

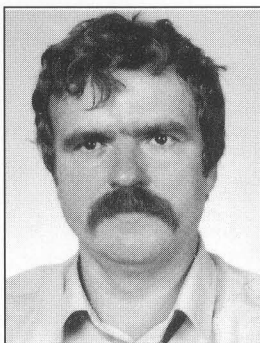
**Janusz POSPOLITA, Mirosław KABACIŃSKI, Cezary CHWASTEK**

POLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I APARATURY PRZEMYSŁOWEJ

## Własności metrologiczne i możliwości zastosowań przepływomierzy z rurkami spiętrzającymi oraz mikrozwężkami

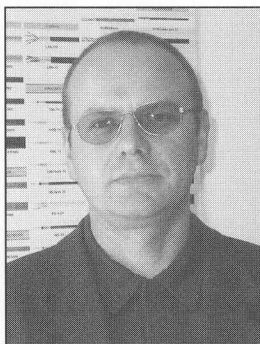
dr hab. inż. Janusz POSPOLITA

Absolwent Politechniki Wrocławskiej Wydziału Mechaniczno – Energetycznego, 1978. Jest profesorem Politechniki Opolskiej pracuje w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej. Autor lub współautor ponad 80 publikacji i kilku monografii. Specjalizuje się w metrologii energetycznej, badaniach maszyn i urządzeń energetycznych.



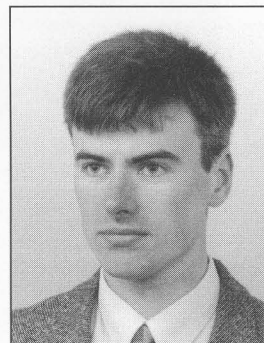
mgr inż. Cezary CHWASTEK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu. Studia ukończył 1992 roku na kierunku Elektroenergetyka. Od 1994 roku pracownik firmy Intral – Opole, gdzie zajmuje się pomiarami energetycznymi oraz pomiarami przepływu płynów.



mgr. inż. Mirosław KABACIŃSKI

Doktorant Politechniki Opolskiej. Specjalizuje się w mechanice płynów, metodach numerycznych i technikach komputerowych. Jego praca doktorska dotyczy nowych rozwiązań konstrukcyjnych piętujących czujników przepływu.



## 2. Przykłady kształtów i rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy

W przypadku rurek spiętrzających, stosowanym czujnikiem jest kształtka umieszczona w rurociągu z odpowiednio rozmieszczonymi otworami służącymi do odbioru ciśnienia (rys. 1a). Ciśnienie

### Streszczenie

W pracy przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne przepływomierzy piętujących, w których czujnikami są rurki uśredniające ciśnienie dynamiczne oraz mikrozwężki. Podano przykłady numerycznych badań piętujących czujników przepływu. Omówiono ich własności metrologiczne i eksploatacyjne. Podano przykłady zastosowań.

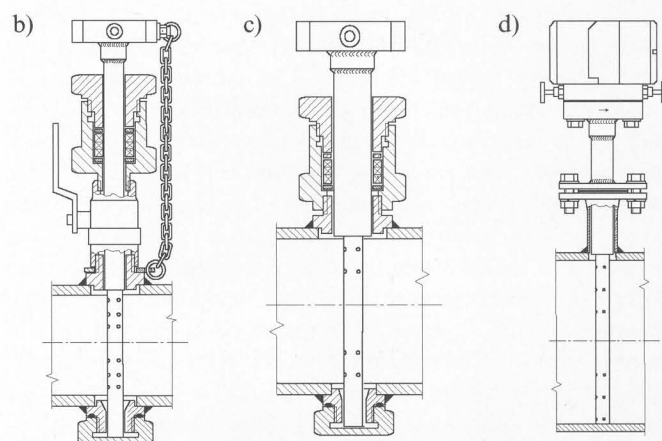
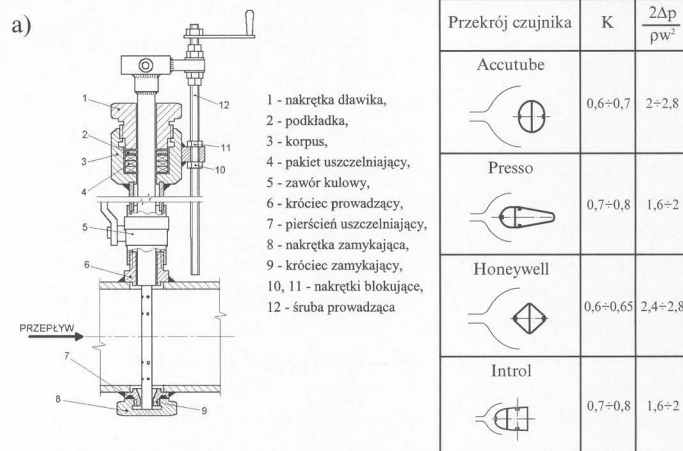
### Abstract

Constructions of impact flowmeters based on averaged pitot probes and micro-venturi tubes are presented in this paper. Examples of numerical simulations of impact flowmeters are displayed. Metrological and operating properties of these probes are shown. Moreover examples of their applications are given.

### 1. Wstęp

Wzrastające wymagania odnośnie dokładności pomiaru strumienia masy oraz minimalizacji strat energetycznych spowodowały wzrost zainteresowania przepływomierzami z rurkami spiętrzającymi. Metoda pomiaru znana od dawna coraz powszechniej jest stosowana w Europie Zachodniej i Stanach Zjednoczonych. Konkuruje z kryzami pomiarowymi dzięki niższym kosztom eksploatacji i montażu. Przepływomierze z czujnikami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne stanowią również alternatywę dla przepływomierzy elektromagnetycznych i ultradźwiękowych ze względu na radykalnie wzrastający koszt tego typu przepływomierzy przy dużych średnicach rurociągu.

Innym rozwiązaniem pomiaru prędkości w kanale jest wykorzystanie czujnika mikrozwężkowego. Mimo, że wyznacza on prędkość miejscową, to odpowiednio dobrany układ mikrozwężek umożliwia pomiar prędkości średniej. Zaletą układu jest możliwość stosowania przy małych prędkościach przepływu i odporność na wysokie temperatury medium, np. spaliny.



**Rys. 1a** Przepływomierz z czujnikiem spiętrzającym ciśnienie w postaci kształtki z otworami impulsowymi wraz z przykładami rozwiązań technicznych; a) wersja z możliwością montażu i demontażu czujnika przy pracującej instalacji, b) podobna wersja dla niskich ciśnień i temperatur medium, c) czujnik z mocowaniem dławikowym, d) czujnik z mocowaniem kołnierzym i przetwornikiem różnicy ciśnień mocowanym bezpośrednio na czujniku.

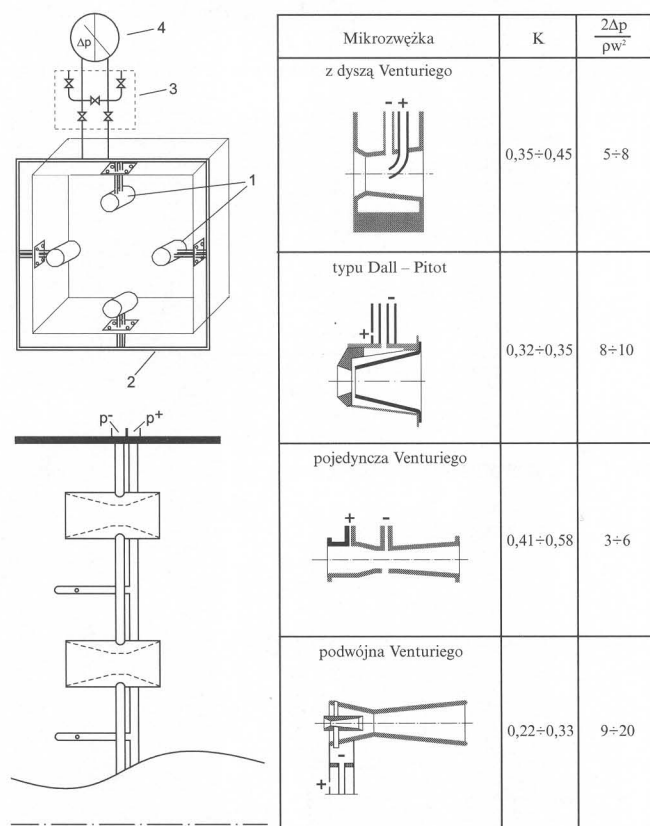
różnicowe mierzone w komorach wewnątrz kształtki jest sumą ważoną ciśnień powstających na wlotach otworów. Wartość uzyskiwanej różnicy ciśnień przy danej średniej prędkości przepływu w rurociągu zależy od kształtu przekroju czujnika oraz od liczby

i rozmieszczenia otworów w czujniku. W literaturze szczegółowo opisano metodykę doboru liczby i rozstawu otworów [1,2,3,4]. Na rys. 1a przedstawiono przykłady spotykanych przekrojów czujników oraz uzyskiwanych spiężeń odniesionych do ciśnienia dynamicznego napływającej strugi  $\rho w^2/2$ . Na rysunku tym przedstawiono również rozwiązania konstrukcyjne czujników [5]. Zależność wiążąca średnią prędkość w przekroju przepływowym z mierzoną różnicą ciśnień  $\Delta p$  ma postać

$$w = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością płynu, a  $K$  współczynnikiem przepływu.

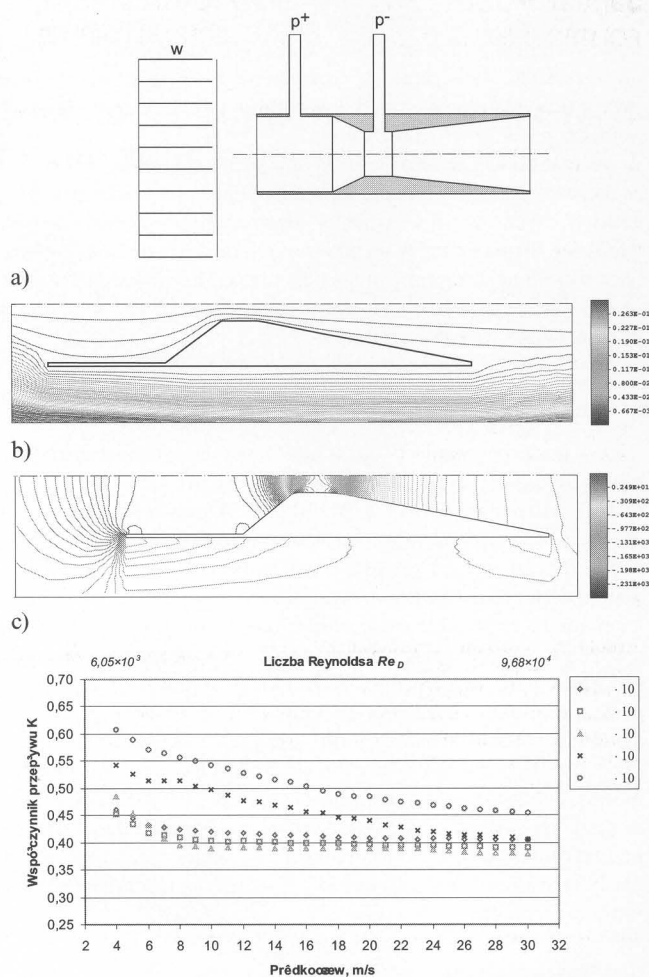
Pewnym alternatywnym rozwiązaniem są układy pomiaru przepływu oparte na czujnikach, których elementami są mikrozwężki [6, 7]. Na rys. 1b przedstawiono spotykane konstrukcje mikrozwęzek, a także wartości uzyskiwanych na nich spiężeń. Przedstawiono również schematy układów pomiarowych opartych na mikrozwęzkowych czujnikach przepływu zastosowane w kanale kołowym i prostokątnym [7]. Układy tego typu mogą zostać indywidualnie wywzorcowane np. metodą całkowania bryły prędkości [8]. Wstępnie ich charakterystykę określić można również na drodze obliczeń numerycznych. Dostępne oprogramowanie [9] umożliwia analizę metrologiczną tego typu układów pomiarowych w złożonych geometrycznie systemach przepływowych.



Rys. 1b Przepływomierze oparte na mikrozwęzkach i sondach Pitota oraz przykłady mikrozwęzek.

### 3. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych

Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych służących takiemu doborowi przewężenia  $\beta = d/D$  i kształtu mikrozwężki pojedynczej, która dawałaby możliwie maksymalne – przy danej prędkości napływu – spiężenie oraz posiadała korzystną charakterystykę metrologiczną. Sformułowano model matematyczny oparty na równaniach Reynoldsa i standardowym modelu turbulencji  $k-\epsilon$  [10, 11].



Rys. 2. Izolinie funkcji prądu (a), rozkłady ciśnień (w Pascalach) (b) oraz wyniki obliczeń dla wyznaczenia modułu mikrozwężki dającej największe spiężenie (c).

W badaniach wykorzystano doświadczenia autorów uzyskane przy numerycznych badaniach przepływomierzy zwężkowych w różnych układach przepływowych [12,13,14]. Równania modelu matematycznego rozwiązano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania FIDAP [9]. Dyskretyzację obszaru obliczeniowego wykonano przy użyciu programu GAMBIT [15].

Wyniki obliczeń wskazują, że mikrozwężka o przewężeniu  $\beta = (d/D)^2 = 0,089$ , gdzie  $D$  jest średnicą wlotu, a  $d$  średnicą przewężenia – daje największe spiężenia (największe wartości współczynnika przepływu  $K$ ). Jednocześnie charakterystyka zwężki jest liniowa już od stosunkowo małych prędkości strumienia.

### 4. Niepewność pomiaru strumienia masy

Uzyskiwane na drodze numerycznej wyniki umożliwiają wyznaczenie, często z wystarczającą dokładnością, charakterystyki przepływomierza czy też określenia najlepszej jego lokalizacji w niejednokrotnie złożonym układzie przepływowym. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy zachodzi konieczność zainstalowania przepływomierza w miejscach, gdzie z braku wystarczająco długich odcinków prostych przewodu, występuje deformacja profilu prędkości [16].

W przypadku większości przepływomierzy z kształtkami (rurkami) spiężającymi, współczynnik przepływu  $K$  jest stały od pewnej wartości liczby  $Re$ , a niepewność określenia jego wartości określa się na poziomie 2%. W przypadku pomiaru strumienia przy mniejszych liczbach Reynoldsa należy skorygować wartość  $K$  np. w oprogramowaniu (charakterystyce) samego przetwornika różnicy ciśnień czy w systemie pomiarowym.

Określona wyżej niepewność ujmuję również wpływ intensywności turbulencji oraz efektów związanych ze ściślnością gazów na wartość K. Te ostatnie są stosunkowo małe, gdyż uzyskiwane przeciętnie spiętrzenia na rurkach uśredniających są zdecydowanie mniejsze niż w przypadku zwężek.

Wyznaczenie strumienia masy lub strumienia objętości, a także niepewności jego pomiaru wymaga podania średnicy rurociągu, gęstości płynu, różnicy ciśnień i niepewności wyznaczenia tych wielkości. Strumień masy wynika z przemnożenia średniej prędkości w określonej wzorem 1 przez pole przekroju rurociągu i gęstość płynu. Niepewność pomiaru strumienia masy można – w pewnym uproszczeniu – wyrazić wzorem

$$\delta_{q_m} = \left[ \delta_K^2 + 4\delta_D^2 + \frac{1}{4}(\delta_p^2 + \delta_{\Delta p}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

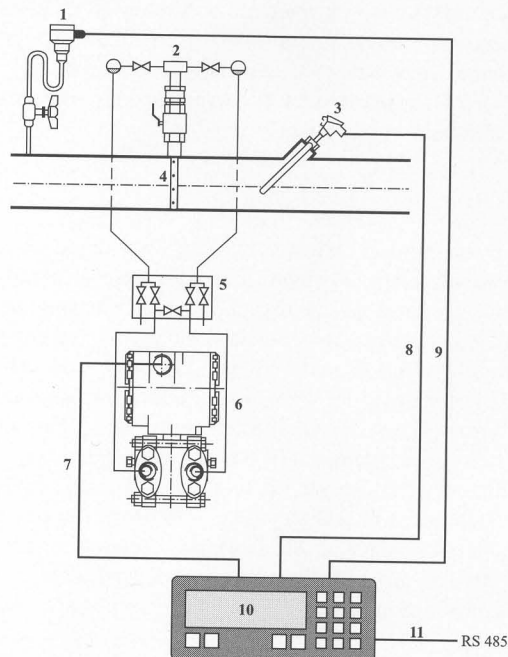
Niepewność pomiaru  $\delta_D$  średnicy rurociągu można przyjąć równą zero, jeśli jej pomiar zostanie wykonany zgodnie z zaleceniami norm np. PN 93/M – 53950/01 [17]. W innym przypadku lub kanale o innym przekroju niepewność tę należy oszacować. Niepewność wyznaczania gęstości płynu  $\delta_p$  można określić wg metodyki podanej w cytowanej już wcześniej normie. Dotyczy to zarówno pomiaru strumienia masy wody, pary wodnej, gazów oraz ich mieszanin. Niepewność pomiaru różnicy ciśnień można ocenić na podstawie podanej przez producenta klasy przetwornika. W przypadku, gdy znana jest klasa dokładności przyrządu to przedziały błędów granicznych należy traktować jako niepewność pomiaru przy poziomie ufności większym od 95%. Ostatecznie stwierdzić można, że uzyskiwana niepewność pomiaru strumienia masy nie ustępuje tej, jaką uzyskuje się realizując pomiar metodą zwężkową pod warunkiem, że rozkład prędkości w kanale pomiarowym jest ustabilizowany i dokonana się korekty K od Re dla rzeczywistych warunków przepływu.

## 5. Przykłady układów pomiarowych

Przeptywomierz z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne może być stosowany w różnych układach pomiarowych. Na rys. 3 przedstawiono rozwiązanie, w którym rurka spiętrzająca wraz z przetwornikiem różnicy ciśnień pracuje jako przepływomierz będący elementem układu pomiaru strumienia energii cieplnej w parze wodnej. Sygnał pomiarowy z przetwornika różnicy ciśnień, podobnie jak sygnały pomiarowe z przetwornika ciśnienia i czujnika temperatury doprowadzone są do licznika energii cieplnej. Tę metodę wykorzystać można w układach pomiarowych przepływu i strumienia energii cieplnej w systemach ciepłowniczych, zwłaszcza w przypadku rurociągów o dużych średnicach. Jest to rozwiązanie zdecydowanie tańsze od kryzy czy przepływomierza ultradźwiękowego, nie wprowadza również dodatkowych oporów przepływu. Należy zaznaczyć, że tego typu układ można zastosować – z odpowiednio skonfigurowanym licznikiem do pomiaru strumienia masy gazów i ich mieszanin.

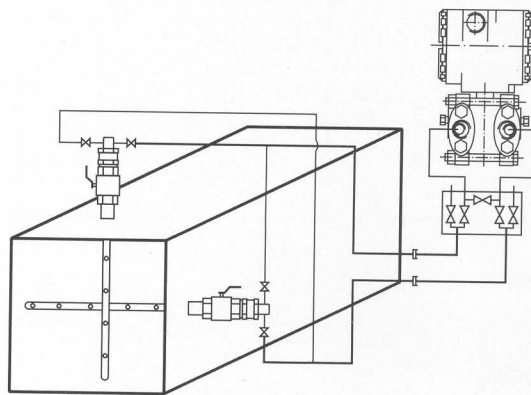
Na rys. 4 przedstawiono układ pomiaru przepływu powietrza bądź spalin w kanale o przekroju prostokątnym. Dwa czujniki umieszczone prostopadle czynią układ pomiarowy mniej wrażliwy na zaburzenia profilu prędkości. Układy tego typu wymagają najczęściej indywidualnego wzorcowania. Na rys. 5 przedstawiono układ umożliwiający okresowe przedmuchiwanie czujnika sprężonym powietrzem. Konstrukcja czujnika umożliwia również bezpośrednie dotarcie do komór uśredniających ciśnienie w celu usunięcia z nich zanieczyszczeń stałych. Układ taki stosowany jest w przypadku pomiaru przepływu zapyłonych spalin czy zapyłonego powietrza. Jest również możliwość wykorzystania jednego czujnika do pomiarów doraźnych w kilku rurociągach o tej samej średnicy, np. przy kontroli rozplywu powietrza chłodzącego czy uszczelniającego. Na rys. 6 przedstawiono rozwiązanie, które umożliwia doraźny bądź ciągły pomiar przepływu w rurociągu umieszczonym pod ziemią. W przypadku instalacji gazowych po-

miar technologiczny przepływającego gazu powinien odbywać się za pomocą urządzeń pomiarowych bez ruchomych części i bez konieczności odgazowania odcinka pomiarowego.

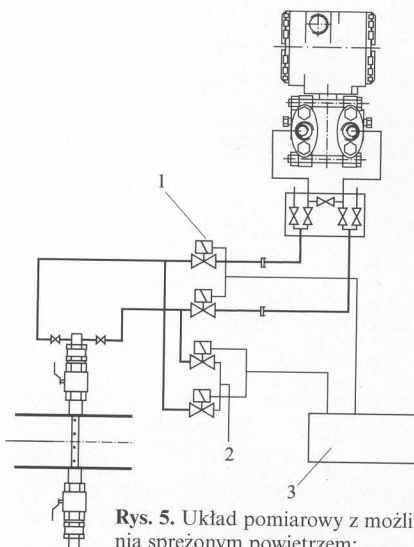


Rys. 3. Przepływomierz piętrzący w układzie pomiarowym strumienia energii w parze wodnej:

1 – przetwornik ciśnienia, 2 – czujnik przepływu, 3 – czujnik temperatury, 4 – rurka spiętrzająca, 5 – zawór blokowy, 6 – przetwornik  $\Delta p$ , 7 – sygnał przepływu, 8 – sygnał temperatury, 9 – sygnał ciśnienia, 10 – licznik energii cieplnej w parze (opcjonalnie z możliwością przeliczeń przepływów gazów i ich mieszanin), 11 – wyjście cyfrowe RS485



Rys. 4. Pomiar przepływu powietrza w kanale o przekroju prostokątnym

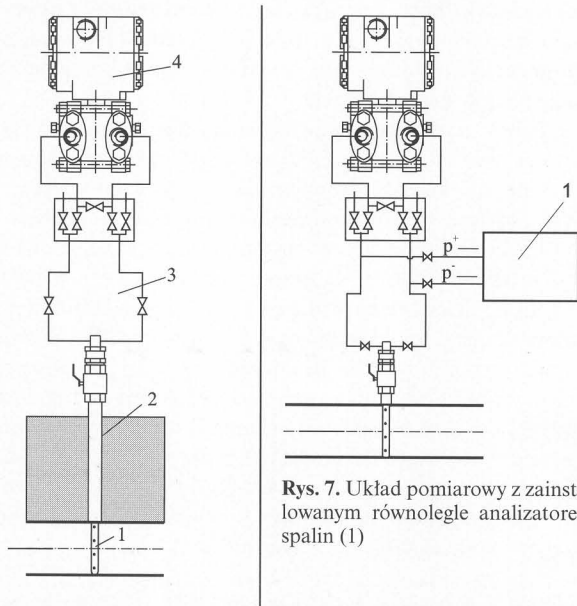


Rys. 5. Układ pomiarowy z możliwością okresowego czyszczenia sprężonym powietrzem:

1 – elektrozawory, 2 – doprowadzenie sprężonego powietrza, 3 – układ sterujący

W tym przypadku może być zainstalowany przepływomierz z rurką spiętrzącą. Rozwiązanie na rys. 7 przedstawia układ pomiarowy, który może okresowo współpracować z analizatorem gazu. Analiza składu gazu może być realizowana cyklicznie poprzez sekwencyjne sterowanie elektrozaworami zainstalowanymi w układzie pomiarowym.

Przepływomierze z rurkami uśredniającymi wykorzystać można do sprawdzania innych przepływomierzy metodą wzorca wtórnego [18]. Metoda ta może okazać się przydatna w przypadku, gdy demontaż sprawdzanego przepływomierza i jego transport na stanowisko wzorcownicze może być kłopotliwy i kosztowny.



Rys. 7. Układ pomiarowy z zainstalowanym równolegle analizatorem spaliny (1)

Rys. 6. Pomiar przepływu w rurociągu znajdującym się pod ziemią; 1 – Introbar, 2 – rura dystansowa, 3 – przewody impulsowe ogrzewane elektrycznie, 4 – przetwornik z blokiem zaworów i naczyniami odpowietrzającymi zainstalowany w ogrzewanej szafce

Uwidacznia się to szczególnie w przypadku rurociągów o dużych średnicach, gdzie różnice w kosztach są kilkukrotne. Podobnie wygląda problem montażu przepływomierzy. W przypadku większości przepływomierzy wymagane jest przecięcie rurociągu i spawanie dwóch kołnierzy. Przy dużych średnicach i wysokich parametrach czynnika podraża to w istotny sposób układ pomiarowy. W przypadku rurki spiętrzącej montaż wymaga wykonania otworu w rurociągu, spawania króćca i zainstalowania w nim przepływomierza. Niższe – w porównaniu z zainstalowaniem kryzy – są również koszty eksploatacyjne instalacji przepływowej związane z faktem, że rurka spiętrząca praktycznie nie stwarza dodatkowych oporów przepływu. Stosowane rozwiązania pozwalają na pomiar przepływów, przy wysokich parametrach czynnika, ciśnieniu do 250 barów i temperaturze do 250°C [5,19]. Przykładem

może być tutaj zastosowanie rurki spiętrzącej na zasilaniu wodą kotłów w elektrociepłowniach i elektrowniach.

Przepływomierze z czujnikami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne są konkurencyjne cenowo w stosunku do innych przepływomierzy, zwłaszcza ultradźwiękowych, elektromagnetycznych i masowych (Coriolisa).

## 6. Literatura

- [1] Waluś S., Dobór parametrów konstrukcyjnych uśredniających rurek spiętrzących. Materiały konferencyjne „Pomiary przepływów i poziomów w energetyce.” Ślesin, kwiecień 1986.
- [2] Waluś S., Przyczynek do modelu matematycznego rurki uśredniającej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 71, 1983.
- [3] Waluś S., Przepływomierze próbkujące; Pomiary, Automatyka, Robotyka 2/1999.
- [4] Kopacz S., Waluś S., Błędy nieścisłości uśredniających rurek spiętrzących, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka z. 69, 1983.
- [5] INTROBAR – czujnik przepływu uśredniający ciśnienie dynamiczne. Dokumentacja techniczna. INTROL – OPOLE 2000.
- [6] Kabaciński M., Pospolita J., Teoretyczna analiza własności metrologicznych mikrozwęzkowego czujnika przepływu, Gaz Woda i Technika Sanitarna 5/2002.
- [7] Kabza Z., Pomiary strumieni płynów (przewodnik), Politechnika Opolska, studia i monografie z 90, Opole 1996.
- [8] PN-81/M-42366, Pomiary przepływu płynu. Pomiary strumienia objętości metodą całkowania bryły prędkości. WN, Warszawa 1981.
- [9] Fidap 8.5, Fluid Dynamics Analysis Package. Fluid Dynamics International, Inc. 1999.
- [10] Ferziger J. H., Perić M., Computational Method for Fluid Dynamics. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1999.
- [11] Kabaciński M., Pospolita J., Numeryczne badania piętzącego czujnika przepływu, Pomiary Automatyka Robotyka 4/2001.
- [12] Pospolita J., Numerical Analysis of viscoelastic fluid flux through the orifice, Archiwum Mechaniki, Vol. 37, nr 1 – 2, 1990 s. 175 – 184.
- [13] Dobrowolski B., Kabza Z., Pospolita J., Teoretyczne i eksperymentalne badania wpływu pulsacji strumienia na charakterystyki der Drosselgeräte. VDI Verlag, Reihe 7: Strömungstechnik, Nr 193, 1992.
- [14] Pospolita J., The preliminary analysis of possibilities of the application of conventional flow – meters to measurements of unsteady flows. Archives of Hydro – Engineering and Environmental Mechanics. 1 – 4/1997.
- [15] Gambit 1.0, Fluid Dynamics Analysis Package. Fluid Dynamics International, Inc. 1999.
- [16] Kabza Z., O niepewności pomiaru strumienia objętości cieczy rurkami uśredniającymi, Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Nr 194, Opole 1993.
- [17] PN 93/M-53950/01, Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwęzek pomiarowych, Wydawnictwo normalizacyjne Alfa, Warszawa 1994.
- [18] Podręcznik Metrologii, Podstawy Praktyczne, Praca zbiorowa pod red. P. H. Sydenhama, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- [19] Pospolita J., Przepływomierz różnicowo – ciśnieniowy do pomiaru w kanale o przekroju zamkniętym. Patent P 315387.

**Title:** Metrological properties and ability of applications of self averaged pitot probes and micro – venturi tubes

Artykuł recenzowany

Ciąg dalszy ze strony 21

Poniżej podpisani, z obowiązku wynikającego z recenzowania tej książki musieli też zauważyć i wskazać jej stosunkowo nieznaczące mankamenty. I tak w analizie metrologicznej nie stosowano wykorzystywanego obecnie powszechnie w metrologii światowej opisu niedokładności pomiarów za pomocą niepewności, zalecanego według poradnika: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (1995), wydanego przez International Organization for Standardization i zalecanego do stosowania przez 7 międzynarodowych organizacji: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML (polskie tłumaczenie z komentarzami prof. J. Jaworskiego wydał Główny Urząd Miar). W leksykonie nie zamieszczono niektórych najnowszych haseł z różnych dziedzin termometrii, w tym dotyczących cyfrowego przetwarzania sygnałów, czy sztucznych sieci neuronowych (logiki rozmytej), wykorzystywanych obecnie w pomiarach temperatury zarówno ustalonej, jak i zmiennej w czasie, np. do korekcji dynamicznego przetwarzania termometrów. Podany na końcu spis literatury obejmuje w zdecydowanej większości publikacje i książki w języku ukraińskim i rosyjskim. Praktykuje się też w leksykonach opartywanie poszczególnych haseł inicjałami ich autorów.

Omawiana tu Encyklopedia Termometrii stanowi niezmiernie war-

tościową i unikalną pozycję. Pomimo kilku powyższych uwag krytycznych, wydaje się, że jej walory dydaktyczne sprawiają, że mogła by być wykorzystywana i w Polsce przez inżynierów, wykładowców i studentów specjalności metrologicznych wyższych szkół technicznych, jeśli tylko zdobędą się na przebrnięcie przez barierę ukraińskiego alfabetu. Język ukraiński, jako istotnie zbliżony do polskiego, po kilkudniowym treningu nie powinien stanowić większej przeszkody w zrozumieniu treści poszczególnych haseł. Książka jest więc warta polecenia wszystkim zainteresowanym tematyką pomiarów termicznych w Polsce.

Jeśli ukaze się drugie wydanie, to należało by je zaktualizować i rozszerzyć o wspomniane powyżej najnowsze, brakujące w niej hasła, o zachodnią bibliografię i przykłady rozwiązań aparatury czołowych producentów. Taka Encyklopedia Termometrii godna była by też przetłumaczenia na język angielski, a być może nawet i na polski, gdyż potrzeba sięgania do źródeł umożliwiających lepsze poznanie specyfiki pomiarów temperatury występuje dosyć powszechnie i na co dzień, a ciągle brak przystępnej i aktualnej literatury z tego zakresu.

Dr hab. inż. Waldemar Minkina profesor Politechniki Częstochowskiej  
Doc. dr inż. Zygmunt L. Warsza Polskie Towarzystwo Metrologiczne