

## Badania przepływu ciecz-gaz w rurociągu metodą absorpcji promieniowania gamma

**Streszczenie.** Artykuł omawia zastosowanie metody absorpcji promieniowania gamma do wyznaczania parametrów przepływu ciecz-gaz w rurociągu poziomym. Sygnały z zestawu radiometrycznego wykorzystano do wyznaczania prędkości fazy rozproszonej, współczynnika wypełnienia oraz identyfikacji struktury przepływu. Przedstawiono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w zamknięte źródła promieniowania <sup>241</sup>Am i sondy scyntylacyjne z kryształami NaI(Tl).

**Abstract.** The article presents application of the gamma-ray absorption method to determine the parameters of the liquid-gas flow in a horizontal pipeline. The signals from radiometric set were used for determining the velocity of the dispersed phase, void fraction and identification of flow structure. Results of experiments carried out on a laboratory stand equipped with sealed gamma-ray sources <sup>241</sup>Am and scintillation probes with NaI(Tl) crystals are presented. (*Investigation of liquid-gas flow in the pipeline by gamma-ray absorption*).

**Słowa kluczowe:** Przepływ dwufazowy, absorpcja promieniowania gamma, pomiar prędkości, identyfikacja typu przepływu, współczynnik wypełnienia rurociągu

**Keywords:** Two-phase flow, gamma-ray absorption, velocity measurement, flow regime identification, void fraction

### Wstęp

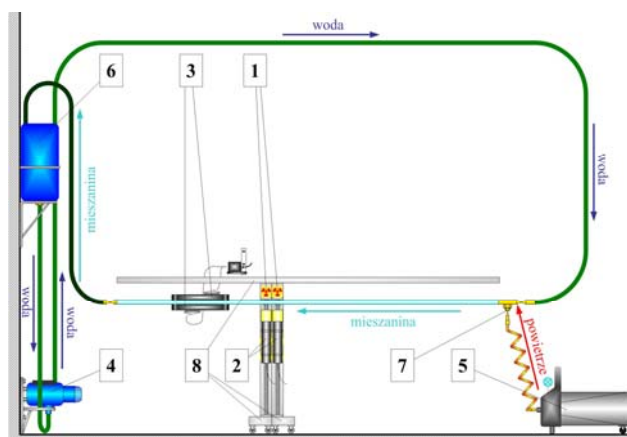
Przepływy dwufazowe występują w naturze oraz technice (np. w przemyśle petrochemicznym, wydobywczym, farmaceutycznym, rolno-spożywczym oraz w energetyce i inżynierii środowiska). Mają one szczególne znaczenie przy opisie procesów wymiany ciepła, pędu i masy w wielu urządzeniach takich jak wymienniki ciepła, reaktory oraz bioreaktory, kolumny destylacyjne, absorpcyjne, rektyfikacyjne, oraz w procesach pneumo- i hydrotransportu [1]. Jednym z najczęściej spotykanych typów przepływów dwufazowych są przepływy ciecz-gaz, gdzie sposób i parametry transportu gazu przez ciecz mają istotne znaczenie dla przebiegu procesów przemysłowych. Przepływy dwufazowe są trudne w opisie matematycznym, dlatego istotne znaczenie mają badania eksperymentalne oraz rozwijanie metod pomiaru parametrów tego typu przepływów.

Obecnie w pomiarach przepływów dwufazowych stosuje się techniki tomograficzne (tomografia rezystancyjna, pojemnościowa, promieniowania X), przepływomierze Coriolisa, PIV, LDA, MRI, szybkie kamery oraz metody radioizotopowe [2 - 3]. Te ostatnie, a zwłaszcza stosunkowo prosta i bezpieczna w zastosowaniu metoda absorpcji promieniowania gamma, stosowane są przez autorów niniejszej pracy w badaniach przepływów ciecz-gaz i ciecz-cząstki stałe w rurociągach i kanałach otwartych [4 - 6]. Sygnały uzyskiwane z detektorów w tego typu pomiarach mogą być wykorzystane do wyznaczania prędkości transportu fazy rozproszonej oraz innych parametrów przepływu.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania dwóch źródeł promieniowania gamma <sup>241</sup>Am i dwóch sond scyntylacyjnych NaI(Tl) do wyznaczania współczynnika wypełnienia rurociągu fazą gazową i jednoczesnego pomiaru średniej prędkości tej fazy oraz do rozpoznawania struktury przepływu. W tym ostatnim przypadku do analizy sygnałów zastosowano sztuczne sieci neuronowe.

### Stanowisko laboratoryjne i zasada pomiaru

W artykule wykorzystano dane zarejestrowane przy zastosowaniu hydraulicznej instalacji badawczej, zbudowanej w Pracowni Radiometrii Przemysłowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie. Schemat instalacji pokazano na rysunku 1.



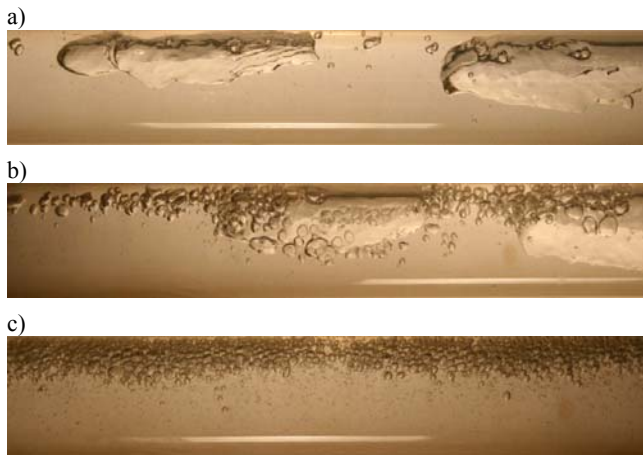
Rys. 1. Schemat hydraulicznej instalacji do badania przepływów ciecz-gaz w rurociągu poziomym; 1 - źródła promieniowania gamma, 2 - detektory scyntylacyjne, 3 - sondy ultradźwiękowe, 4 - pompa, 5 - kompresor, 6 - zbiornik odpowietrzający, 7 - dysza powietrza, 8 - układ przesuwu sond i źródeł [7]

Szczegółowy opis instalacji przedstawiono w pracach [7,8]. Zasadniczą jej część stanowi przezroczysta rura z metapleksu o długości 4,5 m, do której za pomocą pompy 4 tłoczona jest woda oraz powietrze z kompresora 5 poprzez dyszę powietrza 7. Uzyskana w ten sposób mieszanina woda-powietrze przepływa przez poziomy odcinek pomiarowy rury i trafia do zbiornika odpowietrzającego 6. Pomiarów parametrów przepływu umożliwiają dwa zestawy radiometryczne i odpowiednie oprogramowanie do akwizycji i analizy sygnałów. Każdy zestaw składa się z liniowego źródła promieniowania 1 o aktywności 100 mCi i energii 59,5 keV oraz detektora scyntylacyjnego 2 z 2" kryształami NaI(Tl). Układ przesuwu 8 pozwala na przemieszczanie źródeł i sond wzdłuż rurociągu. W skład stanowiska wchodzi także przepływomierz ultradźwiękowy 3 typu Uniflow 990 do pomiaru przepływu wody. Pompa umożliwia uzyskanie prędkości przepływu wody w zakresie 0,5 - 2,5 m/s. Do akwizycji danych zastosowano dedykowaną kartę licznikową z interfejsem USB. Analiza sygnałów realizowana jest przy zastosowaniu m.in. własnego oprogramowania „Convolution”. Na rysunku 2 pokazano widok ogólny stanowiska badawczego.



Rys. 2. Stanowisko badawcze

Regulacja prędkości przepływu wody i odpowiednie dozowanie powietrza z kompresora pozwala na uzyskiwanie różnych struktur przepływu ciecz-gaz w odcinku pomiarowym rurociągu. Przykłady trzech struktur pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowe struktury przepływu ciecz-gaz: a) tłokowy, b) tłokowo-pęcherzykowy, c) pęcherzykowy

Zastosowana metoda pomiaru parametrów transportu gazu wykorzystuje absorpcję promieniowania gamma w przepływającej mieszaninie. Zjawisko pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przy przechodzeniu przez częściowo absorbujący i rozpraszający materiał opisuje prawo Lamberta-Beera [9]:

$$(1) \quad I = I_0 \exp(-\eta \mu x)$$

gdzie:  $I_0$  – wejściowe natężenie promieniowania,  $I$  – natężenie promieniowania na wyjściu,  $x$  – grubość materiału absorbującego,  $\eta$  – gęstość absorbentu,  $\mu$  – masowy współczynnik absorpcji.

W przypadku przepływu dwufazowego ciecz-gaz równanie (1) przyjmie postać:

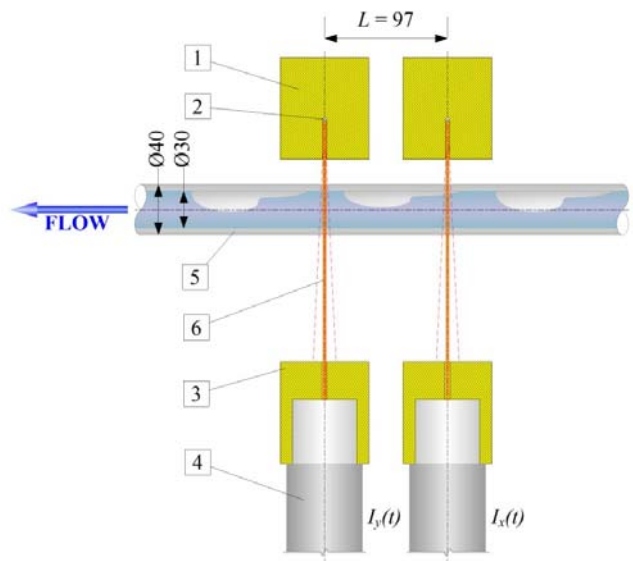
$$(2) \quad I = I_0 \exp[-(\eta_C \mu_C x_C + \eta_G \mu_G x_G)]$$

gdzie indeksy  $C$  i  $G$  występujące w parametrach  $\eta$ ,  $\mu$  i  $x$  oznaczają odpowiednio gaz i ciecz.

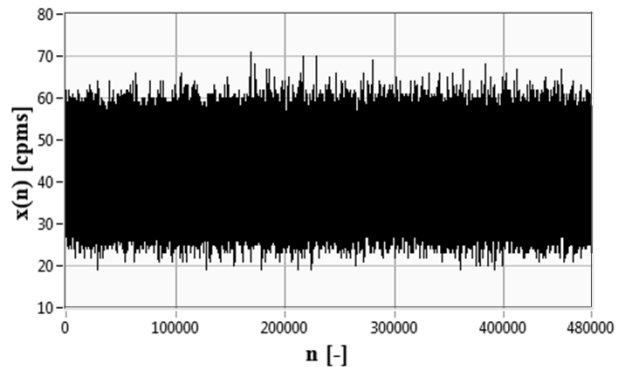
Idea i geometria pomiaru przepływu mieszaniny ciecz-gaz metodą absorpcji promieniowania gamma w rurociągu została przedstawiona na rysunku 4.

Impulsy  $I_x(t)$  i  $I_y(t)$  uzyskiwane z sond scyntylicyjnych, zliczane w zadanym okresie próbkowania  $\Delta t = 1$  ms, tworzą

dyskretne sygnały pomiarowe  $x(n)$  i  $y(n)$ , gdzie  $n = t/\Delta t$ . Przykład sygnału  $x(n)$  zarejestrowanego dla przepływu pęcherzykowego w czasie 480 s przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Idea i geometria pomiaru przepływu ciecz-gaz metodą absorpcji promieniowania gamma: 1 – kolimator źródła, 2 – źródło promieniowania gamma, 3 – kolimator detektora, 4 – detektor scyntylicyjny, 5 – rura, 6 – wiązka promieniowania. Wszystkie wymiary podano w mm [7]



Rys. 5. Przykładowy przebieg sygnału  $x(n)$

Analiza takich sygnałów pozwala na wyznaczenie kilku parametrów przepływu, np. średniej prędkości fazy rozproszonej, współczynnika wypełnienia rurociągu gazem oraz na rozpoznawanie struktury przepływu.

#### Wyznaczanie prędkości fazy rozproszonej

Sygnały uzyskiwane z sond scyntylicyjnych w pomiarach przepływów dwufazowych są na ogół przebiegami stochastycznymi. Do analizy takich sygnałów stosuje się metody statystyczne. Prędkość fazy rozproszonej (w tym przypadku powietrza) określa się ze wzoru:

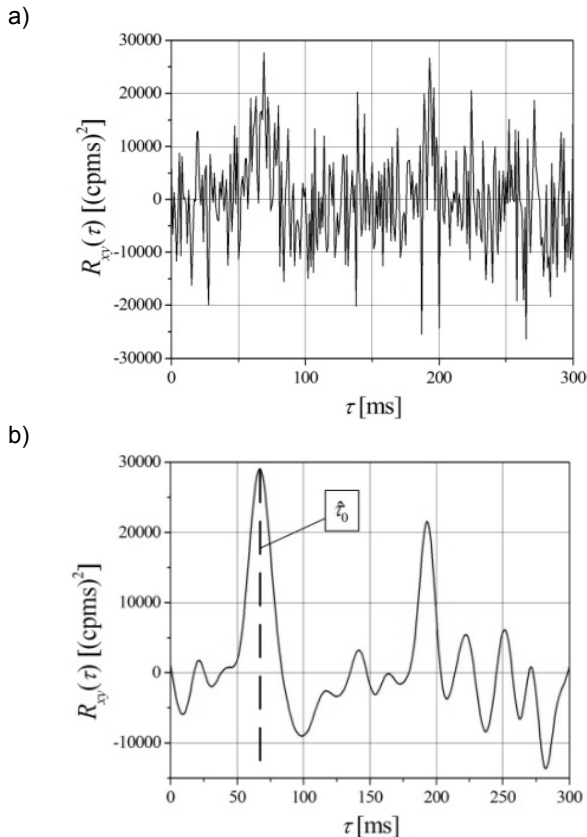
$$(3) \quad v_G = L / \tau_0$$

gdzie  $\tau_0$  to czas opóźnienia transportowego wyznaczany metodą korelacyjną, fazową lub innymi [4 - 6]. W przypadku najczęściej stosowanej metody korelacyjnej czas  $\tau_0$  określa się na podstawie położenia głównego maksimum funkcji korelacji wzajemnej (FK)  $R_{xy}(\tau)$ , obliczanej z zależności:

$$(4) \quad R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau)$$

gdzie:  $N$  – liczba próbek sygnałów  $x(n)$  oraz  $y(n)$ ,  $\tau$  – opóźnienie.

Na rysunku 6 przedstawiono przykład funkcji korelacji wzajemnej uzyskanej dla przepływu pęcherzykowego. Dla tego typu przepływu uzyskuje się FK trudniejsze do interpretacji ze względu na słabo widoczne główne maksimum (rys. 6a). Dlatego konieczne jest zastosowanie dodatkowej obróbki sygnałów przed analizą korelacyjną lub wygładzanie już obliczonej FK [10]. Rysunek 6b przedstawia FK uzyskaną po wcześniejszej pasmowej filtracji cyfrowej sygnałów  $x(n)$  i  $y(n)$ .



Rys. 6. Przykłady przebiegu funkcji korelacji wzajemnej uzyskanej dla przepływu pęcherzykowego: a) bezpośrednio dla sygnałów z sond, b) po zastosowaniu filtracji cyfrowej sygnałów

Jak łatwo zauważyć zastosowanie filtracji sygnałów znacznie ułatwia jednoznaczne wyznaczenie opóźnienia transportowego  $\tau_0$ . Dla znanej odległości rozmieszczenia sond (tu:  $L = 97$  mm) prędkość przepływu fazy rozproszonej określa się z zależności (3). W rozważanym przypadku otrzymano:  $v_G = (1,45 \pm 0,07)$  m/s. Podaną wartość niepewności obliczono dla współczynnika rozszerzenia równego 2 ( $p = 0,95$ ). Przy znanej geometrii rurociągu można obliczyć także natężenie przepływu fazy rozproszonej [4].

### Wyznaczanie współczynnika wypełnienia rurociągu fazą gazową

Ważnym parametrem w analizie przepływu ciecz-gaz jest współczynnik wypełnienia rurociągu fazą gazową [9, 11, 12]. Pozwala on ocenić ilość gazu zawartą w przepływającej mieszaninie. Udział gazu w dużym stopniu determinuje typ przepływu, wpływa także na prędkości przemieszczania się poszczególnych faz. Współczynnik wypełnienia rurociągu  $\alpha$  jest zdefiniowany jako stosunek objętości zajmowanej przez gaz  $V_G$ , do objętości całej mieszaniny  $V$ :

$$(5) \quad \alpha = \frac{V_G}{V}$$

Emitowana przez źródła promieniowania i skolimowana wiązka fotonów gamma prześwietla wybrany przekrój rurociągu. Dla tego przekroju zależność (5) sprowadza się do równania:

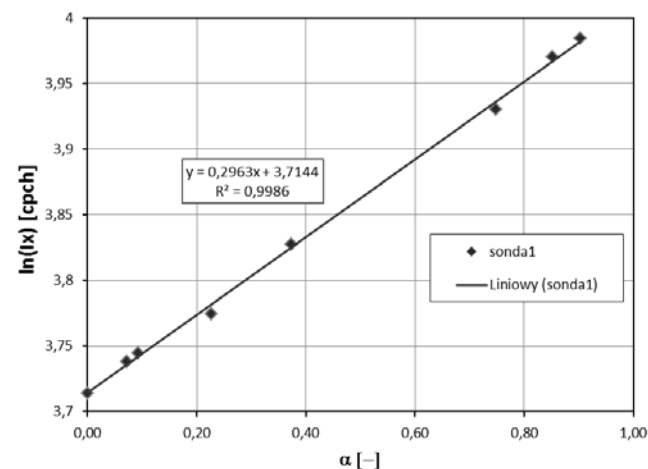
$$(6) \quad \alpha = \frac{A_G}{A}$$

gdzie:  $A_G$  – pole powierzchni zajmowane przez powietrze,  $A$  – pole przekroju wewnętrznego rurociągu.

W przeprowadzonych eksperymentach przy zastosowaniu jednego zestawu radiometrycznego rejestrowano natężenie promieniowania przechodzącego przez rurociąg dla określonych wartości  $\alpha$  [11]. Do otrzymanych tą drogą punktów pomiarowych dopasowano metodą najmniejszych kwadratów prostą. Uzyskano zależność:

$$(7) \quad \ln(I_x) = 0,2963 \cdot \alpha + 3,7144$$

przy współczynniku determinacji  $R^2 = 0,999$  (rys. 7).



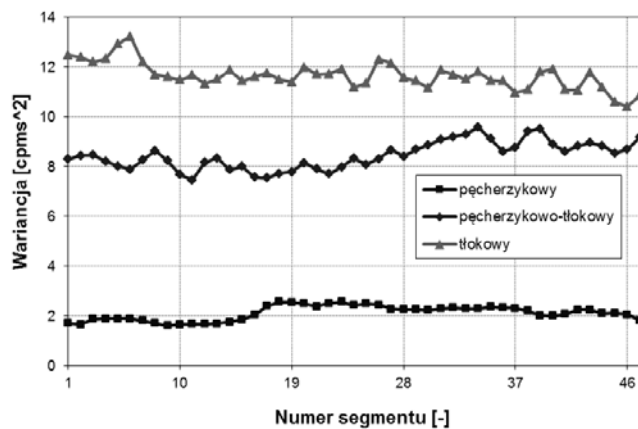
Rys. 7. Zależność kalibracyjna  $\ln(I_x) = f(\alpha)$

Równanie (7) można wykorzystać do wyznaczania współczynnika  $\alpha$ , pod warunkiem wcześniejszego pomiaru promieniowania tła oraz ustalenia liczby zliczeń dla natężenia promieniowania osłabianego w rurociągu całkowicie wypełnionym wodą (punkty referencyjne). Tak ustalona metodyka pozwala na wykorzystanie raz wyznaczonej funkcji także w zmienionych warunkach (np. inna temperatura otoczenia), gdyż współczynnik nachylenia prostej zależy tylko od składu chemicznego przepływającej mieszaniny i energii fotonów gamma przechodzących przez rurociąg. Przykładowo dla przepływu pęcherzykowego (uzyskanego dla prędkości przepływu wody  $v_W = 2,010$  m/s i gazu  $v_G = 1,018$  m/s) otrzymano wartość współczynnika wypełnienia  $\alpha = 0,034$  z niepewnością nie przekraczającą 4%.

### Rozpoznawanie struktury przepływu

Rozpoznawanie struktury przepływu ciecz-gaz może być istotne dla procesów wymiany ciepła, pędu i masy w różnych urządzeniach przemysłowych. Można tu wykorzystać te same sygnały pomiarowe, które stosuje się do wyznaczania prędkości fazy rozproszonej i współczynnika wypełnienia. Do rozpoznawania struktury przepływu dwufazowego można zastosować m.in. metody sztucznej inteligencji, w tym sieci neuronowe [13-15]. W tym celu należy wyodrębnić cechy sygnałów pomiarowych, które mogą być następnie zastosowane jako predyktory. W artykułach [16,17] przedstawiono sposoby ekstrakcji kilkunastu parametrów sygnałów z sond scyntylicyjnych w dziedzinie czasu (np. wartość średnia, wariancja, skośność, kurtoza, RMS) i częstotliwości (wartości amplitudy gęstości

widmowej mocy jednego sygnału i gęstości wzajemnej dwóch sygnałów, pola pod w.w. gęstościami w wybranym zakresie częstotliwości). Przykładowo na rysunku 8 pokazano wariancje sygnałów dla trzech analizowanych typów przepływu ciec-z-gaz, wyznaczone przy podziale sygnałów pomiarowych na segmenty o długości 20000 próbek.



Rys. 8. Wariancje sygnałów z sond scyntylicyjnych dla trzech typów przepływu w funkcji numeru segmentu danych

Określone w ten sposób parametry (łącznie 16) zastosowano jako predyktory na wejściu sieci neuronowej typu MLP (Multi-Layer Perceptron). Do budowy, uczenia i testowania sieci wykorzystano oprogramowanie Statistica 12.5 [18]. W przeprowadzonych badaniach rozważano różne konfiguracje sieci i wybrano sieć MLP o strukturze 16-8-3 (podane liczby to odpowiednio liczba neuronów w warstwie wejściowej, ukrytej i wyjściowej). Uzyskano 100% poprawnych wyników rozpoznawania (testowanie i walidacja) dla trzech analizowanych typów przepływów: tłokowego, tłokowo-pęcherzykowego i pęcherzykowego.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono ideę i przykłady zastosowania metody absorpcji promieniowania gamma do badania przepływu ciec-z-gaz w rurociągu. W tego typu badaniach można wykorzystać sygnały otrzymywane z zestawów radiometrycznych do uzyskiwania wielu ważnych informacji o przepływie. Na podstawie analizy dwóch sygnałów (np. metodą korelacji wzajemnej) wyznacza się średnią prędkość fazy rozproszonej. Sygnał z jednej sondy scyntylicyjnej wystarczy, aby (po wcześniejszej kalibracji) określać współczynnik wypełnienia rurociągu fazą gazową. Dodatkowo na podstawie analizy tego samego sygnału można rozpoznawać strukturę przepływu stosując metody sztucznej inteligencji, np. sieci neuronowe. Wymaga to wyznaczenia parametrów sygnału, charakterystycznych dla danych struktur, oraz wcześniejszego nauczania sieci.

Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań. Autorzy kontynuują prace dotyczące aplikacji i rozwoju różnych metod analizy sygnałów w radioizotopowych pomiarach parametrów przepływów dwufazowych.

**Autorzy:** dr hab. inż. Robert Hanus, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów. E-mail: rohan@prz.edu.pl.

dr inż. Marcin Zych, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: zych@geol.agh.edu.pl.

dr inż. Leszek Petryka, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: Leszek.Petryka@fis.agh.edu.pl.

### LITERATURA

- [1] Dziubiński M., Prywer J., *Mechanika płynów dwufazowych*, WNT, Warszawa 2010
- [2] Powell R.L., Experimental techniques for multiphase flows, *Physics of Fluids*, Vol. 20 (2008), 040605
- [3] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., *Multiphase flow metering: principles and applications*, Elsevier, Amsterdam 2009
- [4] Petryka L., Hanus R., Zych M., Śleziak M., Radioizotopowe pomiary przepływów dwufazowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 86 (2010), nr. 5, 24-29
- [5] Zych M., Petryka L., Kępiński J., Hanus R., et al., Radioisotope investigations of compound two-phase flows in an open channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 35 (2014), 11-15
- [6] Hanus R., Petryka L., Zych M., Velocity measurement of the liquid-solid flow in a vertical pipeline using gamma-ray absorption and weighted cross-correlation, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 40 (2014), 58-63.
- [7] Zych M., Hanus R., Petryka L., Application of spectral analysis in radiometric measurements of two-phase liquid-gas flow, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 18 (2014), 02004
- [8] Petryka L., Zych M., Hanus R., Stanowisko do oceny metod pomiaru przepływu cieczy w rurociągu, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 54 (2008), nr. 12, 863-865
- [9] Yu Zhao, Qincheng Bi, Yuejin Yuan, Haicai Lv, Void fraction measurement in steam-water two-phase flow using the gamma ray attenuation under high pressure and high temperature evaporating conditions, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 49 (2016), 18-30
- [10] Zych M., Hanus R., Petryka L., Strzępowicz A., i in., Wybrane metody redukcji zakłóceń w radioizotopowych korelacyjnych pomiarach przepływów dwufazowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 90 (2015), nr. 8, str. 66-68
- [11] Zych M., Hanus R., Jaszczur M., Strzępowicz A. et al., Determination of void fraction in two phase liquid-gas flow using gamma absorption. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 745 (2016), 032124
- [12] Roshani G.H., Nazemi E., Feghhi S.A.H., Setayeshi S., Flow regime identification and void fraction prediction in two-phase flows based on gamma ray attenuation, *Measurement*, Vol. 62 (2015), 25-32
- [13] Salgado C.M., Pereira C., Schirru R., Brandão L.E.B., Flow regime identification and volume fraction prediction in multiphase flows by means of gamma-ray attenuation and artificial neural networks, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 52 (2010), 555-562.
- [14] Ozbayoglu A. M., Yuksel H. E., Analysis of gas-liquid behavior in eccentric horizontal annuli with image processing and artificial intelligence techniques, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 81 (2012), 31-40
- [15] Roshani G.H., Nazemi E., Roshani M.M., Intelligent recognition of gas-oil-water three-phase flow regime and determination of volume fraction using Radial Basis Function, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 54 (2017), 39-45
- [16] Hanus R., Zych M., Petryka L., Jaszczur M., et al., Signals features extraction in liquid-gas flow measurements using gamma densitometry: Part 1: time domain, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 114 (2016), 02035
- [17] Hanus R., Zych M., Petryka L., Jaszczur M., et al., Signals features extraction in liquid-gas flow measurements using gamma densitometry: Part 2: frequency domain, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 114 (2016), 02036
- [18] Hanus R., Zych M., Petryka L., Świsulski D., et al., Application of ANN and PCA to two-phase flow evaluation using radioisotopes, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 143 (2017), 02033