

Marcin ZYCH¹, Leszek PETRYKA², Robert HANUS³

¹AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA GEOFIZYKI

²AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ZASTOSOWAŃ FIZYKI JĄDROWEJ

³POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Badania przepływu dwufazowego ciecz - ciało stałe w rurociągu pionowym metodami radioizotopowymi Cześć 2. Wyznaczanie objętościowego natężenia przepływu ziaren fazy stałej

Dr inż. Marcin ZYCH

Absolwent Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W 2007 roku obronił pracę doktorską z zakresu zastosowań metod fizyki jądrowej w badaniach przepływów wielofazowych. Obecnie adiunkt w Katedrze Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. Zainteresowania naukowe: zastosowanie technik pomiarowych w badaniach procesów przemysłowych, analiza sygnałów.



e-mail: zych@novell.fj.agh.edu.pl

Dr inż. Leszek PETRYKA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od ukończeniu studiów w 1969 r. nauczyciel akademicki w AGH, obecnie adiunkt na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH. Zainteresowania naukowe: przepływy wielofazowe i analiza procesów przepływowych, zastosowania techniki jądrowej oraz analiza sygnałów.



e-mail: petryka@novell.fj.agh.edu.pl

Dr inż. Robert HANUS

Adiunkt w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się głównie zagadnieniami związanymi z modelowaniem i analizą sygnałów stochastycznych oraz statystycznymi metodami pomiaru opóźnienia. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji, członek Sekcji Aparatury i Systemów Pomiarowych KMIA PAN.



e-mail: rohan@prz.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono wykorzystanie metody radioizotopowej w badaniach przepływu mieszaniny ciecz - cząstki ciała stałego w rurociągu pionowym. W tej części pracy przedstawiono sposób pomiaru objętościowego natężenia przepływu fazy stałej przy pomocy absorpcji promieniowania gamma. Podstawą metody jest kalibracja zestawu wykorzystywanego do wyznaczenia zależności liczby zliczeń od koncentracji objętościowej fazy stałej w rurociągu. Opisano specjalnie wykonane stanowisko kalibracyjne i sposób prowadzenia pomiarów. Przedstawiono przykładowe wyniki i określono niepewność rozszerzoną wyznaczonego natężenia przepływu cząstek stałych, która w rozważanym przypadku wyniosła 10%.

Słowa kluczowe: przepływ dwufazowy, hydrotransport, metoda absorpcji promieniowania gamma, kalibracja.

Radioisotope evaluation of two phase liquid-solid flow in a vertical pipe Part 2. Determination of the volumetric flow rate of solid particles

Abstract

The paper presents an application of radioisotopes to determination of the solid phase volumetric flow rate in a hydromixture by calibration of the measuring set. It shows how the gamma absorption equipment consisting of two radioactive isotopes ²⁴¹Am and two scintillation probes can be applied to measurement of both solid particles velocity and volumetric concentration of a flow. In this case the mean volumetric flow rate of the solid phase is evaluated by the gamma radiation intensity recorded during the experiment. The paper is divided into five sections. The first is a short introduction to the subject of the paper. Section 2 presents the basis of the solid phase volumetric flow rate determination in a hydromixture method (Fig. 1, Eqs. 1 ÷ 4). Section 3 describes calibration of the measuring equipment. This section is divided into three parts, the first one presents the measurement geometry (Fig. 2), assumptions and basic equations. The second one describes the especially constructed calibration stand (Fig. 3).

The last one gives the obtained relation between the related intensity of radiation and the mean volumetric concentration of the solid phase (Fig. 4). The example of the measuring result is given in Section 4. The mean volumetric concentration of solid phase obtained from the experiment was $WRQ029 C_{VP} = 0,23 \pm 0,02$. In consequence, the mean flow rate of the solid phase in that experiment $Q_S = (10,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ was evaluated with the accuracy of 10%. Its extended uncertainty $U_{0,95}(Q_S) = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ was obtained due to the assumption of normal error distribution and the confidence level equal to 0,95. In Section 5 the authors summarise the results and conclude that the method described in this paper may be applied to many similar complex hydromixtures transported through pipelines.

Keywords: two phase flow, vertical hydrotransport, gamma absorption method, calibration.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki badań przepływu mieszaniny ciecz - cząstki ciała stałego w rurociągu pionowym, uzyskane na instalacji doświadczalnej zbudowanej w Laboratorium Wodnym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu [1]. Celem badań było opracowanie technologii pomiaru prędkości i objętościowego natężenia przepływu fazy stałej w rurociągu przy zastosowaniu metod radioizotopowych. Prace prowadzone były w ramach projektu wykorzystania hydrotransportu do wydobywania koncentracji polimetalicznych z Pacyfiku [2]. Niniejszą część artykułu poświęcono omówieniu sposobu wyznaczenia objętościowego natężenia przepływu fazy stałej w planowanej instalacji eksploatacyjnej. Rejestracja natężenia przepływu koncentracji, obok pomiaru ich liniowej prędkości, ma kluczowe znaczenie dla bezpiecznej eksploatacji rurociągów wydobywczych. Ich głównym celem jest bowiem minimalizacja nakładów energetycznych na transport przy niedopuszczaniu do zatykania rurociągów przez opadające ziarna.

Artykuł prezentuje stanowisko kalibracyjne oraz przykładowe wyniki pomiarów prędkości i koncentracji objętościowej modeli koncentracji w instalacji badawczej.

2. Metoda wyznaczenia objętościowego natężenia przepływu fazy stałej

Do opisu transportu dwufazowego używa się najczęściej takich parametrów jak: liniowa prędkość przepływu v , natężenie przepływu Q (masowe lub objętościowe) oraz koncentracja objętościowa fazy mniejszościowej C_V [3, 4].

C_V definiuje się jako stosunek objętości, którą zajmuje faza mniejszościowa V_S do objętości całej mieszaniny V :

$$C_V = \frac{V_S}{V} = \frac{V_S}{V_W + V_S}, \quad (1)$$

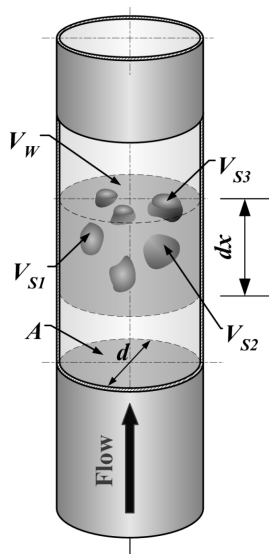
gdzie V_W to objętość cieczy, a $V_S = V_{S1} + V_{S2} + \dots$ stanowi sumę objętości cząstek stałych w analizowanym odcinku strumienia dx (rys. 1).

Przechodząc do granicznej wartości odcinka strumienia ($dx \rightarrow 0$), określa się koncentrację objętościową przekrojową [1]:

$$C_{VP} = \frac{A_S}{A} = \frac{A_S}{A_W + A_S}, \quad (2)$$

gdzie: $A = \pi d^2/4$ – przekrój poprzeczny rurociągu, d – średnica wewnętrzna rury; A_S i A_W – odpowiednio sumaryczne przekroje poprzeczne fazy stałej i ciekłej.

W praktyce koncentrację objętościową fazy stałej C_{VP} wyznacza się na podstawie sygnałów otrzymywanych z sond scyntylicyjnych dzięki wykorzystaniu zależności liczby zliczeń od koncentracji objętościowej fazy stałej w miejscu pomiaru. Kalibracja zestawu opartego na absorpcji promieniowania gamma omawiana jest w punkcie trzecim.



Rys. 1. Ilustracja wyznaczania koncentracji objętościowej C_{VP}
Fig. 1. Essential parameters for determining volume concentration C_{VP}

Dla transportowanych cząstek stałych:

$$Q_S = v_S A_S, \quad (3)$$

gdzie Q_S jest objętościowym natężeniem przepływu fazy stałej, a v_S średnią prędkością analizowanych ziaren wzdłuż osi rurociągu.

Zakładając, że warunki przepływu są ustalone, z (2) i (3) można uzyskać:

$$Q_S = v_S C_{VP} A. \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że objętościowe natężenie przepływu cząstek stałych (w tym przypadku transportowanych rurociągiem modeli ceramicznych, nazywanych dalej „kamieniami”) można określić na podstawie pomiaru średniej prędkości ziaren v_S oraz koncentracji C_{VP} fazy stałej. Wyznaczanie v_S z wykorzystaniem metody korelacji wzajemnej zarejestrowanych sygnałów omówiono w pierwszej części artykułu [5].

3. Kalibracja zestawu opartego na promieniowaniu gamma

Zmiany koncentracji (lub składu) fazy stałej w przepływającej mieszaninie powodują zmiany natężenia promieniowania γ padającego na sondy scyntylicyjne. W celu określania koncentracji objętościowej ziaren na podstawie sygnałów z detektorów konieczna jest kalibracja zestawu źródło promieniowania-sonda dla zadawanych wartości C_{VP} .

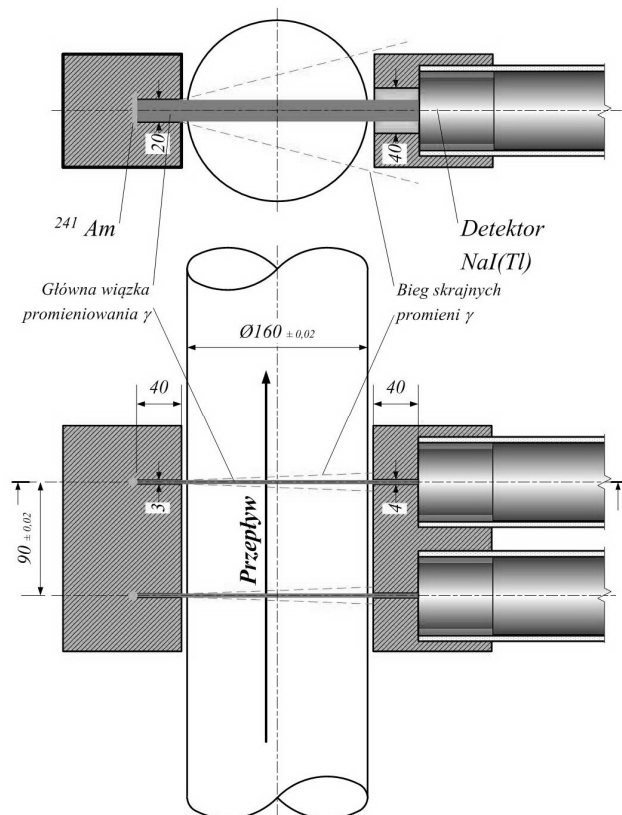
W celu przeprowadzenia prawidłowej procedury kalibracyjnej uwzględniono następujące czynniki [6-12]:

- rodzaj mieszaniny,
- geometria pomiaru,
- zjawiska towarzyszące transportowi promieniowania γ w mieszaninie,
- warunki zewnętrzne (temperatura otoczenia, wilgotność, zmienność tła promieniowania otoczenia, wpływ drugiego źródła promieniotwórczego) i ich stabilność.

Przy przeprowadzaniu kalibracji należy także pamiętać o wymogach ochrony radiologicznej, wynikających z przepisów polskiego Prawa Atomowego oraz zaleceń Międzynarodowej Agencji Atomowej (IAEA).

3.1. Geometria pomiaru

Średnica rurociągu, rodzaj mieszaniny oraz sposób jej transportu (rurociąg pionowy, poziomy lub kanał otwarty) to niezbędne informacje dla prawidłowego doboru geometrii pomiaru. Badania na instalacji doświadczalnej [5] wymagały odpowiednich kolimatorów źródeł i sond, aby wiązki promieniowania gamma prześwietlały cały lub reprezentatywną część przekroju poprzecznego rurociągu. Szczegóły geometrii zestawu, złożonego ze źródeł promieniowania γ ^{241}Am i sond scyntylicyjnych z kryształem NaI(Tl), przedstawiono na rysunku 2 (wszystkie wymiary podane są w milimetrach).



Rys. 2. Geometria pomiaru
Fig. 2. Measurement geometry

Rodzaj przepływającej mieszaniny ma istotny wpływ na to w jaki sposób promieniowanie gamma jest absorbowane i rozpraszane [1,6,10-12].

W przytaczanych badaniach używane były źródła ^{241}Am emitujące promieniowanie γ o energii 59,5 keV, stąd przy kalibracji można było uwzględnić następujące zjawiska:

- absorpcja promieniowania w wodzie i kamieniach,
- niekoherentne rozpraszanie promieni γ na elementach konstrukcyjnych rurociągu, kolimatorów oraz granicach ziaren.

Oslabienie promieniowania w mieszaninie o koncentracji C_{VP} , transportowanej rurociągiem można opisać równaniem:

$$\frac{dI}{dC_{VP}} + \mu_c I = 0, \quad (5)$$

gdzie: I – rejestrowane natężenie promieniowania, μ_c – względny objętościowy współczynnik absorpcji.

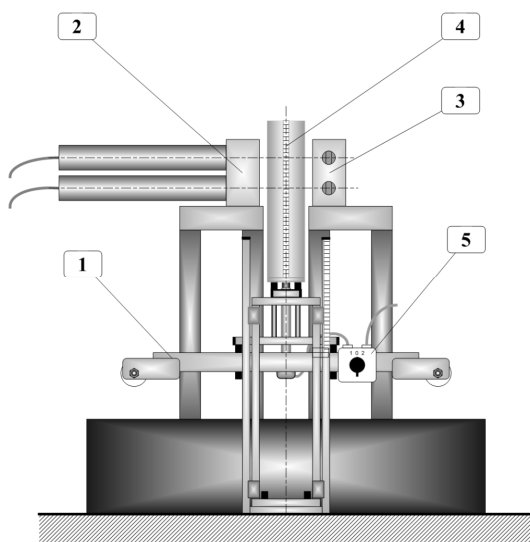
Dla występujących w czasie pomiarów warunków brzegowych:

$$I = I_0 e^{-\mu_c C_{VP}}, \quad (6)$$

gdzie I_0 jest natężeniem promieniowania rejestrowanym przez sondę, gdy rurociąg jest wypełniony tylko wodą ($C_{VP} = 0$).

3.2. Stanowisko kalibracyjne

W Laboratorium Sedymentologicznym Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH zbudowano specjalne stanowisko kalibracyjne, przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska kalibracyjnego (opis w tekście)
Fig. 3. Scheme of the calibration stand

Stanowisko składa się z uniwersalnego wózka pomiarowego (1), z możliwością przesuwu pionowego, sterowanego przełącznikiem (5) oraz kalibracyjnego odcinka rurociągu (4). Fragment rurociągu zawierający badaną mieszaninę dwufazową umieszczono tak samo jak w czasie pomiarów na instalacji, aby wiązki promieniowania kształtowane przez kolimatory źródeł (3) i sond (2) mogły prześwietlać rurociąg na zadanej wysokości.

Mieszaninę przygotowano tak, aby w badanym przekroju była odtworzona określona koncentracja kamieni:

- dla C_{VP} z zakresu 0,400 ÷ 0,700 modele wypełniały całą objętość rury,
- dla C_{VP} z zakresu 0,180 ÷ 0,400 wykorzystano dodatkowy cienkościenny plastikowy pojemnik w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 110 mm × 120 mm × 200 mm,

- dla C_{VP} z zakresu 0,010 ÷ 0,180 wykorzystano cienkościenny fragment stożka o średnicach $\varnothing 80 \div 85$ mm i wysokości 250 mm.

W celu wyznaczenia koncentracji, zaślepiony rurociąg był stopniowo wypełniany wodą, przy czym grubość każdej jej warstwy była oznaczana za pomocą dalmierza laserowego oraz suwmiarki. W trakcie uzupełniania wodą fragment rurociągu był umieszczony na wadze, co umożliwiało pomiar przyrostu masy kolejnej warstwy cieczy.

3.3. Zależność kalibracyjna

W czasie kalibracji koncentrację objętościową fazy stałej C_{VP} dla badanego przekroju rurociągu określano z zależności:

$$C_{VP} = 1 - C_{VW}, \quad (7)$$

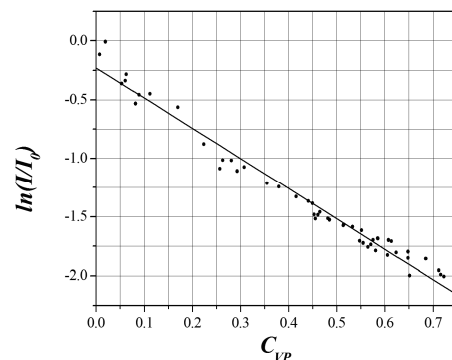
w której:

$$C_{VW} = \frac{4m_W}{\rho_W \pi d^2 dx}, \quad (8)$$

gdzie: m_W oznacza masę odpowiedniej warstwy cieczy, a ρ_W jej gęstość.

Dla każdej warstwy wykonano serię 18000 pomiarów natężenia promieniowania I_i . Poziom tła był każdorazowo mierzony przed oraz po prześwietleniu wszystkich warstw. Aby prawidłowo odwzorować rozkład kamieni w prześwietlanych fragmentach rurociągu, pojemnik dodatkowo obracano w trakcie pomiaru o kąty $45^\circ \div 180^\circ$.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano krzywą kalibracyjną przedstawioną na rysunku 4. Pozwala ona na wyznaczenie średniej koncentracji objętościowej fazy stałej w pomiarach na instalacji badawczej.



Rys. 4. Zależność względnych częstości zliczeń I/I_0 od koncentracji C_{VP}
Fig. 4. The relation between I/I_0 and volumetric concentration C_{VP}

Do uzyskanych wyników dopasowano metodą najmniejszych kwadratów prostą opisaną równaniem:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = aC_{VP} + b, \quad (9)$$

gdzie I_0 oznacza natężenie promieniowania zmierzone w zestawie z rysunku 2 przy rurociągu wypełnionym wodą, a wartości współczynników prostej regresji wynoszą: $a = -2,58 \pm 0,06$, $b = -0,23 \pm 0,03$, przy $R = 0,99$.

4. Przykładowe wyniki pomiarów i ich ocena

Złożoną niepewność wyznaczenia natężenia przepływu cząstek stałych Q_S na podstawie (4) można określić z zależności:

$$u_c(Q_s) = \sqrt{\left[\frac{\partial Q_s}{\partial v_s} u_c(v_s)\right]^2 + \left[\frac{\partial Q_s}{\partial C_{VP}} u_c(C_{VP})\right]^2 + \left[\frac{\partial Q_s}{\partial A} u_B(A)\right]^2} \quad (10)$$

gdzie:

- $u_c(v_s)$ – złożona niepewność pomiaru średniej prędkości fazy stałej [5], wynikająca z:
 - niepewności pomiaru odległości rozmieszczenia czujników $u_B(L)$,
 - niepewności wyznaczania średniego czasu opóźnienia $u_A(\tau_0)$;
- $u_c(C_{VP})$ – złożona niepewność wyznaczania koncentracji objętościowej fazy stałej z krzywej kalibracyjnej, wynikająca z rozważenia:
 - niepewności współczynników prostej regresji $u_A(a)$, $u_A(b)$,
 - niepewności pomiaru natężenia promieniowania $u_A(I)$ i $u_A(I_0)$,
 - niepewności określania koncentracji objętościowej fazy stałej w procedurze kalibracyjnej według zależności (7) na którą składają się:
 - $u_B(m_W)$ – niepewność pomiaru masy kolejnych warstw wody,
 - $u_B(\rho_W)$ – niepewność wyznaczania gęstości wody związana ze zmianami temperatury otoczenia,
 - $u_B(dx)$ – niepewność wyznaczania wysokości warstw wody,
 - $u_B(d)$ – niepewność pomiaru średnicy wewnętrznej rury;
- $u_B(A)$ – niepewność wyznaczania przekroju poprzecznego odcinka pomiarowego rurociągu.

Indeksy A i B oznaczają odpowiednie niepewności standardowe wyznaczone metodami typu A oraz B [13].

Dla przykładu w eksperymencie WRQ029 z krzywej kalibracyjnej dla uzyskanego natężenia promieniowania otrzymano uśrednione $C_{VP} = 0,23 \pm 0,02$. Do wyznaczania średniego czasu przepływu kamieni τ_0 przez odcinek pomiarowy rurociągu zastosowano metodę korelacji wzajemnej [14-16]. W wyniku analizy sygnałów pomiarowych uzyskano $\tau_0 = (36,1 \pm 0,2)$ ms i obliczono średnią prędkość fazy stałej $v_s = (2,49 \pm 0,02)$ m/s [5]. Ostatecznie wykorzystując zależność (4) wyznaczono średnie objętościowe natężenie przepływu fazy stałej $Q_s = (10,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ m³/s [1]. Niepewność rozszerzoną $U_{0,95}(Q_s) = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m³/s obliczono przy założeniu rozkładu normalnego niepewności (10) przyjmując poziom ufności 0,95.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono sposób wyznaczania objętościowego natężenia przepływu fazy stałej Q_s w przepływie mieszaniny ciecz – cząstki stałe przy zastosowaniu radioizotopowej metody absorpcyjnej. Określenie Q_s wymagało wyznaczenia koncentracji objętościowej C_{VP} do czego niezbędna jest kalibracja zestawu źródeł promieniowania – sonda scyntylacyjna. Realizacja procedury kalibracyjnej wymagała uwzględnienia szeregu czynników i zbudowania specjalnego stanowiska, na którym odtworzono fragment rurociągu pomiarowego i modelowano strukturę badanego przepływu. Uzyskana zależność kalibracyjna pozwalała na określanie uśrednionej koncentracji objętościowej fazy stałej C_{VP} dla zmierzonych wartości natężenia promieniowania. Na podstawie otrzymanych wartości C_{VP} oraz prędkości fazy mniejszościowej v_s można było określić objętościowe natężenie przepływu kamieni z dokładnością do kilkunastu procent (w przedstawionym eksperymencie uzyskano 10 %).

Zaletą przedstawionego rozwiązania jest zastosowanie tego samego zestawu absorpcyjnego zarówno do pomiaru średniej prę-

kości fazy stałej, jak i do wyznaczania jej koncentracji objętościowej. Umożliwia to określanie objętościowego natężenia przepływu fazy stałej bez konieczności stosowania dodatkowych detektorów lub niezależnych pomiarów.

Autorzy składają podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe budowy instalacji badawczej i stanowiska kalibracyjnego. Realizacja pomiarów i procedury kalibracyjnej była możliwa dzięki współpracy z zespołem prof. J. Soboty z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu oraz z Laboratorium Sedymentologicznym Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

6. Literatura

- [1] Zych M.: Wykorzystanie metod jądrowych w badaniach transportu hydraulicznego fazy stałej w rurociągu pionowym. Rozprawa doktorska, AGH WFiIS, Kraków 2006.
- [2] Sobota J., BoczarSKI S., Petryka L., Zych M.: Radioisotope Measurements of Nodule Transport Velocities in a Vertical Pipe. 12th International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles. Prague, Czech Republic 2004.
- [3] Tavoularis S.: Measurement in fluid mechanics. Cambridge University Press 2005.
- [4] Graebel W. P.: Advanced fluid mechanics. Elsevier 2007.
- [5] Zych M., Petryka L., Hanus R.: Badania przepływu dwufazowego ciecz – ciało stałe w rurociągu pionowym metodami radioizotopowymi. Część 1. Pomiar prędkości transportu ziaren fazy stałej. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 56, Nr 4/2010, str. 315-317.
- [6] Petryka L.: The Microstructure of Hydromixture Flow Identified by the Absorption of Gamma Radiation. Proc. 8th International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles, Prague, Czech Republic 1995, E-5-1.
- [7] Knoll G. F.: Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [8] Charlton J.S., et all.: Guidebook on radioisotope tracers in industry. IAEA Technical Reports Series No. 316, Vienna 1990.
- [9] Dziunikowski B.: Zastosowania izotopów promieniotwórczych t. 2. AGH WFiTJ, Kraków 1998.
- [10] Umiasztowski K.: Zagadnienia transportu promieniowania gamma w ośrodkach niejednorodnych. Zeszyty naukowe AGH Nr 573, Kraków 1976.
- [11] Petryka L.: Application of radioisotope measurements in two-phase flow analysis. 12th International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles, Prague 20-24 September 2004. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu nr 481, s. Konferencje nr 37 (2004), 59-74.
- [12] Petryka L., Zych M., Murzyn R.: The non-stationary two-phase flow evaluation by radioisotopes. Nukleonika: The International Journal of Nuclear Research, Vol. 50 (2005), 43-46.
- [13] Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.
- [14] Beck M. S., Płaskowski A.: Cross-correlation flowmeters. Adam Hilger, Bristol 1987.
- [15] Petryka L., Hanus R., Zych M.: Analiza statystyczna sygnałów w radioizotopowych pomiarach przepływów dwufazowych. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 54, Nr 12/2008, str. 866-868.
- [16] Petryka L., Oszajec J.: The cross-correlation method of solid particle velocity measurements in industry. Nuclear Geophysics Vol. 7, No. 2, 1993, 323 - 333.

otrzymano / received: 19.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 15.03.2010

artykuł recenzowany