

Jerzy GRYCHOWSKI, Krystyna KOSIAK,  
Jerzy ROKITA, Tadeusz WILK

BADANIE SOND WALCOWYCH DO POMIARU PRĘDKOŚCI I CIŚNIEŃ  
W OBSZARZE PRZEPŁYWAJĄCEJ CIECZY

**Streszczenie.** Przedstawiono podstawy teoretyczne działania sond walcowych. Omówiono konstrukcję sond, budowę stanowiska wzorcowniczego i sposób wzorcowania sond. Wskazano na wpływ średnicy sondy na jej wskazania. Zwrócono uwagę na możliwość praktycznego wykorzystania sond.

Wprowadzenie

Sondy walcowe, przy stosunkowo prostej i nieskomplikowanej metodzie pomiaru, umożliwiają pomiar ciśnienia i prędkości cieczy (wraz z określeniem jej kierunku) w danym punkcie płaszczyzny prostopadłej do osi sondy.

Sonda walcowa stanowi rurkę o niewielkiej średnicy, jednostronnie zamkniętą, z wykonanym otworkiem impulsowym w bezpośredniej bliskości zamkniętego końca. Wykonanie sondy walcowej jest możliwe we własnym zakresie z racji jej bardzo prostej konstrukcji i dlatego też sondy walcowe zasługują na bliższe zainteresowanie się nimi.

Omówiony poniżej sposób stosowania sond walcowych jest oparty o doświadczenia Katedry Maszyn Wodnych Słowackiej Wyższej Szkoły Technicznej w Bratysławie [2] i różni się zasadniczo od omawianego w literaturze [3].

1. Teoria sondy walcowej

Zasada działania sondy walcowej wynika z teorii bezcyrkulacyjnego opływu walca (rys. 1), cieczą idealną. Z teorii tej wynika [1], że na powierzchni walca, składowe prędkości cieczy w kierunku promieniowym  $w_r$  i obwodowym  $w_\varphi$ , odpowiednio wynoszą:

$$w_r = 0,$$

(1)

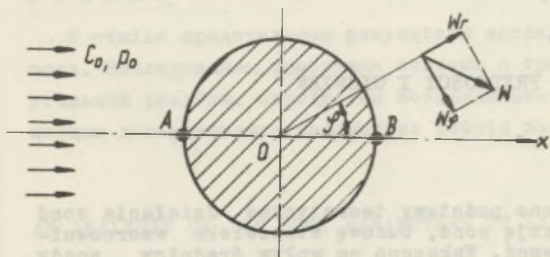
$$w_\varphi = -2 c_0 \sin \varphi,$$

gdzie:

$c_0$  - prędkość przepływu cieczy w rozpatrywanym obszarze.

Bezwzględna wartość prędkości  $|w|$  wynosi więc:

(2)



Rys. 1. Opływ bezcyrkulacyjny walca

Zależność (2) określa rozkład prędkości cieczy na powierzchni walca, przy jego bezcyrkulacyjnym opływie cieczą idealną. Dla  $\varphi = 0$  oraz  $\varphi = \pi$  (a więc w miejscach przecięcia walca osią  $Ox$ ) wartość prędkości cieczy na powierzchni walca  $w = 0$ . Wnioskować można również, że na powierzchni walca

teoretycznie nie występuje zjawisko oderwania strugi.

Dla strugi na powierzchni walca słuszne jest równanie Bernoulliego w postaci:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{c_0^2}{2g} = \frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2g}, \quad (3)$$

(gdzie:  $\gamma$  - ciężar właściwy cieczy), skąd dla punktu przecięcia się osi  $Ox$  z powierzchnią walca w punkcie A (gdzie  $w = 0$ ).

$$p_A = p_0 + \gamma \frac{c_0^2}{2g}, \quad (4)$$

a wówczas

$$c_0 = \sqrt{\frac{2g(p_A - p_0)}{\gamma}}. \quad (5)$$

Równanie (5) może posłużyć do wyznaczenia wartości prędkości  $c_0$ , gdy znane są wartości ciśnień  $p_0$  i  $p_A$ .

Ponieważ na powierzchni walca prędkość  $w$  jest funkcją  $w(\varphi)$ , przeto zgodnie z zależnością (3) i ciśnienie  $p$  na powierzchni walca będzie funkcją  $p(\varphi)$ , w myśl relacji:

$$p = p_0 + \gamma \frac{c_0^2 - 4c_0^2 \sin^2 \varphi}{2g}. \quad (6)$$

Tak więc na powierzchni walca ciśnienie  $p = p_0$  (wyrównuje się z ciśnieniem w obszarze cieczy), gdy

$$c_0^2 - 4 c_0^2 \sin^2 \varphi = 0, \quad (7)$$

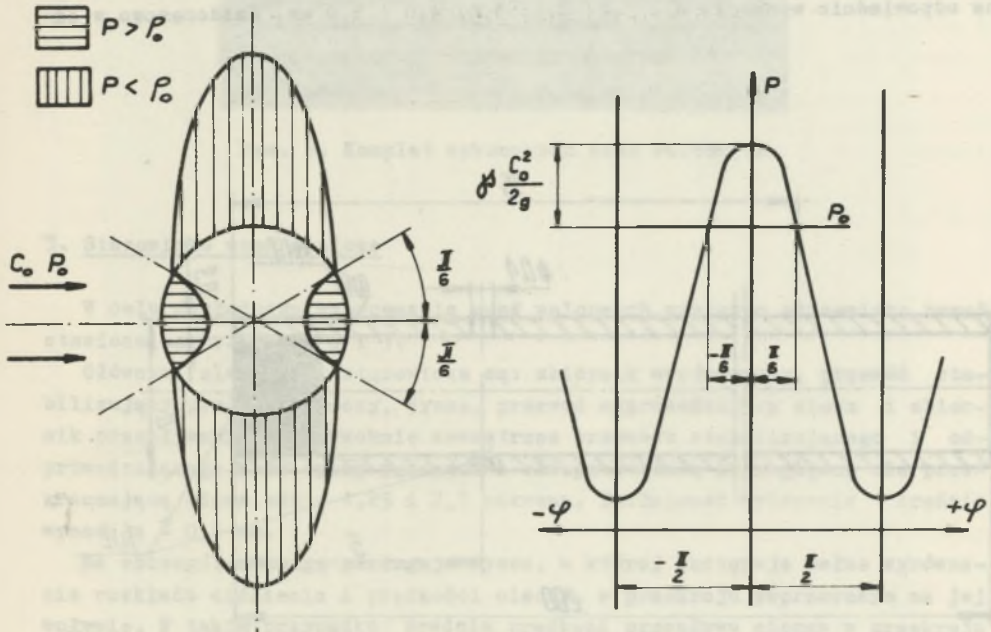
co odpowiada warunkowi

$$\sin^2 \varphi - \frac{1}{4} = 0. \quad (8)$$

Powyższe równanie jest spełniane dla kątów

$$\varphi = \frac{1}{6}\pi \quad \text{i} \quad \frac{5}{6}\pi \quad \text{oraz} \quad \frac{7}{6}\pi \quad \text{i} \quad \frac{11}{6}\pi$$

Rozkład ciśnienia wzdłuż obwodu walca przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład ciśnienia wzdłuż obwodu walca

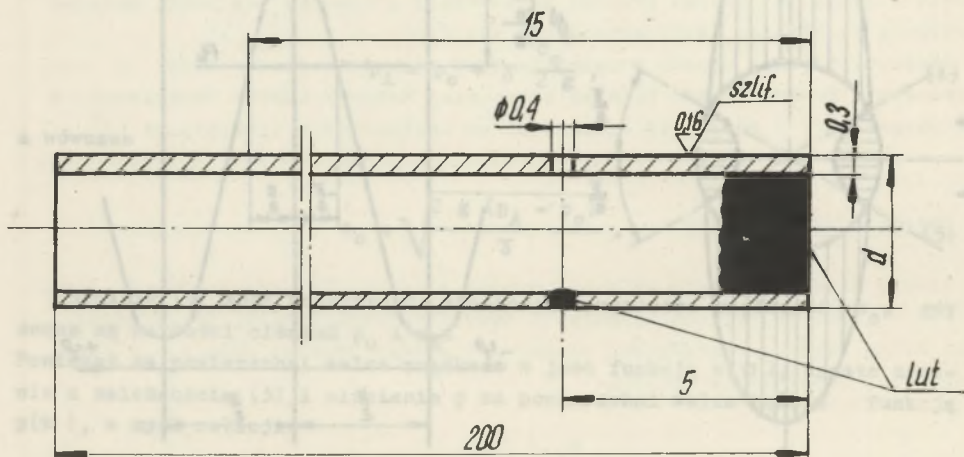
W przypadku przepływu cieczy rzeczywistej przebieg rozkładu ciśnienia na powierzchni walca różni się oczywiście od określonego teoretycznie dla cieczy idealnej. Wskutek oddziaływania sił lepkości cieczy na powierzchni

walca występują siły styczne, których wypadkowa (różna od zera) deformuje teoretyczny rozkład ciśnienia. Występują również punkty oderwania cieczy, co wiąże się ze zmianami rozkładu prędkości w warstwie przyściennej. Samo zjawisko oderwania jest złożone i zależy głównie od wartości gradientu ciśnienia wzdłuż opływanej powierzchni, a także od charakteru przepływu cieczy w warstwie przyściennej (laminarny lub turbulentny) [1]. Przedstawiona wyżej teoria stanowi podstawę działania sond walcowych.

Zastosowanie w praktyce sondy walcowej polega na określeniu ciśnienia na powierzchni walca-sondy w punkcie A oraz w punkcie, w którym ciśnienie na powierzchni walca wyrównuje się z ciśnieniem statycznym w cieczy, oddalonym o kąt  $\varphi_0$ . Ze względu jednak na istotne różnice występujące między opływem walca cieczą idealną i rzeczywistą, sondy muszą być odpowiednio wzorcowane.

## 2. Sondy pomiarowe

Sondy wykonano z cienkościennych rurek ze stali kwasoodpornej typu 1H18N9T, o grubości ścianek około 0,3 mm, przy czym ich średnice zewnętrzne odpowiednio wynosiły  $d = 2,2; 2,5; 3,0; 4,0$  i  $5,0$  mm. Każdorazowo w od-



$d = 2,2; 2,5; 3; 4$  i  $5$  mm

Rys. 3. Rozwiązanie konstrukcyjne sondy



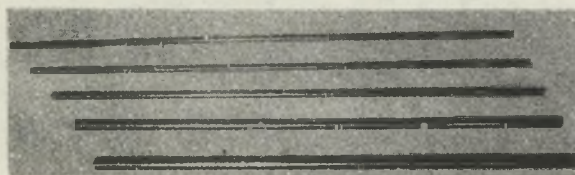
Rys. 4. Sonda  $d = 5$  mm (z widocznym otworkiem impulsowym)

zręczą przechodzącą przez otworek impulsowy. Rozwiązanie konstrukcyjne sondy przedstawiono na rysunku 3, a wykonane sondy na rysunkach 4 i 5.

ległości 5 mm od końca rurki nawiercano otworek impulsowy o średnicy  $d_0 = 0,4$  mm. Wykonanie otworka o mniejszej średnicy okazało się niemożliwe ze względów technologicznych (twardość rurek i słaba wytrzymałość wiertła).

Otworki wykonywano przewiercając rurkę na wylot, po czym otworek od strony natarcia wiertła zalutowywano. W ten sposób udało się otrzymać otworki impulsowe o ostrych krawędziach, nie zniekształcone przez wiertło.

Dla ułatwienia orientacji otworka impulsowego sondy w trakcie pomiaru, wykonano na każdej rurce rysę kontrolną wzdłuż tworzącej przechodzącej przez otworek impulsowy.



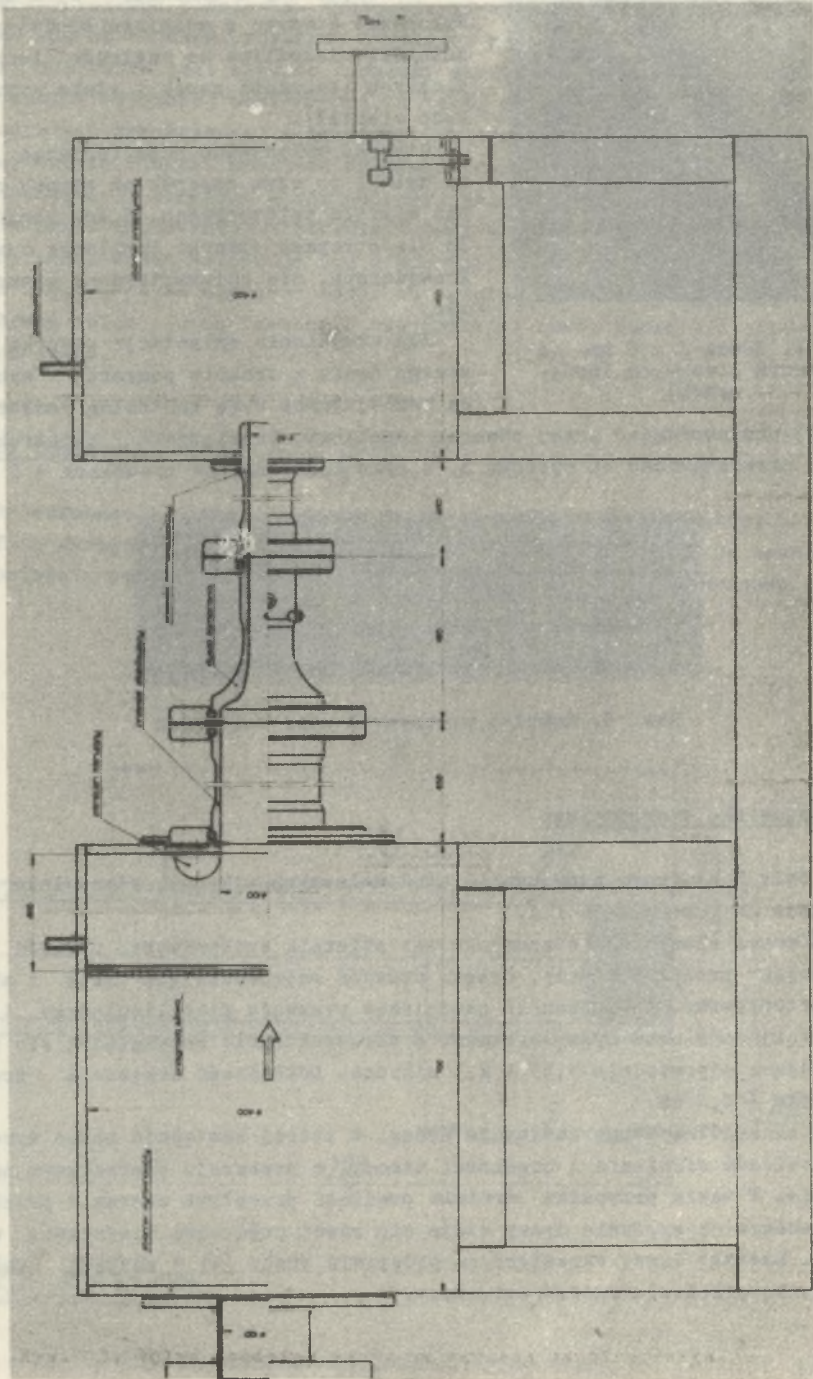
Rys. 5. Komplet wykonanych sond walcowych

### 3. Stanowisko wzorcownicze

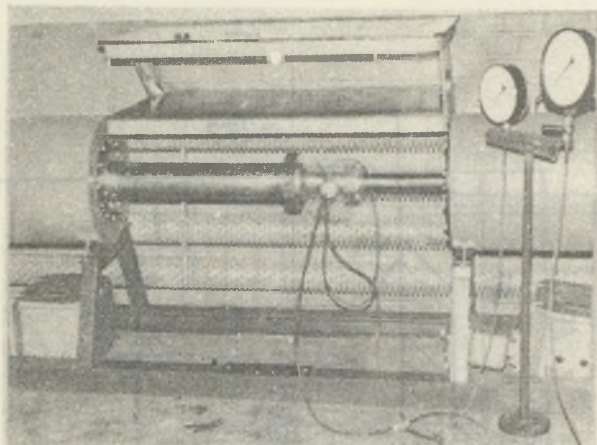
W celu dokładnego wzorcowania sond walcowych wykonano stanowisko przedstawione na rysunkach 6 i 7.

Głównymi elementami stanowiska są: zbiornik wyrównawczy, przewód stabilizujący przepływ cieczy, dysza, przewód odprowadzający ciecz i zbiornik przepływowy. Powierzchnie zewnętrzne przewodu stabilizującego i odprowadzającego oraz dyszy wykonano z chropowatością bezwzględna nie przekraczającą odpowiednio 1,25 i 2,5 mikrona. Dokładność wykonania średnic wynosiła  $\pm 0,1$  mm.

Na szczególną uwagę zasługuje dysza, w której następuje pełne wyrównanie rozkładu ciśnienia i prędkości cieczy, w przekroju poprzecznym na jej wpływie. W takim przypadku średnia prędkość przepływu cieczy w przekroju poprzecznym na wpływie dyszy staje się równa prędkości miejscowej w osi dyszy. Kształt dyszy określono na podstawie prac [4] z warunku stałości gradientu ciśnienia wzdłuż osi dyszy.



Rys. 6. Stawisko wsorcowawcze (w przekroju)



Rys. 7. Stanowisko wzorcownicze (z widocznym uchwytem mocującym sond)

W dyszy przewidziano otwór umożliwiający wprowadzenie sondy (za pośrednictwem uchwyty mocującego) oraz trzy otworki impulsowe do pomiaru ciśnienia statycznego cieczy. Otworki te umieszczano w miejscu, w którym dysza przechodzi w przewód o stałej średnicy. Przekrój dyszy przedstawia rysunek 8.

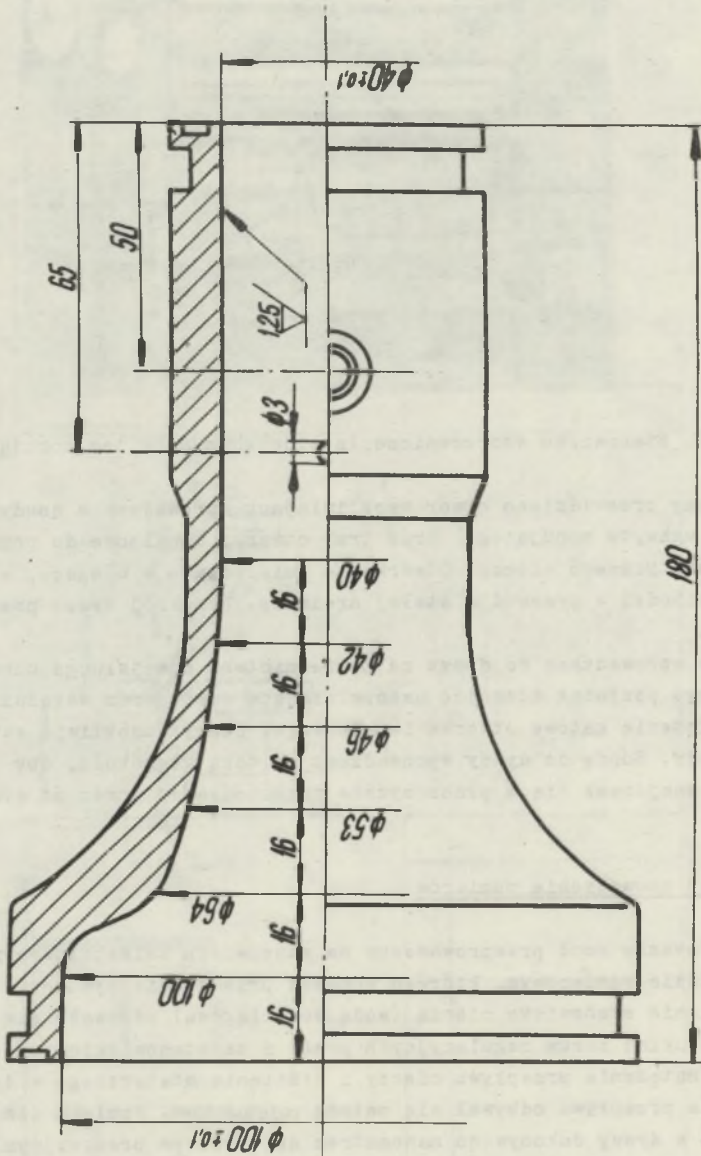
Sondy wprowadzano do dyszy za pośrednictwem specjalnego uchwyty (rys. 7). Uchwyt posiadał dławnicę uszczelniającą sondę oraz wskaźnik określający położenie katowe otworka impulsowego. Uchwyt umożliwia swobodny obrót sondy. Sondę do dyszy wprowadzano na taką głębokość, aby otworek impulsowy znajdował się w płaszczyźnie przechodzącej przez osi dyszy.

#### 4. Sposób prowadzenia pomiarów

Wzorcowanie sond przeprowadzono na stanowisku zainstalowanym w specjalnym układzie pomiarowym, którego schemat przedstawia rysunek 9.

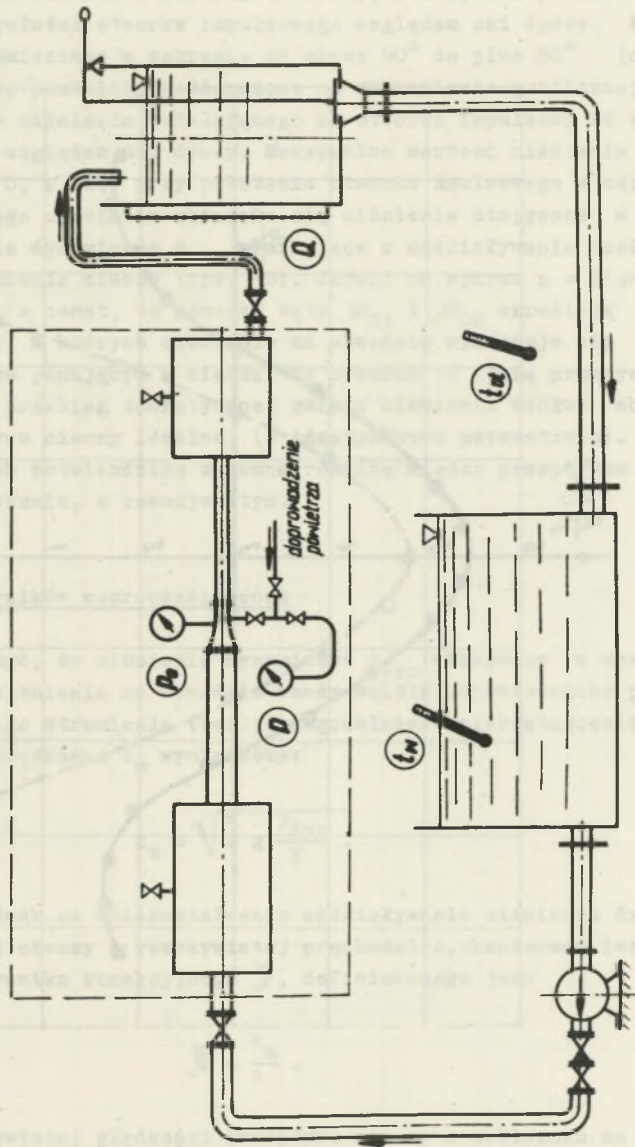
Zasilanie stanowiska cieczą (wodą wodociągową) odbywało się za pomocą pompy, a układ zasuw regulacyjnych przed i za stanowiskiem umożliwiał regulację natężenia przepływu cieczy i ciśnienia statycznego w dyszy. Pomiar natężenia przepływu odbywał się metodą objętościową. Pomiaru ciśnienia statycznego w dyszy dokonywano manometrem sprężynowym precyzyjnym, o klasie dokładności 0,5 i zakresie wskazań 0 - 1,6 kg/cm<sup>2</sup>.

Natomiast pomiaru ciśnienia działającego na otworek impulsowy sondy dokonywano za pomocą identycznego manometru, jednak aby uchronić otworek impulsowy sondy przed ewentualnym zatykaniem się, do sondy doprowadzano okresowo dawki powietrza o ciśnieniu wyższym od działającego na otworek. Po zamknięciu dopływu powietrza, ciśnienie powietrza wewnątrz sondy wyrówny-

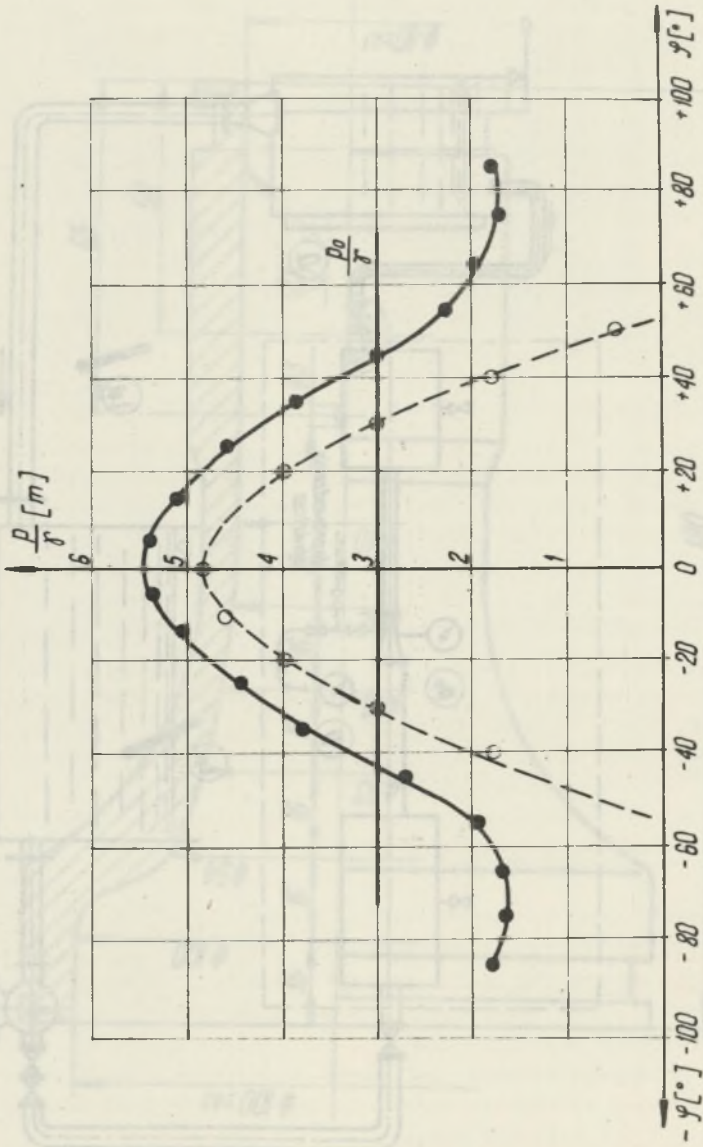


Rys. 8. Przekrój dyszy





Rys. 9. Schemat układu pomiarowego



Rys. 10. Rozkład ciśnienia wzdłuż obwodu sondy (linią przerywaną pokazano przebieg dotyczący cieczożyłnej cieczy idealnej)

wało się z ciśnieniem działającym na otworek impulsowy. Powietrze doprowadzano ze zbiornika ciśnieniowego poprzez odpowiednio ustawiony zawór redukcyjny.

Przy ustalonych warunkach przepływu cieczy, dokonywano pomiaru ciśnienia dla różnych położenia otworka impulsowego względem osi dyszy. Kąty położenia otworka zmieniano w zakresie od minus  $90^\circ$  do plus  $90^\circ$  (co  $10^\circ$ ). Uzyskane rezultaty pozwoliły każdorazowo na wykreślenie graficznej zależności  $p = f(\varphi)$  - ciśnienia działającego na otworek impulsowy od kąta odchylenia otworka względem osi dyszy. Maksymalna wartość ciśnienia występowała przy  $\varphi = 0$ , a więc przy położeniu otworka impulsowego w osi dyszy, gdy na wartość tego ciśnienia składało się ciśnienie statyczne w cieczy  $p_{st}$  oraz ciśnienie dynamiczne  $p_{dyn}$  wynikające z oddziaływania czołowo napływającego strumienia cieczy (rys. 10). Jeżeli na wykres  $p = f(\varphi)$  nanieść wartość  $p_{st} = const$ , to wówczas kąty  $\varphi_{01}$  i  $\varphi_{02}$  określają miejsca na obwodzie sondy, w których ciśnienie na obwodzie wyrównuje się z ciśnieniem statycznym panującym w cieczy. Na rysunku 10 linią przerywaną naniesiono również przebieg teoretycznej zmiany ciśnienia wzdłuż obwodu w przypadku przepływu cieczy idealnej (o identycznych parametrach). Porównanie obu krzywych potwierdziło znaczną różnicę między przepływem przewidzianym teoretycznie, a rzeczywistym.

##### 5. Opracowanie wyników wzorcowania sond

Jeżeliby założyć, że ciśnienie dynamiczne  $p_{dyn}$  otrzymane w wyniku pomiarów rozkładu ciśnienia na obwodzie sondy ściśle odpowiadałoby prędkości  $c_m$  napływającego strumienia (bez jakiegokolwiek zniekształcenia), to wówczas wartość prędkości  $c_m$  wyniosłoby:

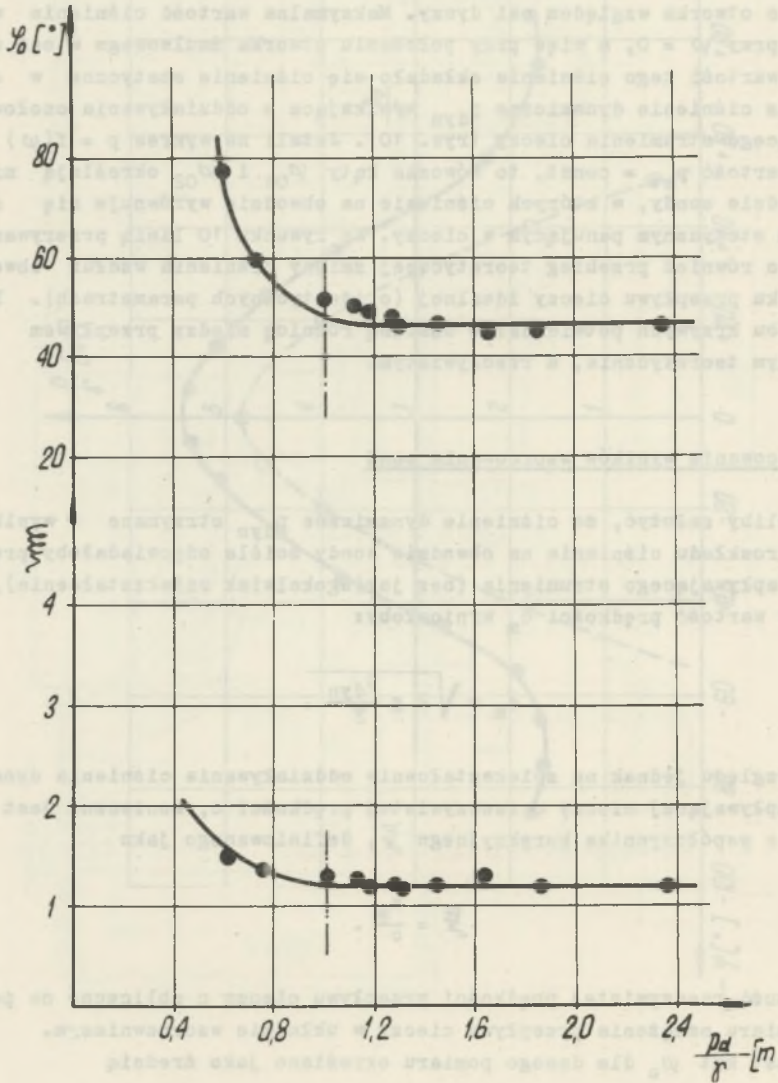
$$c_m = \sqrt{2g \frac{p_{dyn}}{\gamma}} \quad (9)$$

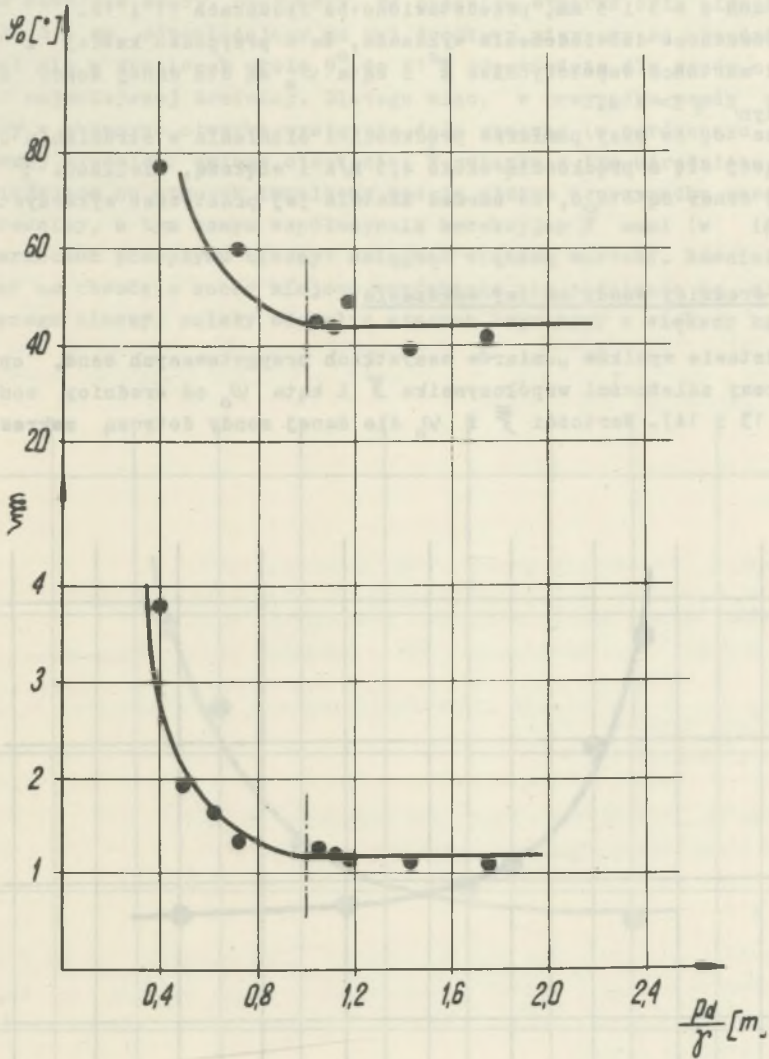
Ze względu jednak na zniekształcenie oddziaływania ciśnienia dynamicznego napływającej cieczy o rzeczywistej prędkości  $c$ , konieczne jest wprowadzenie współczynnika korekcyjnego  $\zeta_m$ , definiowanego jako

$$\zeta_m = \frac{c_m}{c} \quad (10)$$

Wartość rzeczywistej prędkości przepływu cieczy  $c$  obliczono na podstawie pomiaru natężenia przepływu cieczy w układzie wzorcowniczym. Natomiast kąt  $\varphi_0$  dla danego pomiaru określano jako średnią

$$\varphi_0 = \frac{\varphi_{01} + \varphi_{02}}{2} \quad (11)$$

Rys. 11. Wyniki wzorcowania sondy  $d = 3$  mm



Rys. 12. Wyniki wzorcowania sondy  $d = 5 \text{ mm}$

Wstępne badania wykazały, że działanie sondy nie zależy od wysokości ciśnienia statycznego w cieczy. Dlatego też wzorcowanie poszczególnych sond przeprowadzono przy założeniu stałego ciśnienia statycznego cieczy. Wzorcowanie sond przeprowadzono przy różnych prędkościach przepływu cieczy, zmiennych w stosunkowo szerokim zakresie.

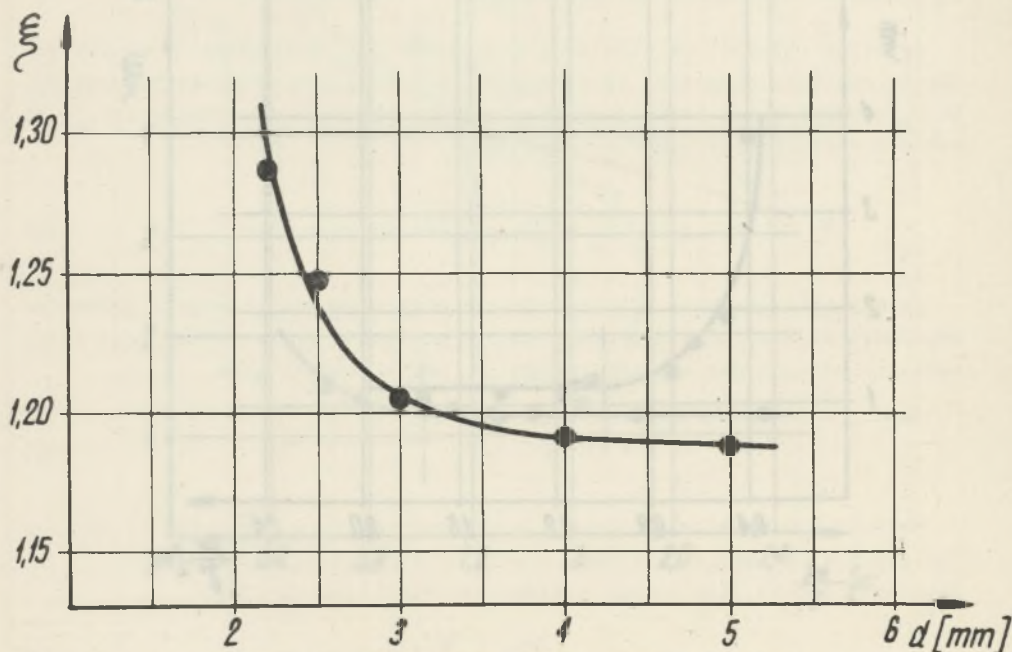
Na podstawie pomiarów, opracowano dla każdej z badanych sond wykresy zależności  $\xi = f\left(\frac{p_{dyn}}{\gamma}\right)$  i  $\varphi_0 = f\left(\frac{p_{dyn}}{\gamma}\right)$ . Przykładowe zależności dla sond o średnicach  $d = 3$  i  $5$  mm, przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Przeprowadzone doświadczenie wykazało, że w przypadku każdej z badanych sond wartości współczynnika  $\xi$  i kąta  $\varphi_0$  są dla danej sondy stałe, jeżeli  $\frac{p_{dyn}}{\gamma} > 1$  m.

Oznacza to, że przy pomiarze prędkości i ciśnienia w strumieniu cieczy poruszającej się z prędkością około  $4,5$  m/s i większą, wielkości  $\xi$  i  $\varphi_0$  dla danej sondy są stałe, co bardzo ułatwia jej praktyczne wykorzystanie.

#### 6. Wpływ średnicy sondy na jej wskazania

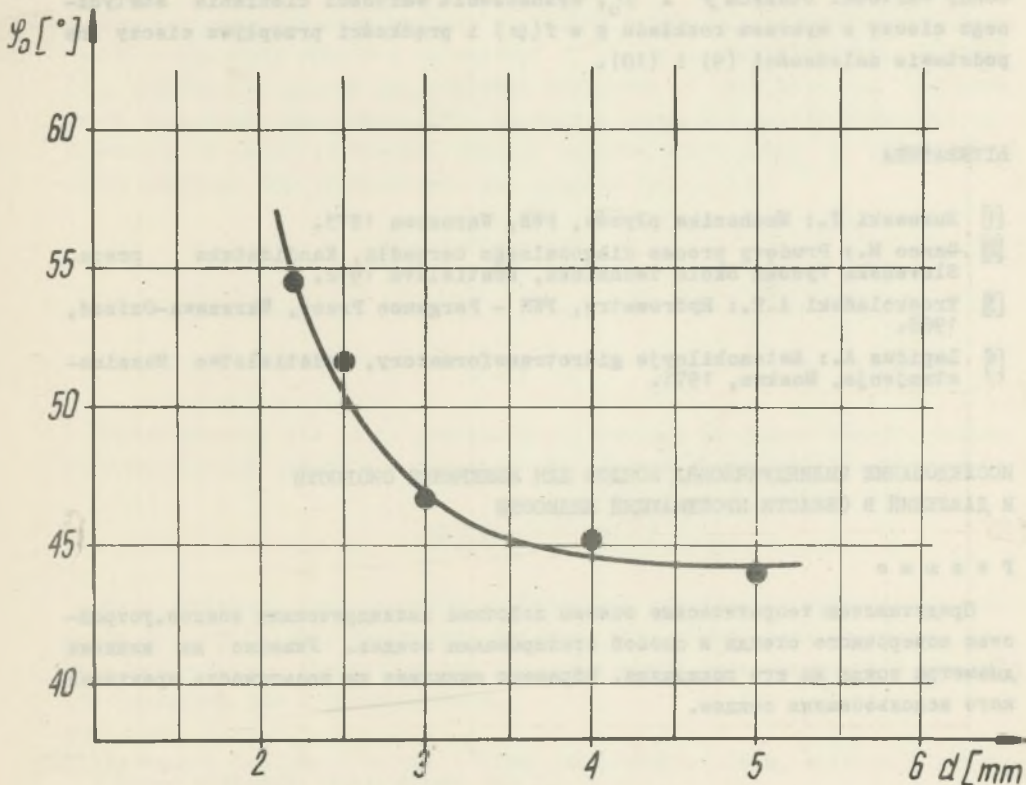
Na podstawie wyników pomiarów wszystkich przygotowanych sond, opracowano wykresy zależności współczynnika  $\xi$  i kąta  $\varphi_0$  od średnicy sondy  $d$  (rysunki 13 i 14). Wartości  $\xi$  i  $\varphi_0$  dla danej sondy dotyczą zakresu, w



Rys. 13. Wpływ średnicy sondy na wartość współczynnika  $\xi$

którym obie te wielkości są stałe i niezależne od prędkości przepływu cieczy. Na podstawie zależności  $\xi = f(d)$  i  $\varphi_0 = f(d)$  można stwierdzić, że zarówno wartość współczynnika korekcyjnego  $\xi$ , jak i kąt  $\varphi_0$  silnie wzrasta w miarę zmniejszania się średnicy sondy. Jest znamienne, że wartość kąta  $\varphi_0$  w badanym zakresie średnic sondy nie spada poniżej wartości  $44^\circ$ , co w sposób zasadniczy odbiega od wartości  $39^\circ 15'$  podawanej w pracy [3].

Opisane zależności można uzasadnić wpływem położenia otworu impulsowego na obwodzie sondy. Zważywszy, że średnica otworu była identyczna i wynosiła 0,4 mm, odpowiadający mu kąt środkowy mierzony na obwodzie sondy zmieniał się w granicach około  $9^\circ$  do  $21^\circ$ , odpowiednio dla sondy o największej i najmniejszej średnicy. Dlatego więc, w przypadku sondy o małej średnicy w obszarze otworu występuje dość znaczna (w porównaniu z sondą o większej średnicy) zmiana ciśnienia. W związku z tym uśrednione ciśnienie działające na otwór impulsowy będzie niższe w przypadku sondy o mniejszej średnicy, a tym samym współczynnik korekcyjny  $\xi$  musi (w identycznych warunkach przepływu cieczy) osiągnąć większą wartość. Również, aby osiągnąć na obwodzie sondy miejsce wyrównania się ciśnienia do ciśnienia statycznego cieczy, należy odchylić otwór impulsowy o większy kąt  $\varphi_0$  w



Rys. 14. Wpływ średnicy sondy na wartość kąta  $\varphi_0$ .

przypadku sond o mniejszej średnicy. W tym bowiem przypadku otworek musi przemieścić się w obszar obniżonego ciśnienia, z uwagi na większą zmianę ciśnienia wzdłuż obwodu sondy o mniejszej średnicy.

### Podsumowanie

Przedstawiona metoda wykonania i wzorcowania sond walcowych, jest prosta i była możliwa do przeprowadzenia we własnym zakresie.

Badany zakres średnic sond umożliwia ich stosowanie w przypadku kanałów przepływowych cieczy o różnych wymiarach. Pewnym ograniczeniem w stosowaniu opisanych sond walcowych jest możliwość pomiaru rozkładu prędkości jedynie w płaszczyźnie (a więc w przepływie dwuwymiarowym) normalnej do osi sondy. Również musi istnieć pewna współzależność między ciśnieniem statycznym i dynamicznym, aby krzywa rozkładu ciśnienia wzdłuż obwodu sondy była wyraźnie ukształtowana i możliwa do doświadczalnego wyznaczenia.

Praktyczne wykorzystanie sondy polega na wyznaczeniu krzywej rozkładu ciśnienia  $p = f(\varphi)$  wzdłuż obwodu sondy i na podstawie znanych dla danej sondy wartości stałych  $\sqrt{\rho}$  i  $\varphi_0$ , wyznaczeniu wartości ciśnienia statycznego cieczy z wykresu rozkładu  $p = f(\varphi)$  i prędkości przepływu cieczy na podstawie zależności (9) i (10).

### LITERATURA

- [1] Bukowski J.: Mechanika płynów, PWN, Warszawa 1973.
- [2] Ganco M.: Prudovy proces diagonalnego cerpada, Kandidatska praca, Slovenska Vysoka Skola Technicka, Bratislava 1972.
- [3] Troskoleński A.T.: Hydrometry, PWN - Pergamon Press, Warszawa-Oxford, 1968.
- [4] Lapidus A.: Awtomobilnyje gidrotransformatory, Izdatielstwo Maszino-strojenje, Moskwa, 1971.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

#### Р е з ю м е

Представлены теоретические основы действия цилиндрических зондов, устройство поверочного стенда и способ эталирования зондов. Указано на влияние диаметра зонда на его показания. Обращено внимание на возможность практического использования зондов.



INVESTIGATIONS OF CYLINDRICAL SOUNDERS FOR MEASURING THE SPEED AND PRESSURE IN THE REGION OF THE FLOWING LIQUID

S u m m a r y

The theoretical fundamentals of the operation of cylindrical sounders have been presented. The construction of sounders, the structure of a model stand and the way of designing patterns of sounders have been discussed. It has been pointed out how the diameter of sounder influences its indications. Attention was paid to the possibilities of the practical use of such sounders.

*[Faded Polish text, likely a summary or abstract of the paper.]*

- *[Faded text]*

*[Faded Polish text describing the experimental setup and results.]*

$$P = f(Q) \tag{1}$$

$$X = f(Q) \tag{2}$$

$$Y = f(Q) \tag{3}$$

*[Faded Polish text.]*

$$Q_{max} = f(Q) \tag{4}$$

*[Faded Polish text.]*

*[Faded Polish text, likely a reference or note.]*