

Leszek PETRYKA¹, Marcin ZYCH¹, Robert HANUS²¹AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ZASTOSOWAŃ FIZYKI JĄDROWEJ²POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH**Stanowisko do badań metod pomiaru przepływu cieczy w rurociągu****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.fij.agh.edu.pl**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. Zainteresowania naukowe: zastosowanie technik pomiarowych w badaniach procesów przemysłowych, analiza sygnałów, projektowanie i budowa instalacji laboratoryjnych.

e-mail: zych@novell.fij.agh.edu.pl**Dr inż. Robert HANUS**

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

e-mail: rohan@prz.edu.pl

- tomografię elektryczną,
- tomografię promieniowania gamma i X,
- metody jądrowe: absorpcyjną (źródeł zamkniętych) i znaczników promieniotwórczych [3, 4].

Ostatnie z wymienionych metod - absorpcyjna i znaczników promieniotwórczych są od wielu lat rozwijane w Katedrze Zastosowań Fizyki Jądrowej Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie [5].

2. Stanowisko badawcze

W celu testowania wybranych metod pomiarowych oraz badania przepływów, mogących zawierać ciecz i gaz, symulujących typowe procesy występujące np. w trakcie transportu mieszaniny ropa naftowa - gaz ziemny, zbudowano w Pracowni Radiometrii Przemysłowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH instalację laboratoryjną. Założenia do projektu były następujące:

- możliwość wzrokowej obserwacji przepływającego medium,
 - stabilność warunków przepływu i szczelność układu,
 - możliwość instalacji urządzeń pomiarowych w różnych konfiguracjach, w tym ustawienie gniazd montażowych dla aparatury jądrowej,
 - zapewnienie właściwej geometrii pomiaru dla metody absorpcyjnej,
 - łatwość obsługi i sterowania przepływem,
 - bezpieczeństwo wymagane przez Prawo Atomowe.
- Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 1.

Streszczenie

W artykule omówiono stanowisko laboratoryjne do badań metod pomiaru cieczy jedno- i dwufazowych z wykorzystaniem technik jądrowych. Jako przykład wykorzystania stanowiska przedstawiono wyniki pomiarów prędkości przepływu wody metodami: radioznacznikową i ultradźwiękową oraz pokazano możliwości rozszerzenia badań po wprowadzeniu fazy gazowej.

Słowa kluczowe: pomiary przepływów, metody jądrowe, znaczniki promieniotwórcze, przepływomierz ultradźwiękowy.

A laboratory stand for testing the methods used for measurement of the fluid flow in a pipe**Abstract**

The paper presents a laboratory stand constructed for testing the methods used for measurement of single- and two-phase flow. Especially the paper focuses on application of nuclear methods to measurement of stream velocity in a horizontal pipe with the future possibility of a gas phase inclusion. As an example the comparison of water velocity measurements by radiotracers and an ultrasonic meter is given.

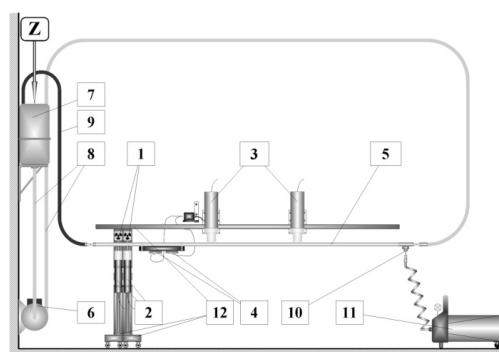
Keywords: velocity and flow rate measurements, nuclear methods, radiotracers, ultrasonic flow meters.

1. Wstęp

Współczesny przemysł bardzo często opiera swoje technologie o przepływy wielofazowe, w których występują co najmniej takie fazy jak: ciecz I – ciecz II, ciecz -gaz, ciecz - faza stała lub gaz - faza stała (transport pneumatyczny).

Trudności w opisie teoretycznym transportu mieszanin wielofazowych uzasadniają wykonywanie symulacji w laboratoryjnych instalacjach badawczych [1]. Także metody pomiarowe, którymi dzisiaj dysponujemy, nie zawsze mogą znaleźć zastosowanie do badania przepływu bardziej złożonych mieszanin. Obecnie w tej dziedzinie, szczególnie intensywnie rozwijane są metody wykorzystujące następujące techniki [2]:

- przepływomierze Coriolisa,
- przepływomierze ultradźwiękowe,



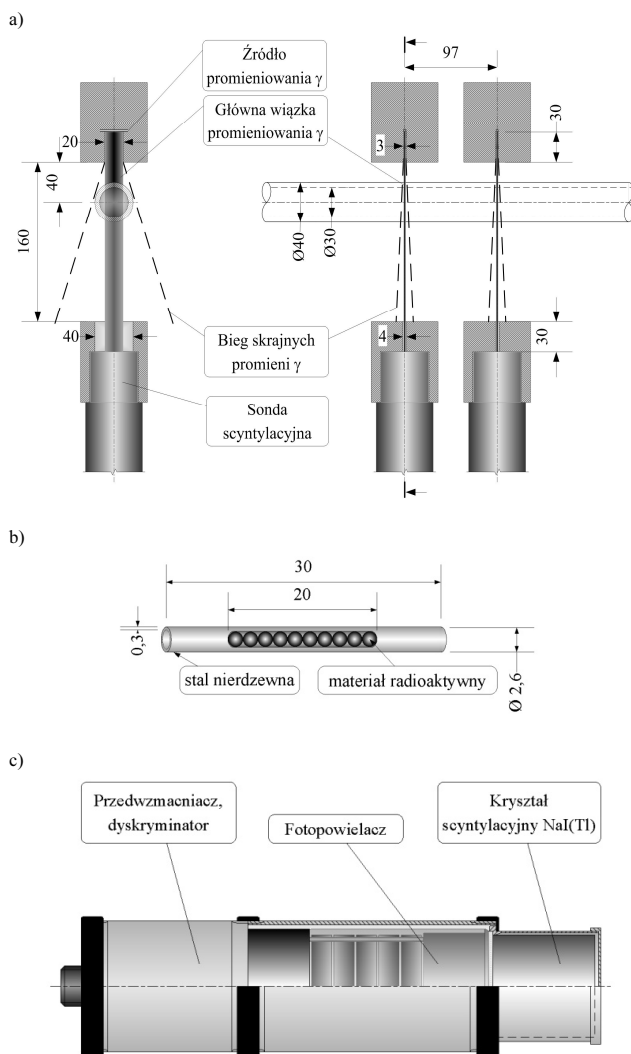
Rys. 1. Schemat instalacji (opis w tekście)

Fig. 1. Scheme of the installation

Układ hydrauliczny został zbudowany jako obieg zamknięty z odpowietrzającym zbiornikiem (7), stanowiącym również pojemnik wyrównawczy cieczy. Przepływ wody jest wymuszany specjalną pompą (6) sterowaną za pomocą falownika. Zakres regulacji prędkości obrotowej pompy wynosi 1000 – 2800 obr/min, co odpowiada zmianom prędkości przepływu od 0,5 do 2,5 m/s. Odcinek pomiarowy rurociągu (5) został wykonany z bezbarwnej metalpleksowej rury o długości 4,5 m i średnicy wewnętrznej

30 mm, który z pompą oraz zbiornikiem wyrównawczym-odpowietrzającym został połączony za pomocą giętkich zbrojonych przewodów (8, 9). Przezroczysty odcinek pomiarowy pozwala na rejestrację obrazu fazy gazowej przy zastosowaniu szybkiej kamery lub wykonywanie dokumentacji fotograficznej. Dodatkowo bezpośrednio na części pomiarowej rurociągu przewidziano możliwość montażu sond ultradźwiękowych (4) lub testowanych przepływomierzy.

Do początkowej części odcinka pomiarowego może być włączane powietrze z kompresora (11) przez dyszę (10). Do montażu zestawów absorpcyjnych wykorzystano przesuwne wózki (12) wraz z prowadnicą szynową. Wózki wyposażone są w stoliki z otworami na kolimatory źródeł (1) oraz obejmę na detektory promieniowania gamma (2). System przesuwu pozwala na zmianę odległości detektor – źródło promieniowania za pomocą śruby pociągowej oraz zmianę odległości pomiędzy zestawami, czyli bazy pomiarowej. Szczegóły geometrii zestawu dla pomiaru metodą absorpcyjną przedstawiono na rysunku 2a. W eksperymentach używane są m.in. dwa źródła promieniowania gamma ^{241}Am X.103 AEA Technology QSA (rys. 2b) emitujące fotony o energii 59,5 keV oraz sondy z kryształami scyntylacyjnymi NaJ(Tl) typ SKG-1 firmy TESLA (rys. 2c). Wszystkie wymiary na rysunku 2 podane są w mm.

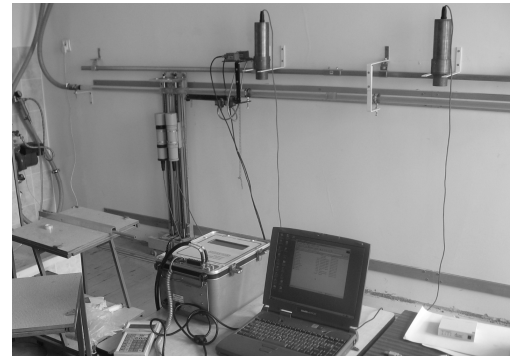


Rys. 2. (a) Geometria pomiaru dla metody źródeł zamkniętych; (b) źródło promieniowania gamma ^{241}Am X.103; (c) sonda scyntylacyjna SKG-1
Fig. 2. (a) Geometry of sealed sources method; (b) radioactive source ^{241}Am X.103; (c) nuclear probe SKG-1

Realizację pomiarów metodą znaczników promieniotwórczych umożliwiają zaczepty stałe na sondy wraz z kolimatorami (3) oraz możliwość wprowadzania roztworów promieniotwórczych po-

zez otwór odpowietrzający w zbiorniku wyrównawczym (miejsce podawania znacznika oznaczono na rysunku 1 literą Z). Zastosowany moduł akwizycji danych oraz oprogramowanie umożliwiają pobieranie danych z regulowanym czasem próbkowania od 0,1ms, a typowy czas pomiaru, wymagany do zebrania reprezentatywnej liczby wyników, wynosi 3-5 minut [5].

Widok ogólny stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek 3.



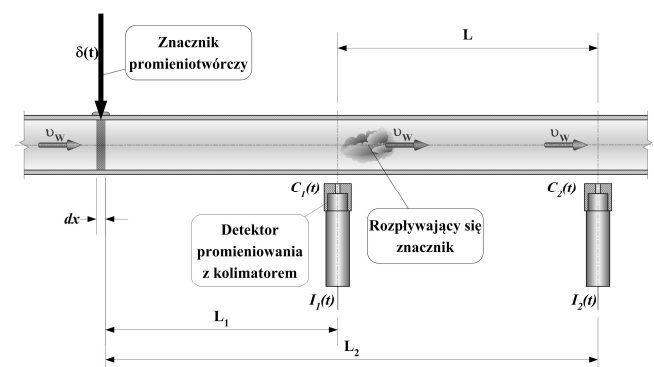
Rys. 3. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego
Fig. 3. General view of the laboratory stan

Ze względu na konieczność zachowania bezpieczeństwa przy stosowaniu izotopów promieniotwórczych, stanowisko akwizycji danych znajduje się w odległości ponad 2 m od źródeł promieniowania gamma.

3. Metoda znacznikowa

Badania radioznacznikowe umożliwiają dokładny pomiar prędkości fazy ciekłej, a uzyskiwane wyniki mogą stanowić odniesienie dla metody źródeł zamkniętych oraz miernika ultradźwiękowego. Zasada pomiaru znacznikowego została przedstawiona na rysunku 4. Rozpuszczony w wodzie izotop promieniotwórczy został wprowadzony impulsowo do przepływu i może być opisany funkcją $\delta(t)$. Dzięki pompie znacznik ulega wymieszaniu w całym przekroju poprzecznym rurociągu i przemieszcza się z tą samą prędkością v_w , co przepływająca woda. Izotop promieniotwórczy przesuwa się kolejno nad detektorami. Na wyjściu sond uzyskuje się zliczenia $I_1(t)$ i $I_2(t)$, które po odpowiedniej obróbce, dają sygnały proporcjonalne do natężenia promieniowania γ padającego na detektory i umożliwiają określenie stężenia znacznika $C_1(t)$ i $C_2(t)$ na brzegach odcinka pomiarowego [6].

Analiza statystyczna rejestrowanych sygnałów umożliwia wyznaczenie średniego opóźnienia transportowego τ_0 na odcinku rurociągu długości L [7].



Rys. 4. Zasada pomiaru radioznacznikowego
Fig. 4. Principle of the radiotracer measurement

Znając długość odcinka pomiarowego L można wyznaczyć średnią prędkość przepływu wody v_w z zależności:

$$v_w = L / \tau_0 \quad (1)$$

Metody znacznikowe umożliwiają uzyskiwanie stosunkowo dużych dokładności pomiaru do 0,1%, zwłaszcza przy stosowaniu statystycznych metod obróbki sygnałów. Istotną ich wadą są jednak obstrzeżenia prawne związane z wykorzystywaniem radionuklidów [8].

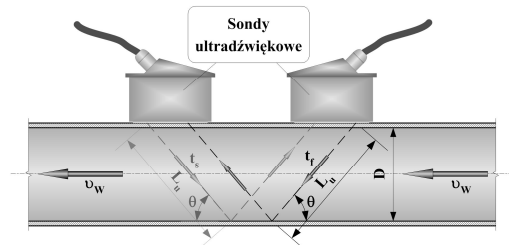
4. Metoda ultradźwiękowa

Niezależną metodą określania prędkości wody na prezentowanym stanowisku może być pomiar ultradźwiękowy. Zwykle przepływomierze ultradźwiękowe pracują w oparciu o pomiar różnicy czasów przejścia fali ultradźwiękowej wywołanych efektem Dopplera, a stosowane sposoby określania prędkości przepływu eliminują konieczność uwzględniania prędkości dźwięku w medium [9]. Dostępny na stanowisku miernik Uniflow 990 realizuje pomiar prędkości wody według zależności:

$$v_w = \frac{c^2 (t_f - t_s)}{4L_u \cos \theta} \quad (2)$$

gdzie: c – prędkość rozchodzenia się ultradźwięków w wodzie, t_s , t_f – czasy przejścia fali ultradźwiękowej przez odcinek L_u .

Umieszczone na rurociągu o wewnętrznej średnicy D dwie sondy są równocześnie nadajnikami i odbiornikami fali ultradźwiękowej (rys. 5). Pomiar jest wykonywany w układzie odbiciowym – wysyłana z jednej sondy fala akustyczna odbija się od ścianki rurociągu pod kątem θ , trafia do detektora sondy drugiej i odwrotnie. Kąt odbicia sygnału ustalany jest przy montażu i podobnie jak parametry rurociągu oraz rodzaj cieczy, wprowadzany do pamięci miernika.



Rys. 5. Zasada pomiaru przepływu metodą ultradźwiękową (opis w tekście)
Fig. 5. Principle of the ultrasonic flow measurement

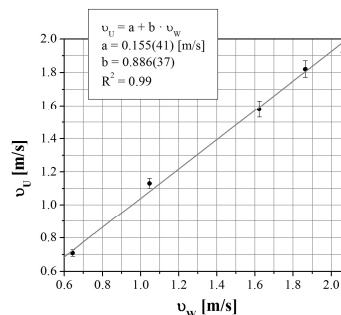
Realizacja pomiaru omawianą metodą wymaga właściwego przygotowania powierzchni styku sond z rurociągiem (oczyszczenie i pokrycie odpowiednią pastą przewodzącą), zdefiniowania parametrów określających geometrię rurociągu i rodzaj materiału, z jakiego jest zbudowany, oraz rodzaju transportowanego medium. Ponadto ze względu na zależność prędkości dźwięku od temperatury, pomiar wymaga stabilnych warunków termicznych lub kontroli temperatury przy pomocy odpowiednich czujników. Zaletą miernika Uniflow 990 jest szybki pomiar, gdyż wyniki mogą być uzyskiwane co 5 s z błędem granicznym $\pm(0,25 \div 1,0)\%$ w przypadku posiadania dodatkowych czujników temperatury i $\pm 3\%$ bez ich stosowania [10].

Do zalet metody ultradźwiękowej zaliczyć należy niski koszt pomiarów oraz brak tak ostrych norm prawnych, jakie są wymagane w przypadku stosowania metod jądrowych.

5. Przykładowe wyniki pomiarów

Na przedstawionym stanowisku mogą być prowadzone badania właściwości zarówno jądrowych, jak i ultradźwiękowych metod pomiaru przepływu różnych cieczy. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki porównywanych pomiarów prędkości przepływu wody metodami: znaczników promieniotwórczych (v_w) oraz ultradźwiękową (v_U). W prezentowanych pomiarach znaczni-

kiem był roztwór soli zawierający izotop ^{99m}Tc , pozyskiwany z generatora MTC-G-4.



Rys. 6. Zależność pomiędzy prędkością v_U i v_w
Fig. 6. The relation between v_U and v_w velocities

Przy określonych prędkościach obrotowych pompy znacznik wprowadzano impulsowo do zbiornika wyrównawczego i rejestrowano sygnały dostarczane przez sondy jądrowe. W tym samym czasie wykonywano pomiary miernikiem ultradźwiękowym. Ponieważ przyrząd Uniflow 990 w czasie prezentowanych pomiarów nie był jeszcze wyposażony w czujniki temperatury, ograniczono się do zapisywania temperatury otoczenia.

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono stanowisko laboratoryjne przeznaczone do badania właściwości jądrowych metod pomiaru przepływów jedno- i dwufazowych w rurociągu poziomym. Uniwersalna konstrukcja stanowiska pozwala na zastosowanie metody radioizotopowej, metody źródeł zamkniętych, a także porównawczo innych metod jak np. ultradźwiękowej. Ponadto przytoczono zasady pomiarów radioizotopowych i ultradźwiękowych oraz pokazano przykładowe wyniki pomiaru prędkości wody uzyskane obydwoma metodami. Prezentowane stanowisko może być wykorzystywane do oceny oraz kalibracji wielu innych mierników przepływu cieczy oraz mieszaniny fazy stałej i gazowej.

Autorzy składają podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe budowy stanowiska wykorzystywanego do badania przepływów dwufazowych.

7. Literatura

- [1] Graebel W. P.: Advanced fluid mechanics. Elsevier 2007.
- [2] Stavros Tavoularis: Measurement in fluid mechanics. Cambridge University Press 2005.
- [3] Charlton J.S., et al.: Guidebook on radioisotope tracers in industry. IAEA Technical Reports Series No. 316, Vienna 1990.
- [4] Dziunikowski B.: Zastosowania izotopów promieniotwórczych, t. 2. AGH WFiTJ, Kraków 1998.
- [5] Furman L., Petryka L., Stęgowski Z., Wierzbicki A.: Data acquisition and processing in radiotracer experiments. Nucl. Instrum. Meth. B 211 (2003), 436–442.
- [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] 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.
- [8] Zych M.: Wykorzystanie metod jądrowych w badaniach transportu hydraulicznego fazy stałej w rurociągu pionowym. Rozprawa doktorska, AGH WFiIS, Kraków 2006.
- [9] Waluś S.: Przepływomierze ultradźwiękowe. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [10] Controlotron. System 990 Uniflow - Field Manual. New York, 1993.