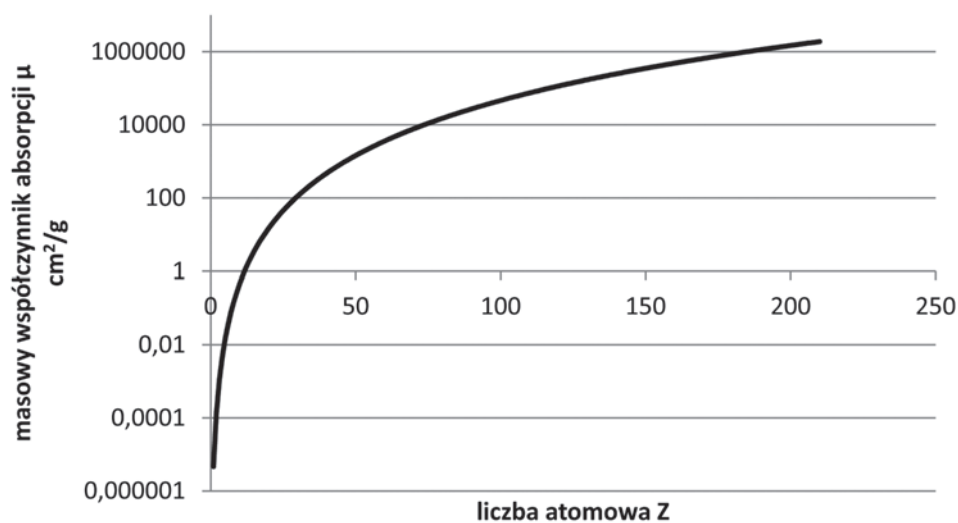
3. Badanie absorpcji promieniowania w taśmach

Celem sprawdzenia, a następnie porównywania własności absorpcyjnych różnych taśm, został zbudowany układ pomiarowy wykorzystujący detektor germanowy HPGe (High Purity Germanium Detector) wraz z wielokanałowym analizatorem amplitudy impulsów. Próbką badanej taśmy (wycinek ok. $150 \times 150 \text{ mm}$) umieszczana jest bezpośrednio na detektorze, ponad nią instalowane jest izotopowe źródło promieniotwórcze – zawierające ^{241}Am . Wysokość źródła ponad taśmą i detektorem oraz jego pozycję w płaszczyźnie poziomej można regulować za pomocą specjalnego pozycjonera (rys. 3 a). Pozycjoner umożliwia zachowanie identycznych warunków pomiaru dla wszystkich badanych próbek. Aby zredukować wpływ promieniowania tła, układ pomiarowy jest umieszczony w ołowianym domku osłonnym (grubość ścian – 10 cm).



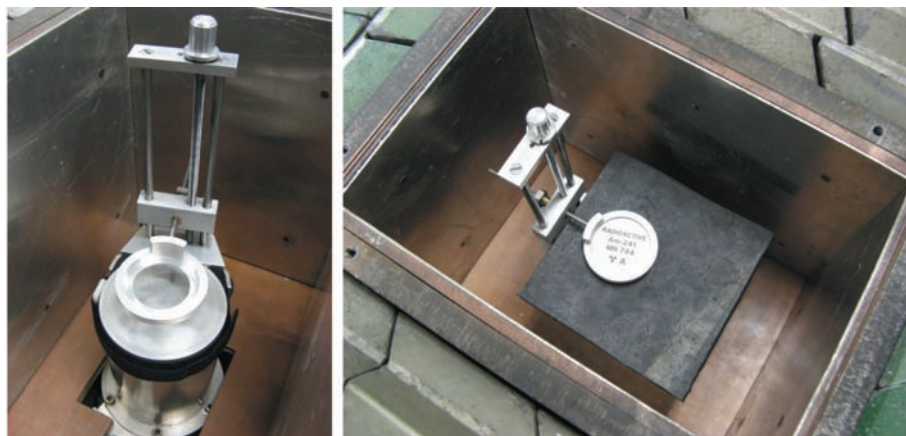
Rys. 1. Zależność masowego współczynnika absorpcji fotoelektrycznej od energii promieniowania. Obliczenia wykonane za pomocą modelu XCOM [1, 2]

Fig. 1. The relationship between linear mass absorption coefficient and energy of radiation. The calculation has been done by XCOM model [1, 2]



Rys. 2. Zależność masowego współczynnika absorpcji fotoelektrycznej od liczby atomowej Z [1, 2]

Fig. 2. The relationship between linear mass absorption coefficient and atomic number Z [1, 2]



Rys. 3. Stanowisko do pomiarów absorpcji promieniowania: a – detektor wraz z pozycjonerem źródła, b – układ z umieszczoną taśmą i źródłem ^{241}Am

Fig. 3. Setup for radiation attenuation measurements: a – the detector with source positioner; b – the setup with tested belt and ^{241}Am source (b)

Dla opisanego zestawu pomiarowego możemy sformułować prosty wzór na obliczenie wartości absorpcji w badanym materiale – w tym przypadku taśmy przenośnikowej.

Współczynnik absorpcji promieniowania gamma w taśmie jest równy

$$W = \frac{S_0 - S_t}{S_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

S_0 – liczba impulsów docierających do detektora w przypadku braku taśmy;

S_t – liczba impulsów docierających do detektora po przejściu wiązki przez taśmę.

Obliczony współczynnik informuje jaką część (procentowo) pierwotnego natężenia promieniowania o danej energii zostanie zaabsorbowana w materiale taśmy.

4. Przeprowadzone pomiary

W ramach pracy wykonano pomiar współczynnika absorpcji w 40 próbkach taśm transporterowych różnych typów, pochodzących z różnych serii produkcyjnych. Próbki taśm wykorzystywanych do badań miały grubość 19,5 – 20,5 mm. Taśmy były zbudowane z kompozytów tekstylny-gumowych. Próbki do badań stanowiły fragmenty taśmy o wymiarach 150 x 150 mm. Opisanie stanowisko pomiarowe wykorzystujące układ spektrometryczny umożliwiło pomiar osłabienia wiązki promieniowania gamma zarówno w wyniku absorpcji fotoelektrycznej, jak i zjawiska Comptona. Obserwowano duże zróżnicowanie wyznaczonego współczynnika absorpcji badanej serii próbek taśm. Uzyskane wyniki wahały się od 33 do 42 %. Rozkład wyników przedstawiono na wykresie (rysunek 4).

Spośród 40 badanych próbek tylko 15 charakteryzowało się współczynnikiem absorpcji mniejszym niż 35 %. Jak już zaznaczono, praktyka krajowych producentów taśm oraz producentów urządzeń izotopowych pokazuje, że do prawidłowego działania izotopowych układów pomiarowych, pochłanianie promieniowania w taśmie nie powinno przekraczać 35 %. Oznacza to, że blisko 2/3 taśm nie spełnia tego warunku.

Kolejnym interesującym problemem jest fakt, że zmierzona wartość współczynnika absorpcji różniła się nawet dla próbek należących do tej samej serii produkcyjnej. W ramach pracy wykonano pomiar współczynnika absorpcji dla 3 serii zawierających 4 próbki. Wyniki przedstawiono w tabeli.

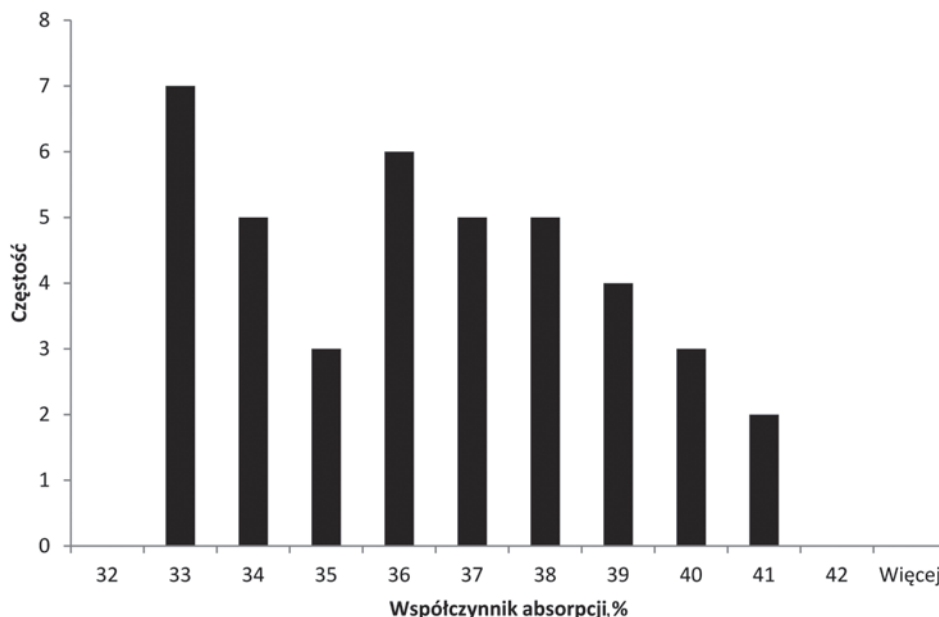
Tabela 1. Współczynnik absorpcji dla próbek taśm należących do jednej serii produkcyjnej

Table 1. Attenuation coefficient in belts belonging to one manufacturing series

Nr próbki	1	2	3	4
Seria 1	33,4	33,3	35,0	32,2
Seria 2	37,0	37,1	38,9	39,9
Seria 3	39,1	38,2	36,5	36,1

Największa różnica zmierzonej wartości współczynnika absorpcji (dla próbek 1 i 4 w serii nr 3 $W: 36,1 \div 39,1 \%$) wyniosła 3 punkty procentowe, czyli ponad 8 % względem mniejszego z nich. Może to być spowodowane niestabilnością procesu produkcyjnego oraz możliwymi zanieczyszczeniami mieszanek gumowych. Opisująca w pracy metoda pomiaru współczynnika absorpcji w taśmach może być wykorzystywana jako jedno z narzędzi kontroli jakości procesu produkcyjnego taśm transporterowych.

Wartość liniowego masowego współczynnika absorpcji μ we wzorze (1) jest zależna od energii promieniowania oraz od składu pierwiastkowego materiału, w którym to promieniowanie się rozchodzi. W przypadku urządzeń wykorzystujących izotopy promieniotwórcze energia promieniowania jest określona przez zastosowanie konkretnego izotopu, w związku z tym liniowy masowy współczynnik absorpcji μ oraz ostatecznie wartość współczynnika absorpcji będzie zależały wyłącznie od składu pierwiastkowego. Należy przy tym nadmienić, że zależność od stężenia poszczególnych pierwiastków nie jest jednakowa. Prawdopodobieństwo osłabienia wiązki na skutek zjawiska absorpcji fotoelektrycznej silnie zależy od liczby atomowej pierwiastków wchodzących w skład materii, przez którą to promieniowanie przechodzi. Im liczba atomowa będzie wyższa, tym większe prawdopodobieństwo absorpcji.



Rys. 4. Rozkład wyznaczonych wartości współczynnika absorpcji w badanej serii próbek taśm

Fig. 4. Distribution of the obtained values of attenuation factor in the tested samples of belts

A ponieważ prawdopodobieństwo to jest proporcjonalne do piątej potęgi liczby atomowej (rysunek 2), zatem nawet niewielkie ilości ciężkich pierwiastków (np. zanieczyszczenia) w materiale taśmy będą powodować istotne podwyższenie wartości współczynnika absorpcji. Ponadto nawet niewielkie zmiany w stężeniu pierwiastków najcięższych będą finalnie implikować duże zmiany wartości współczynnika absorpcji.

5. Podsumowanie

W ramach pracy badano absorpcję promieniowania gamma w próbkach taśm transporterowych wykorzystywanych w przemyśle górnym i energetycznym. Sformułowano definicję współczynnika absorpcji promieniowania oraz przedstawiono wzór na współczynnik absorpcji W . Zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe do pomiaru tego współczynnika. Wykonano pomiar absorpcji promieniowania w 40 próbkach taśm transporterowych pochodzących od polskich producentów. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Wyznaczony zakres zmienności wartości współczynnika absorpcji w badanych próbkach wynosi 32,2 – 41,0 %.
2. Dla około 1/3 wszystkich badanych próbek taśm współczynnik absorpcji był mniejszy do 35 %.
3. Wykazano niejednorodność współczynnika absorpcji w próbkach taśm pochodzących z jednej serii produkcyjnej (największa różnica wynosiła 8 %).
Wiedza uzyskana w ramach artykułu może być wykorzystana w pracach badawczo-rozwojowych prowadzonych przez producentów taśm transporterowych w celu ich dalszego doskonalenia oraz dostosowania ich do wykorzystywanych w przemyśle urządzeń izotopowych oraz producentów urządzeń kontrolno-pomiarowych wykorzystujących metodę absorpcji promieniowania gamma do badań materiałów transportowanych na przenośniku taśmowym.

Literatura

1. *Berger, M.J. and Hubbell, J.H.*: XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, NBSIR 87-3597 1987.
2. *Berger, R.T.*: The X- or Gamma-Ray Energy Absorption or Transfer Coefficient: Tabulations and Discussion, Rad. Res. 15, 1961 1-29.
3. *Róg, L., Kozłowski, A., Kryca, M., Michalik, B., Smyła, J.*: Technologiczny pomiar zawartości popiołu w węglu surowym – popiołomierz RODOS-EX, „Przegląd Górniczy” (w druku).
4. *Rysiecki S., Gola M., Sobierajski W.*: Popiołomierz absorpcyjny z mobilnym układem pomiarowym”, „Przegląd Górniczy” 2013, Nr 6.