

Marcin ZYCH¹, **Leszek PETRYKA**², **Robert HANUS**³

¹AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA GEOFIZYKI

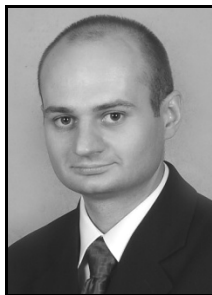
²AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ZASTOSOWAŃ FIZYKI JĄDROWEJ

³POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Badania przepływu dwufazowego ciecz – ciało stałe w rurociągu pionowym metodami radioizotopowymi Cześć 1. Pomiar prędkości transportu 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 opóźnień. Autor lub współautor kilkudziesięciu publikacji, członek Sekcji Aparatury i Systemów Pomiarowych KMian PAN.



e-mail: rohan@prz.edu.pl

The uncertainty of the mean velocity of the solid particles is reduced to 1%. Section 5 summarises the results and presents final remarks. The authors conclude that the method described in this paper can be applied to many similar complex streams transported through pipelines.

Keywords: two phase flow, vertical hydrotransport, gamma absorption method, stochastic signals, cross-correlation.

1. Wstęp

Przepływy wielofazowe często występują w przyrodzie i technice. W przemyśle, np. wydobywczym przesyła się rurociągami mieszaniny dwufazowe takie jak: ciecz I – ciecz II, ciecz - gaz, ciecz - faza stała oraz gaz - faza stała w transporcie pneumatycznym. Analiza i sterowanie tego typu przepływami wymaga stosowania zaawansowanych technik pomiarowych, wykorzystujących m.in. tomografię elektryczną, przepływomierze ultradźwiękowe i Coriolisa, metody radioizotopowe itp. [1].

Trudności w opisie teoretycznym i kompleksowych pomiarach transportu mieszanin wielofazowych uzasadniają konstruowanie odpowiednich modeli laboratoryjnych. W artykule posłużono się wynikami badań transportu modeli konkrecji polimetalicznych przez ciecz nośną w rurociągu pionowym, na instalacji doświadczalnej, zbudowanej w Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu [2].

Prezentowane pomiary prędkości przepływu i koncentracji objętościowej fazy stałej w rurociągu przy zastosowaniu metod radioizotopowych, wykonane zostały w ramach projektu poświęconego opracowaniu technologii transportu hydraulicznego konkrecji z dna Pacyfiku [3]. Konkrecje polimetaliczne to porowaty materiał organiczno-mineralny, który może być wykorzystany do pozyskiwania szeregu metali (m.in. Mn, Ni, Co, Mo, W, Cu, Au). Mają one najczęściej postać ziaren o średnicy 1÷15 cm i gęstość w stanie mokrym 2 g/cm³ [4]. W niniejszej części artykułu opisano zastosowanie metody absorpcji promieniowania gamma w pomiarach przepływu mieszanin i instalację badawczą oraz podano przykładowe wyniki pomiaru prędkości fazy stałej w rurociągu uzyskane przy zastosowaniu metody korelacji wzajemnej do analizy zarejestrowanych sygnałów.

2. Zasada pomiaru prędkości przepływu fazy stałej metodą absorpcji promieniowania gamma

Ideę pomiaru przedstawiono na rysunku 1. Typowy zestaw do pomiaru prędkości złożony jest z dwóch źródeł promieniowania gamma i dwóch sond. Źródła, w tym przypadku izotopy ²⁴¹Am umieszczono w odległości *L* od siebie po jednej stronie rurociągu.

Streszczenie

W artykule omówiono wykorzystanie izotopów promieniotwórczych do opisu unoszenia przez ciecz cząstek ciała stałego w rurociągu pionowym. Pokazano jak zastosowanie zestawu absorpcyjnego złożonego z dwóch źródeł promieniowania gamma ²⁴¹Am i dwóch sond scyntylicyjnych umożliwia zarówno pomiar prędkości przepływu jak i koncentracji objętościowej fazy stałej. W prezentowanej metodzie średnia prędkość przepływu ziaren była wyznaczana przy zastosowaniu metody korelacji wzajemnej sygnałów rejestrowanych przez sondy. Dla ilustracji posłużono się pomiarami wykonanymi na potrzeby transportu hydraulicznego konkrecji polimetalicznych z dna Pacyfiku.

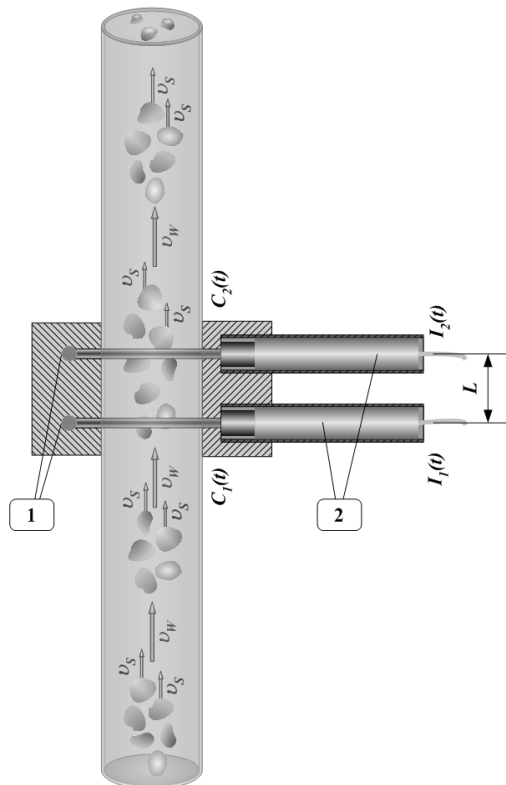
Słowa kluczowe: przepływ dwufazowy, hydrotransport, absorpcja promieniowania gamma, sygnały stochastyczne, korelacja wzajemna.

Radioisotope evaluation of two phase liquid-solid flow in a vertical pipe Part 1. Measurement of the velocity of solid particles

Abstract

The paper presents an application of radioisotopes to description of transportation of solid particles by a liquid in a vertical pipe. It shows how the gamma absorption set, consisting of two radioactive isotopes ²⁴¹Am and two scintillation probes, may be applied to measurements of both solid particles velocity and volumetric concentration of a flow. In this case the mean velocity of the solid phase transportation is evaluated by a cross-correlation of digital signals recorded by the probes. 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 solid particles velocity measurement by the gamma absorption method (Fig. 1, Eq. 1). Section 3 describes the laboratory installation (Fig. 2) which is an example of the transportation of ceramic models of pebbles expected during exploitation of polymetallic deposits from the Pacific. The diameter and concentration of solid particles were found to be variable and stochastically distributed in the stream. The cross-correlation analysis of the recorded signals (Eq. 2, Fig. 4) and the uncertainty evaluation of the mean velocity (Eq. 3) are given in Section 4.

Dzięki odpowiednim kolimatorom (1), przepływający strumień był prześwietlany przez dwie równoległe wiązki fotonów o energii 59,5 keV [5]. Z drugiej strony rury zamocowano sondy scyntylacyjne (2). Na wyjściu sond uzyskuje się zliczenia $I_1(t)$ i $I_2(t)$, zależne od natężenia promieniowania padającego na detektory. W powyższy sposób można uzyskać sygnały stochastyczne, opisujące chwilowe stany strumienia w badanych przekrojach [6, 7].



Rys. 1. Zasada pomiaru absorpcyjnego; 1 – źródła promieniowania, 2 – sondy pomiarowe
Fig. 1. Principle of gamma absorption measurement; 1 – sealed radioactive sources, 2 – nuclear probes

Analiza omawianych sygnałów metodami statystycznymi umożliwia wyznaczenie opóźnienia transportowego i następnie prędkości przemieszczania się fazy mniejszościowej (w tym przypadku ziaren fazy stałej) przez odcinek pomiarowy L . Przy zapewnieniu stacjonarności przepływu, średnią prędkość fazy stałej v_s można określić z zależności:

$$v_s = L / \tau_0, \quad (1)$$

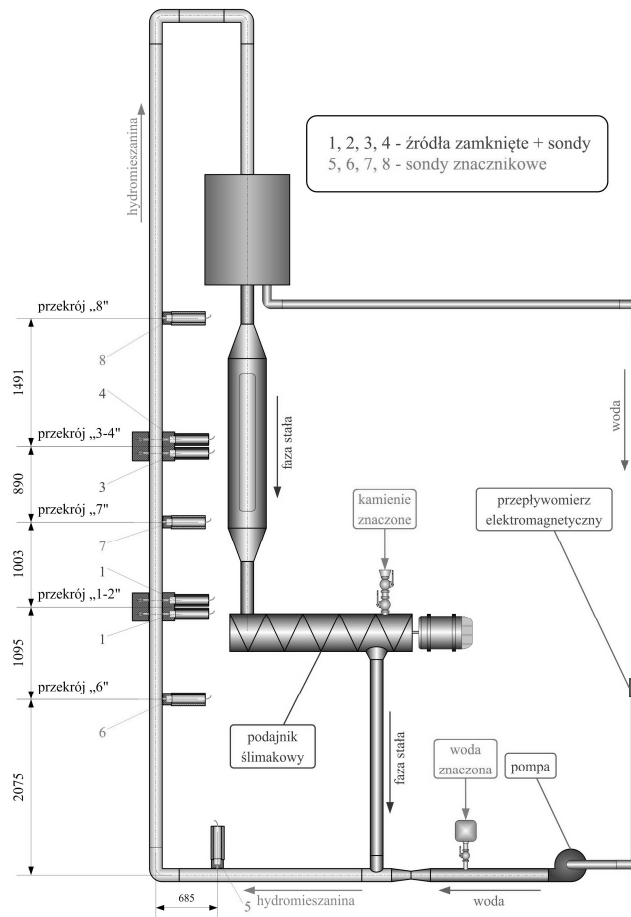
gdzie τ_0 – średnie opóźnienie transportowe ziaren.

W razie potrzeby prędkość przepływu cieczy (w tym przypadku wody) v_w można wyznaczyć np. przy zastosowaniu metody radioznacznikowej, opisanej m.in. w [8].

3. Instalacja badawcza

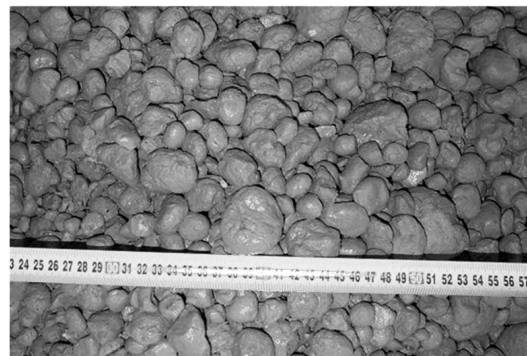
Schemat instalacji, zbudowanej w Laboratorium Wodnym Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu przedstawiono na rysunku 2. Zasadniczą jej część stanowił rurociąg pionowy wykonany ze szkła akrylowego o średnicy wewnętrznej 150 mm. Na odcinku pomiarowym o długości 6,55 m zamocowano dwa zestawy absorpcyjne w celu porównania parametrów transportu fazy stałej na różnych wysokościach. Odległość pomiędzy sondami w każdym zestawie absorpcyjnym wynosiła $L = 90$ mm.

W prowadzonych badaniach stosowano specjalnie przygotowane, wytrzymałe modele ceramiczne kongrecji, pokazane na rysunku 3.



Rys. 2. Schemat instalacji hydrotransportowej
Fig. 2. Scheme of the laboratory installation

Modele te, nazywane dalej „kamieniami” wykonane zostały ze specjalnego betonu o gęstości i wymiarach odpowiadających typowym kongrecjom wydobytym z dna oceanu, a fazę ciekłą stanowiła woda.



Rys. 3. Modele ceramiczne kongrecji stosowane w eksperymentach
Fig. 3. Ceramic models of pebbles applied in the experiment

Dodatkowo rozmieszczone na rurociągu pojedyncze detektory scyntylacyjne umożliwiały równoległe prowadzenie pomiarów prędkości przepływu wody oraz poszczególnych frakcji kamieni metodą znacznikową. Wszystkie sondy podłączano do mobilnego stanowiska akwizycji danych z komputerem klasy PC.

Przepływ wody w instalacji wymuszała pompa, a fazę stałą wprowadzano do strumienia przy zastosowaniu podajnika ślimakowego. Po przebyciu odcinka pomiarowego mieszanina rozdzielana była w separatorze. W prawej części instalacji umieszczono dodatkowo przepływomierz elektromagnetyczny, a wydajność pompy pozwalała na uzyskiwanie prędkości przepływu badanej mieszaniny od wartości krytycznych do 4 m/s [2].

4. Analiza sygnałów pomiarowych i przykładowe wyniki

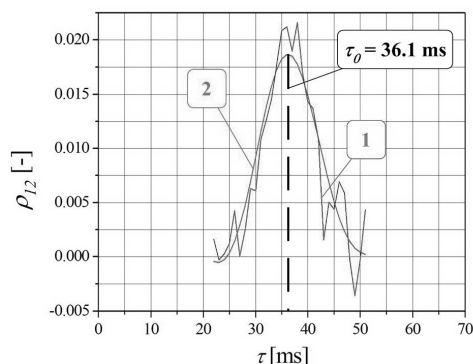
Uzyskiwane na wyjściu sond scyntylicyjnych impulsy, zliczane w zadanym czasie próbkowania Δt , tworzą dyskretne sygnały $x(n)$ oraz $y(n)$. W przeciwieństwie do tradycyjnych czujników, sygnały rejestrowane w pomiarach jądrowych zawierają nie tylko informacje o analizowanym przepływie, ale także zakłócenia spowodowane tłem radiacyjnym, specyficznymi szumami aparatury i statystycznymi fluktuacjami rozpadów jądrowych. Odpowiedni dobór aktywności źródeł, energii promieniowania, geometrii pomiaru i czasu próbkowania pozwala wprawdzie obniżyć poziom szumów, ale nie jest możliwa ich całkowita eliminacja. Zastosowanie wybranych metod przetwarzania sygnałów (filtracja, średnia krocząca itp.) umożliwiają wybór zakresów częstotliwości, w których udział szumów będzie zredukowany, a analizowane fragmenty staną się ergodyczne. Do określenia opóźnienia transportowego dobrze nadają się metody statystyczne, wykorzystujące najczęściej funkcję korelacji wzajemnej lub fazę wzajemnej gęstości widmowej mocy [9-13].

W prezentowanych badaniach zastosowano metodę korelacyjną, a dyskretny estymator funkcji korelacji wzajemnej (FK) obliczany był z zależności:

$$\hat{R}_{xy}(l) = \frac{1}{N_{total} - l} \sum_{n=1}^{N_{total}-l} x(n)y(n+l), \quad (2)$$

gdzie: N_{total} – całkowita liczba próbek sygnałów, l - dyskretna wartość opóźnienia $l = \tau/\Delta t$, τ – opóźnienie, $n = t/\Delta t$.

Pierwszy moment rozkładu $R_{xy}(\tau)$ pozwala określić najbardziej prawdopodobne opóźnienie transportowe (estymator $\hat{\tau}_0$) [9,14]. Przykładowy przebieg unormowanej FK ρ_{xy} dla sygnałów uzyskanych w eksperymencie WRQ029 ($N_{total} = 180\,000$, $\Delta t = 1$ ms) z przekroju pomiarowego „1-2” (por. rys. 2) pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przebieg funkcji korelacji wzajemnej w eksperymencie WRQ029; 1 – FK bez filtracji, 2 – FK po zastosowaniu filtracji

Fig. 4. Cross-correlation distribution (FK) in experiment WRQ029; 1 – original FK distribution, 2 – filtrated FK distribution

Niepewność złożona $u_c(v_S)$ pomiaru prędkości zależy od niepewności wyznaczenia nieskorelowanych ze sobą wielkości L i $\hat{\tau}_0$:

$$u_c(v_S) = \sqrt{\left(\frac{\partial v_S}{\partial L}\right)^2 u_B^2(L) + \left(\frac{\partial v_S}{\partial \hat{\tau}_0}\right)^2 u_A^2(\hat{\tau}_0)}, \quad (3)$$

gdzie indeksy A i B oznaczają odpowiednie niepewności wyznaczone metodami typu A oraz B [15]. Szerzej zagadnienie wyznaczania poszczególnych składowych w zależności (3) oraz określania niepewności rozszerzonej pomiaru prędkości składnika mniejszościowego przepływu dwufazowego przedstawiono w [10]. Dla rozważanego eksperymentu WRQ029 w wyniku analizy rozkładu FK otrzymano wartość opóźnienia transportowego $\tau_0 = (36,1 \pm 0,2)$ ms. Następnie na podstawie zależności (1) obli-

czono średnią prędkość przepływu fazy stałej v_S oraz biorąc pod uwagę niepewności pomiaru L i τ_0 wyznaczono niepewność złożoną (3). Ostatecznie obliczając niepewność rozszerzoną $u_{0,95}(v_S)$ otrzymano $v_S = (2,49 \pm 0,02)$ m/s.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę absorpcyjną i stanowisko laboratoryjne przeznaczone do badania przepływu mieszaniny ciecz - cząstki ciała stałego w rurociągu pionowym przy zastosowaniu izotopów promieniotwórczych. Opisana metoda w połączeniu z korelacyjną analizą zarejestrowanych sygnałów pozwoliła na wyznaczenie średniej prędkości przepływu fazy stałej. Niepewności wykonanych pomiarów nie przekraczały kilku procent (w przedstawionym eksperymencie około 1 %), co jest wynikiem trudnym do uzyskania w przypadku transportu hydraulicznego ziaren w rurociągach pionowych.

Autorzy składają podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe budowy instalacji badawczej oraz zespołowi prof. J. Soboty z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu za współpracę przy realizacji pomiarów.

6. Literatura

- [1] Tavoularis S.: Measurement in fluid mechanics. Cambridge University Press 2005.
- [2] Zych M.: Wykorzystanie metod jądrowych w badaniach transportu hydraulicznego fazy stałej w rurociągu pionowym. Rozprawa doktorska, AGH WFiIS, Kraków 2006.
- [3] 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.
- [4] Mizerski W., Szamałek K.: Geologia i surowce mineralne oceanów. PWN, Warszawa 2009.
- [5] AEA Technology – QSA Holdings Ltd., katalog firmowy, www.aeat-qa.com/html/index_sources.html
- [6] 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.
- [7] Charlton J.S., et all.: Guidebook on radioisotope tracers in industry. IAEA Technical Reports Series No. 316, Vienna 1990.
- [8] Petryka L., Zych M., Hanus R.: Stanowisko do oceny metod pomiaru przepływu cieczy w rurociągu. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 54, Vol. 54, Nr 12/2008, str. 863-865.
- [9] Beck M.S., Płaskowski A.: Cross-correlation flowmeters. Adam Hilger, Bristol 1987.
- [10] 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.
- [11] Petryka L., Oszejec J.: The cross-correlation method of solid particle velocity measurements in industry. Nuclear Geophysics Vol. 7, No. 2, 1993, 323 - 333.
- [12] Piersol A. G.: Time delay estimation using phase data. IEEE Transactions on ASSP, Vol. 29, No. 3, June 1981.
- [13] Hanus R.: Estymacja czasu opóźnienia z fazy wzajemnej gęstości widmowej mocy. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 53, Nr 9bis/2007, str. 206-208.
- [14] Bendat J.S., Piersol A.G.: Random data - analysis and measurement procedures. John Wiley, New York 2000.
- [15] Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.

otrzymano / received: 19.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 15.03.2010

artykuł recenzowany