

Dr Mirosław Kabaciński, dr hab. Janusz Pospolita – *Politechnika Opolska*  
inż. Janusz Polak – *ZRE Katowice S.A.*

## Zastosowanie układu walców jako podstawy konstrukcyjnej uśredniającej sondy piętrzącej

Pomiary strumieni masy i objętości są jednymi z najczęściej stosowanych pomiarów w praktyce technicznej. Obecnie stosowane są alternatywnie różne przepływomierze o odmiennych zasadach działania, różnej klasie i zróżnicowanych możliwościach aplikacyjnych, biorąc pod uwagę wartości parametrów fizycznych płynu.

Analiza metod pomiaru przepływu wskazuje, że w przypadku pomiarów strumieni w zróżnicowanych warunkach technicznych i technologicznych trudno znaleźć rozwiązanie uwzględniające zarówno względy techniczno-metrologiczne jak i finansowe.

Pewną możliwość pomiaru strumienia w tych warunkach dają uśredniające sondy piętrzące. Metoda pomiaru polega na umieszczeniu w strudze medium sondy, która piętrząc przepływ powoduje powstanie różnicy ciśnień na jej powierzchni. Ciśnienia odbierane w odpowiednich punktach na powierzchniach napływowej i odpływowej sondy są uśredniane w jej wewnętrznych komorach. Różnica tych uśrednianych ciśnień określa strumień, przy znanej gęstości płynu i charakterystyce sondy. Zaletą tej metody pomiaru jest prostota montażu czujnika (sondy) w układzie przepływowym, niestwarzanie dodatkowych oporów przepływu oraz możliwość pracy, podobnie jak w przypadku zwężek, przy wysokich temperaturach i ciśnieniach czynnika. Wadą są małe mierzone wartości różnicy ciśnień, szczególnie przy pomiarach przepływu gazów przy niskich prędkościach przepływu oraz niejednokrotnie zależność współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa. Spotkać można szereg rozwiązań technicznych tego typu przepływomierzy, które mimo wyżej wymienionych ograniczeń stosuje się od lat w praktyce przemysłowej.

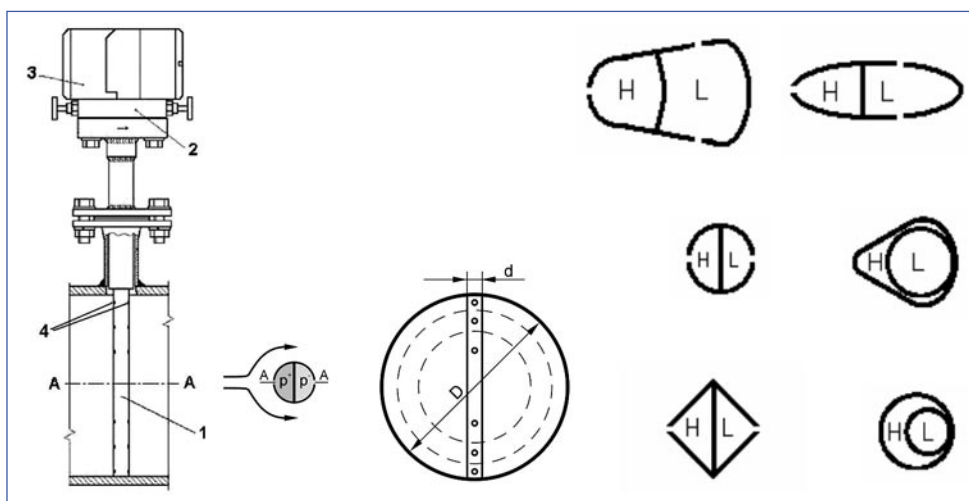
W przypadku omawianych sond, związek między średnią prędkością płynu w przekroju rurociągu a mierzonym ciśnieniem różnicowym jest następujący

$$w = K \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne sondy, schematyczny sposób rozmieszczenia otworów oraz przykładowe – spotykane w praktyce – poprzeczne przekroje (profile) sond. Profile te, przy stosowanych w metrologii wymaganiach, co do dokładności wykonania, a także konieczności separacji komór, stwarzają problemy technologiczne, odzwierciedlające się również w ich cenie.

Te ograniczenia i utrudnienia są przyczyną poszukiwań innych kształtów czujników oraz prostszych i tańszych technologii ich wykonania. Stąd też zainteresowanie czujnikiem zbudowanym z dwóch rurek okrągłych, wzajemnie na siebie oddziałujących po umieszczeniu ich w strudze płynu. Stosowane są czujniki okrągłe jedno- lub dwukomorowe. Te pierwsze wymagają odbioru ciśnienia statycznego na ścianie rurociągu, drugie – odpowiedniej konstrukcji zapewniającej separację komór uśredniających nadciśnienie i podciśnienie. Obie konstrukcje charakteryzują się zależnością współczynnika przepływu od wartości liczby Reynoldsa w dolnym zakresie mierzonych strumieni.

Czujnik składający się z dwóch niezależnych rurek, z których każda służy do odbioru i uśredniania jednego z ciśnień (nadciśnienia lub podciśnienia) rozwiązuje problem separacji komór zapewniając prostotę budowy i wykonania czujnika.



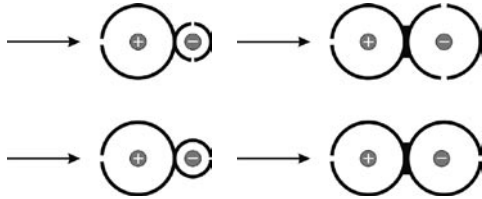
Rys. 1. Przepływomierz z uśredniającą rurką spiętrzącą

1 – uśredniająca rurka spiętrząca, 2 – blok zaworów, 3 – przetwornik różnicy ciśnień, 4 – otwory impulsowe, d – średnica zewnętrzna sondy spiętrzącej, D – średnica wewnętrzna rurociągu, p<sup>+</sup> – nadciśnienie, p<sup>-</sup> – podciśnienie spotykane profile stosowane w uśredniających sondach piętrzących

Analiza profili walcowych czujników

W pierwszym etapie poddano analizie numerycznej przyjęte układy przepływowe, aby do dalszych badań w tunelu aerodynamicznym wytypować te, o najkorzystniejszych cechach metrologicznych.

Rozpatruje się układy przepływowe zamieszczone na rys. 2.

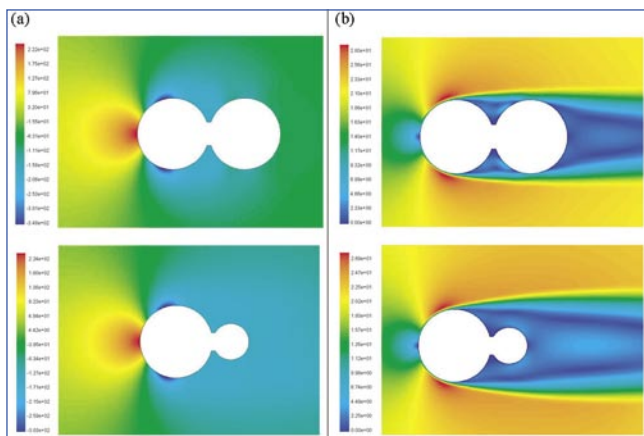


Rys. 2. Rozpatrywane układy przepływowe

Układy a) i b) różnią się średnicą rurki po stronie odpływowej. Rozpatruje się odpowiednio warianty z odbiorem ciśnienia odpowiednio z boku i z tyłu rurki po stronie odpływowej. Wyznaczając współczynniki K różnych układów najpierw rozpatrywano analizowane sondy jako czujniki zanurzone w strudze powietrza o płaskim profilu prędkości.

Analizie numerycznej poddano izotermiczny turbulentny przepływ płynu lepkiego, nieściśliwego o stałej gęstości. Rozpatrywano zagadnienie jako dwuwymiarowe dla przyjętego zakresu prędkości w przedziale 4–30 m/s.

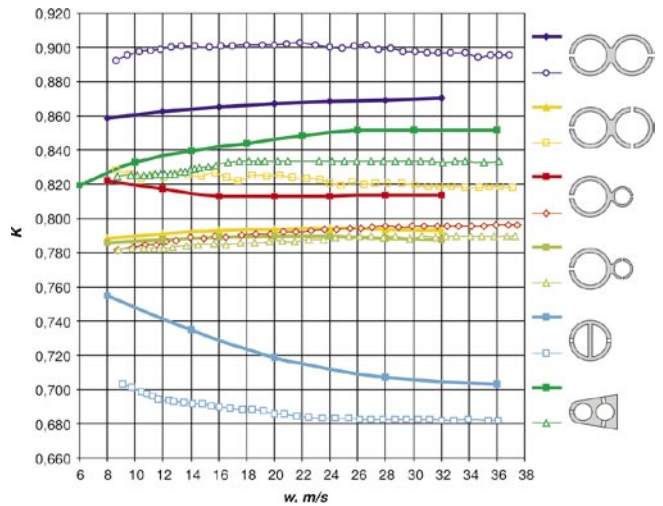
Równania modelu matematycznego rozwiązano metodą objętości skończonych z wykorzystaniem oprogramowania Fluent. Dyskretyzacji obszaru obliczeniowego dokonano przy użyciu programu Gambit.



Rys. 3. Rozkłady pól prędkości [m/s] (a) i ciśnień [Pa] (b) w wybranej chwili czasu dla dwóch odmiennych układów przepływowych

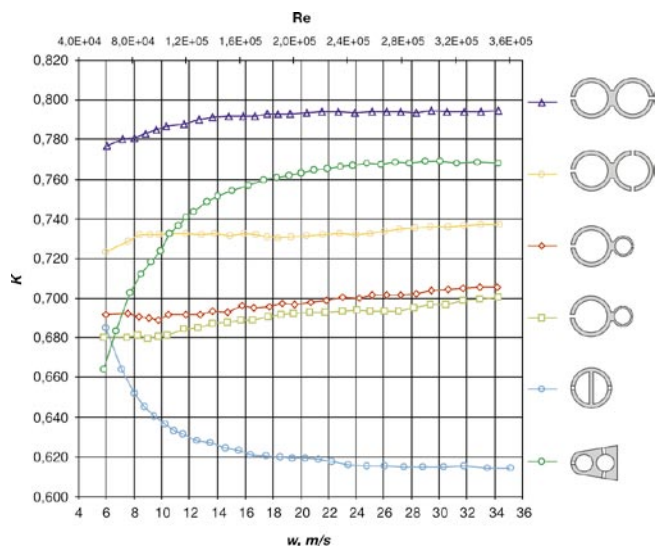
Dla przedstawionych na rysunku 2 układów przepływowych wykonano serie obliczeń. Ich wyniki przedstawiono graficznie na rysunku 3 w postaci rozkładów pól prędkości i ciśnienia, natomiast wartości współczynnika przepływu w funkcji prędkości czynnika przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 4 dodatkowo umieszczono – w celach porównawczych – wyniki obliczeń dla sondy kołowej dwukomorowej oraz sondy o przekroju opływowym. Płaskie charakterystyki układów zamieszczonych na rysunku 3b

wynikają z faktu, że punkt odbioru ciśnienia  $p^-$  zawsze znajduje się w wyrównanym polu ciśnień ujemnych wygenerowanych przez pierwszą rurkę. W układzie ze zróżnicowanymi rurkami 2a praktycznie nie ma znaczenia miejsce odbioru ciśnienia  $p^-$ . W przypadku układu 2b boczny sposób odbioru ciśnienia  $p^-$  daje większe pomiarowe spadki ciśnienia. Płaskie charakterystyki sond 2a i 2b zachęciły do wykonania ich prototypów i przeprowadzenia badań w tunelu aerodynamicznym. Warunki wykonania badań odpowiadały opływowi sondy strugą o płaskim profilu prędkości. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunku 4.

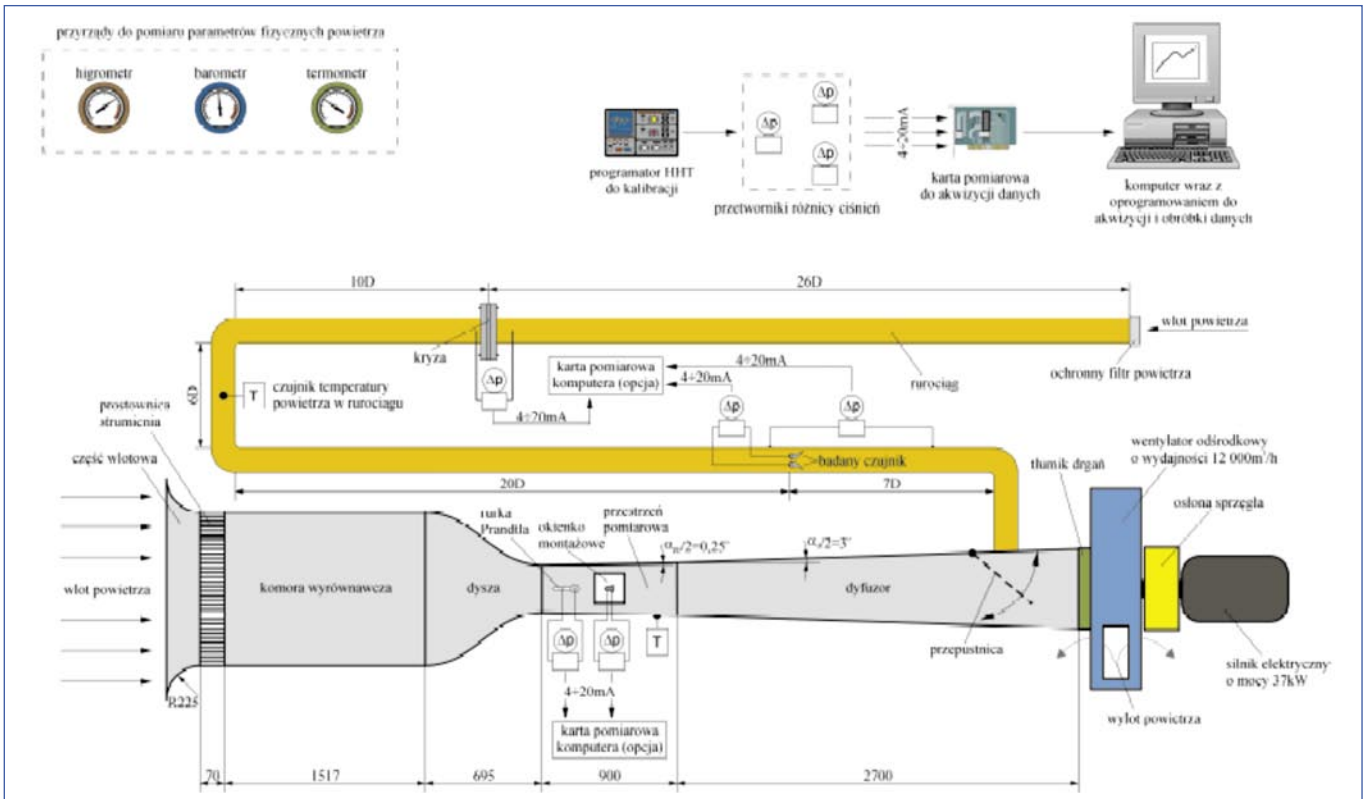


Rys. 4. Obliczone (linie pogrubione) i wyznaczone eksperymentalnie (linie cienkie) wartości współczynnika czułości badanych sond umieszczonych w strudze powietrza o płaskim profilu prędkości

Zdjęto również charakterystyki badanych sond po zainstalowaniu ich w rurociągu o średnicy  $D=152\text{mm}$ , które zamieszczono na rysunku 5. Przepływającym czynnikiem było powietrze. Również i tutaj widać, że badane sondy mają płaskie charakterystyki już od prędkości czynnika rzędu kilku m/s.



Rys. 5. Wartości współczynnika czułości eksperymentalnie badanych sond umieszczonych w rurociągu o średnicy  $D=152\text{mm}$



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego z oprzyrządowaniem do wzorcowania rurek spiętrzających

Na rysunku 5 umieszczono również charakterystyki sondy opływowej i okrągłej. Stwierdzić można, że w przypadku obu tych sond, wartość współczynnika czułości zmienia się znacznie w zakresie liczb Reynoldsa  $Re_D < 10^5$ . Różnice w wartościach współczynnika przepływu  $K$  na rysunkach 4 i 5 dla odpowiednich analizowanych sond (mniejsze dla sond umieszczonych w rurociągu) wynikają głównie z deprymogenicznego oddziaływania czujnika umieszczonego w rurociągu na strugę.

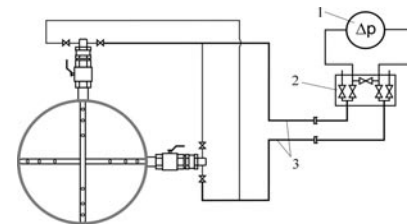
Analiza wyników przeprowadzonych obliczeń oraz badań laboratoryjnych potwierdziły wyjątkowe zalety nowego rozwiązania technicznego i konstrukcyjnego czujnika przepływu. Zwłaszcza istotne jest to, że wartość współczynnika  $K$  dla stosunkowo szerokiego zakresu prędkości przepływu jest stabilna i ma charakter zbliżony do liniowego (dla czujnika z mniejszą średnicą komory odbioru ciśnienia  $p$  z boku). Wyniki te dają również rękojmię bardzo dobrych parametrów metrologicznych dotyczących dokładności oraz powtarzalności pomiarów (a zwłaszcza, gdy będzie istniała konieczność indywidualnego wzorcowania). Badania przeprowadzono na stanowisku kontrolno pomiarowym, którego schemat przedstawiono na rysunku 6.

### Przykłady układów pomiarowych

Do pomiarów przepływu medium o niesymetrycznym profilu prędkości można wykorzystać – po wywzorcowaniu układu pomiarowego – dwa czujniki umieszczone prostopadłe, przedstawione na rysunku 7. Układ może służyć do pomiaru przepływu powietrza bądź spalin w kanale o przekroju okrągłym lub prostokątnym.

Rys. 7. Pomiar przepływu powietrza w kanale o przekroju okrągłym

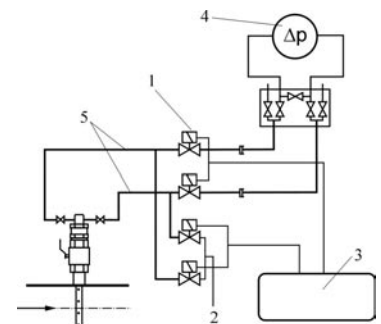
- 1 – przetwornik różnicy ciśnienia,
- 2 – blok zaworów,
- 3 – przewody impulsowe



Na rysunku 8 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 zapylnych spalin czy też powietrza. Możliwe jest również wykorzystanie jednego czujnika do pomiarów doraźnych w kilku rurociągach o jednakowej średnicy, wprowadzając go przez zawór kulowy, np. podczas kontroli rozpyłu powietrza chłodzącego czy uszczelniającego.

Rys. 8. Układ pomiarowy z możliwością okresowego czyszczenia sprężonym powietrzem

- 1 – elektrozawory,
- 2 – doprowadzenie sprężonego powietrza,
- 3 – układ sterujący,
- 4 – przetwornik różnicy ciśnień,
- 5 – przewody impulsowe



Przepływomierz z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne może być stosowany w różnych układach pomiarowych. Rurka spiętrzająca wraz z przetwornikiem różnicy ciśnień może pracować 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.

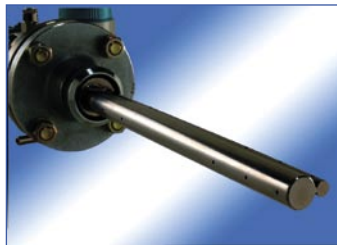
Tę metodę wykorzystać można w układach pomiarowych przepływu i strumienia energii cieplnej w systemach ciepłowniczych, zwłaszcza w przypadku rurociągów o większych średnicach. Jest to rozwiązanie zdecydowanie tańsze od kryzy czy przepływomierza ultradźwiękowego, nie wprowadza również dodatkowych oporów przepływu.

Należy zaznaczyć, że tego typu układ można zastosować – z odpowiednio skonfigurowanym licznikiem – do pomiaru strumienia masy gazów i ich mieszanin.

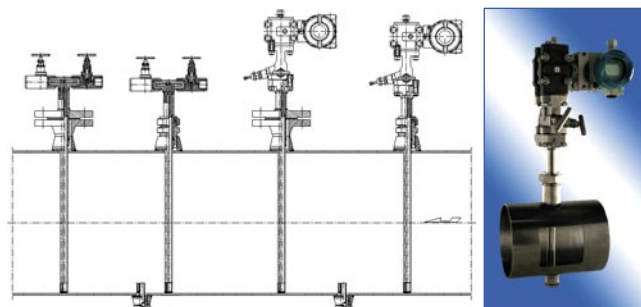
### Wytwarzanie

Zaprezentowany spiętrzający czujnik przepływu o zróżnicowanych średnicach komór pomiarowych wprowadzono do produkcji w Zakładach Remontowych Energetyki Katowice SA pod nazwą handlową TWIN-BAR®. Zakres produkowanych czujników przepływu przedstawiono na rysunku 9.

Obejmuje on podstawowo czujniki wykonane z rurek o odpowiednich średnicach podziałowych 12/6 mm i 25/12 mm. Właściwy dobór grubości ścianek oraz technologii łączenia pozwala na wykonanie sond pomiarowych dla rurociągów o średnicach od DN 50 do DN 1500. Wykonanie czujników dla większych średnic oraz wersji do wprowadzania do rurociągu na ruchu (tzw. System WET-TAP oraz HOT-TAP) wymaga indywidualnych uzgodnień z producentem.



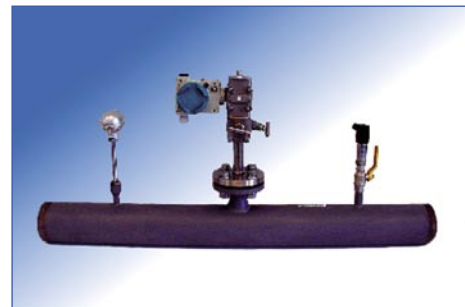
Typ czujnika	12/6; 25/12 mm.
Zakres średnic	DN50 – 1500 mm.
Media:	gazy lotne, ciecze, para wodna
Dokładność	≤ ±0,75%
Powtarzalność	±0,1%
Zakresowość	15-1
Ciśnienie	PN40
Temperatura	≤ 600°C



Rys. 9. Sposób montażu rurek spiętrzających TWIN-BAR®



Wersje podstawowe obejmują wykonanie z wpustem uszczelnianym pierścieniem zaciskowym lub przyłączem kotłnierзовym (PN kotłnierzy jest zależne od ciśnienia panującego w rurociągu). Sondy mogą być wykonane z dodatkowym podparciem dolnym usztywniającym, które zabezpiecza przed wibracjami dla większych prędkości przepływu. Sposób wyprowadzenia impulsów ciśnieniowych pozwala na zabudowę przetwornika różnicy ciśnień jako wersja rozłączna oraz kompakt wraz z zaworem blokowym.



Dla wersji kompakt konstrukcja głowicy pozwala na bezpośrednie podłączenie (poprzez złączki samozaciskowe) rurek impulsowych, którymi można doprowadzić gaz lub ciecz do czyszczenia komór pomiarowych. Jest to rozwiązanie nowatorskie, dotychczas nie stosowane. W warunkach technologicznych dodatkowe wpusty mogą również służyć do szybkiego odpowietrzania instalacji pomiarowej (nie przez komory przetwornika różnicy ciśnień).

