

Andrzej KORCZAK

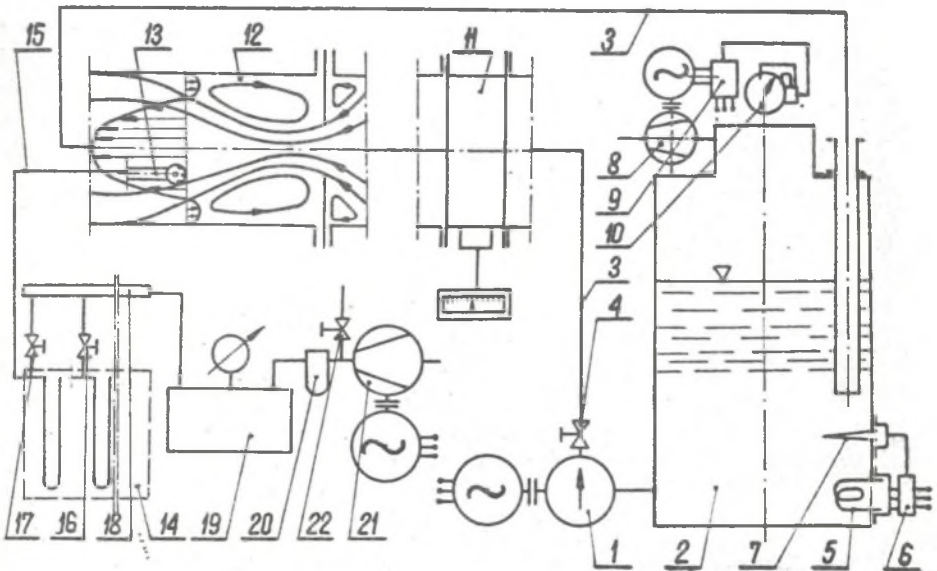
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląska

POMIAR SONDĄ KULOWĄ POŁA PRĘDKOŚCI OSIOWO-SYMETRYCZNEGO
PRZEPIŁYU Z ROZWIĘTĄ KAWITACJĄ

Streszczenie: W artykule opisano instalację pomiarową oraz sposób pomiaru prędkości cieczy za pomocą sondy kulowej. Podano parametry mierzonych przepływów i wyniki pomiarów prędkości dla przepływu bezkawitacyjnego i przepływu z rozwiniętą kawitacją. Dokonano analizy uzyskanych wyników.

1. Układ pomiarowy oraz sposób pomiaru

Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym zlokalizowanym w Laboratorium Maszyn Hydraulicznych Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej [1]. Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Stanowisko stanowi układ pompowy obiegowy z pompą 1, pracującą z napływem ze zbiornika zamkniętego 2 i pompującą wodę rurociągiem obiegowym 3. Pompa 1 jest regulowana zasuwą 4. W zbiorniku 2 znajduje się woda o temperaturze regulowanej grzejnikiem 5 włączanym regulatorem temperatury 6, współpracującym z termometrem oporowym 7. Podciśnienie w zbiorniku 2 jest regulowane pompą próżniową 8 włączaną regulatorem 9, współpracującym z wakuometrem kontaktowym 10. Na rurociągu obiegowym 3 jest zabudowany przepływomierz turbinkowy 11 oraz zespół 12 do pomiarów pola prędkości i ciśnień.

W zespole 12 zastosowano sondę kulową 13 połączoną z blokiem pięciu manometrów różnicowych 14 przewodami impulsowymi 15. Ponadto przewody impulsowe 15 połączono przez trójniki 16 i zawór 17 z kolektorem 18. Kolektor 18 był zasilany sprężonym powietrzem ze zbiornika wyrównawczego 19, do którego powietrze było tłoczone kompresorem 21 przez filtr 20. Przy dużych podciśnieniach w badanym obszarze powietrze było zasysane bezpośrednio z otoczenia poprzez otwarty zawór 22.

Przed każdym kolejnym pomiarem przewody impulsowe 15 sondy były wypełniane powietrzem poprzez otwarty zawór 17. Po jego zamknięciu nadmiar powietrza uchodził otworami na powierzchni sondy. Gdy ciśnienie ustalało się (po około 40 s), dokonywano pomiaru.

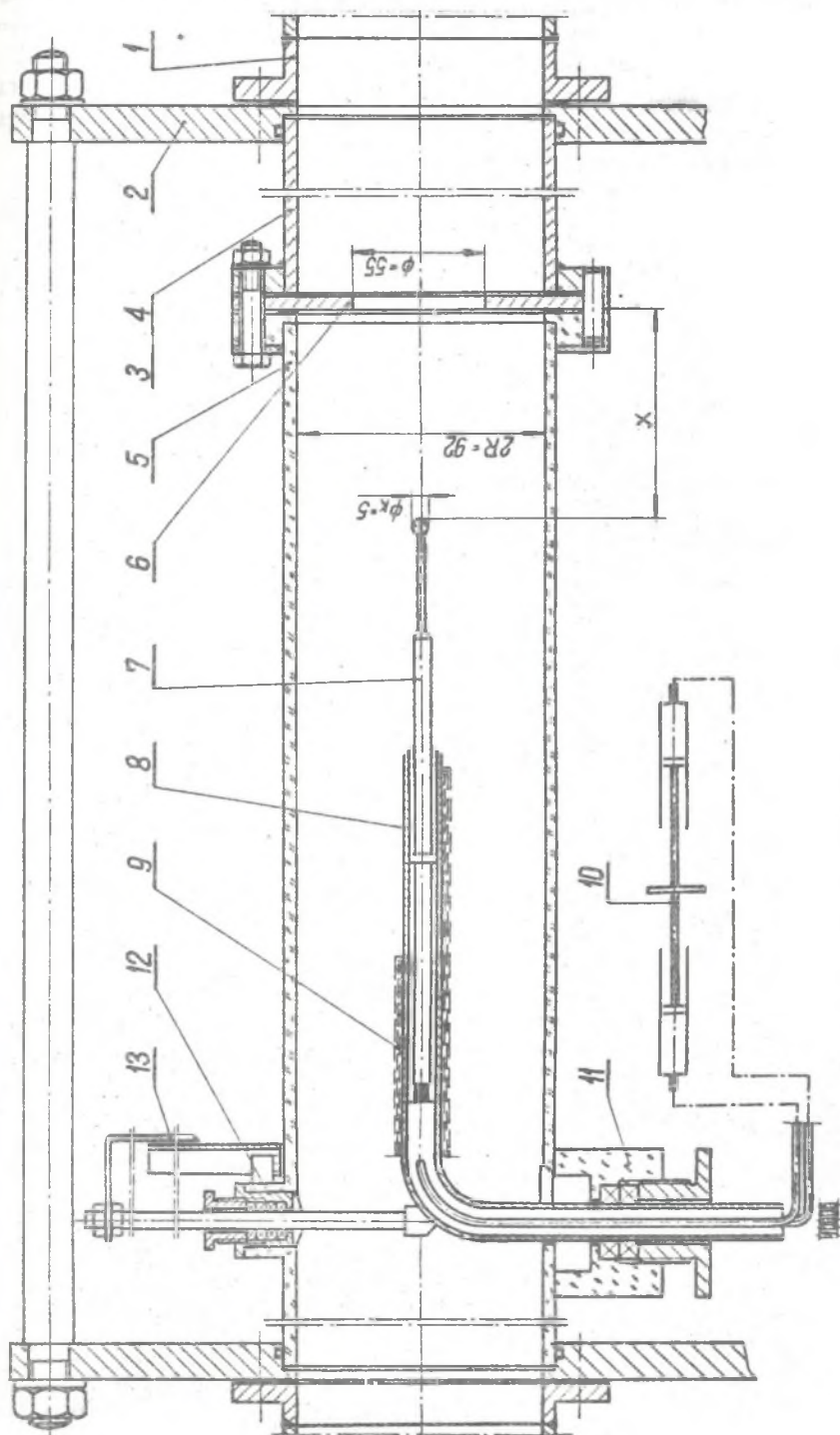
Na rysunku 2 przedstawiono zespół do pomiarów pola prędkości w obszarze za zwężką w rurociągu o średnicy $2R = 92$ mm. Zespół wbudowany w rurociąg 1 między kołnierzami 2, ustalonymi śrubami dystansowymi 13, składa się z prostek stalowych 3 i 4 oraz prostki ze szkła organicznego 5. Przed prostką 5 wbudowana jest zwężka 6 o średnicy wewnętrznej 55 mm. W prostce 5 umieszczony jest zespół sondy kulowej 7 mogącej się przesuwać w kierunku osiowym i promieniowym. Przesuw osiowy sondy 7 umożliwia cylinder 8, którego przestrzenie robocze są połączone przewodami 9 z pompą 10. Przesuw promieniowy umożliwiają dławnice 11 i 12. Końcówkę sondy stanowi kula o średnicy 5 mm z pięcioma otworami impulsowymi o średnicy 0,4 mm. Kąt obrotu osi sondy i położenie względem osi rurociągu pokazuje wskaźnik 13.

2. Wyniki pomiarów

Pomiary przeprowadzono dla przepływu ze zwężką w odległości $x = 95$ mm od zwężki. Zmierzono profile prędkości dla natężeń przepływu $Q_1 = 41$ m³/h i $Q_2 = 60$ m³/h. Pomiaru dokonano dla przepływu bez oznak kawitacji oraz dla przepływu z rozwiniętą kawitacją. Kawitację wymuszano przez podniesienie temperatury wody oraz obniżenie ciśnienia w zbiorniku 2 na rysunku 1.

2.1. Przepływ bez kawitacji

Pomiaru bez kawitacji dokonano przy ciśnieniu w zbiorniku $p_z = 1$ bar i temperaturze wody $t_w = 25$ °C. Pokazany na rysunku 2 układ pomiarowy pozwa-

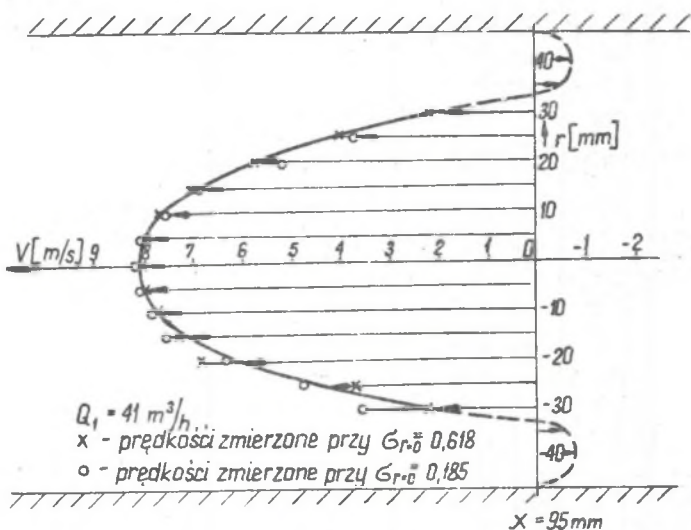


Rys. 2. Zespól do pomiaru pola prędkości i ciśnienia ze zwięzką w rurociągu.

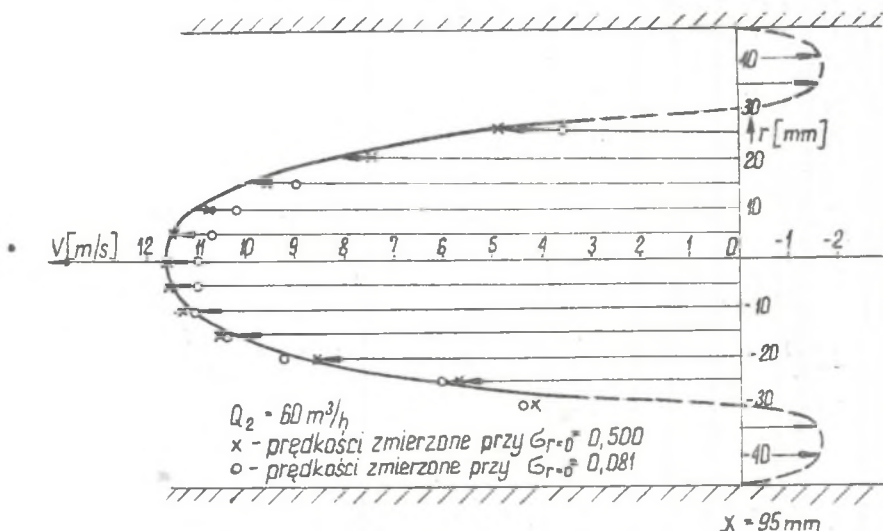
łań na pomiar prędkości w zakresie $r_{w=0} = \pm 33$ mm dla przepływu o wydajności Q_1 oraz $r_{w=0} = \pm 30$ mm dla przepływu o wydajności Q_2 . Dla większych promieni prędkości miały wartości ujemne.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono linią ciągłą otrzymany z pomiaru profil prędkości [7]. Przy założeniu osiowo-symetrycznego przepływu można obliczyć jego natężenie z wzoru:

$$Q_{1,2} = \int_0^{r_{w=0}} 2\pi r v(r) dr = (13,52; 22,27) 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$



Rys. 3. Profil prędkości dla przepływu o natężeniu $Q = 41 \text{ m}^3/\text{h}$



Rys. 4. Profil prędkości dla przepływu o natężeniu $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$

Natężenie Q' jest większe od Q na skutek porywania cząstek cieczy wypełniającej przestrzeń wokół zwężonego przez kryzę strumienia. Wielkość wytworzonego wiru i występujące w nim prędkości przepływu zależą od współczynnika unoszenia [6].

Odejmując od $Q'_{1,2}$ wydajności średnie $Q_{1,2}$ otrzyma się natężenie przepływu powrotnego:

$$Q_{p1,2} = Q'_{1,2} - Q_{1,2} = (2,12; 5,57) 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

Znając natężenia przepływu $Q_{p1,2}$ można określić średnie prędkości powrotne

$$v'_{x1,2} = \frac{Q_{p1,2}}{\pi(R^2 - r_{w=0}^2)} = (0,657; 1,465) \text{ m/s} \quad (3)$$

Następnie przyjmując kształt profili np. według wzoru potęgowego Prandtla można określić maksymalne prędkości powrotne:

$$v'_{\max 1,2} = (0,781; 1,743) \text{ m/s}$$

Obliczone profile prędkości dla natężeń przepływu Q_1 i Q_2 naniesiono linią przerywaną na rysunkach 3 i 4.

Dla opisanego wyróżnika kawitacji przyjęto prędkość w osi rurociągu $v_{r=0}$ jako wielkość charakterystyczną. Wówczas wyróżnik kawitacji można wyrazić wzorem [2]:

$$G = \frac{p - p_v}{\int \frac{v_{r=0}}{2}} \quad (4)$$

gdzie:

p - ciśnienie w mierzonym punkcie,

p_v - ciśnienie nasycenia.

Dla badanych przepływów bezkawitacyjnych otrzymano:

$$G_{Q_{1,2}} = 0,618; 0,500.$$

2.2. Przepływ kawitacyjny

Kawitację w badanym przekroju przepływowym wymuszano podnosząc temperaturę wody do 50 °C oraz obniżając ciśnienie w zbiorniku 2 na rys. 1 do $p_z = 0,335$ bara. Dla porównania wyników pomiarów z pomiarem przepływu bezkawitacyjnego mierzono prędkości przepływu również przy wydajnościach $Q_1 = 41 \text{ m}^3/\text{h}$ i $Q_2 = 60 \text{ m}^3/\text{h}$.

Wyróżniki kawitacji wyrażone wzorem (4) wynosiły:

$$(G_{Q_{1,2}})_{\text{kaw}} = 0,185; 0,061.$$

Przy wydajności $Q_1 = 41 \text{ m}^3/\text{h}$ i wyróżniku $G = 0,185$ kawitacja była obser-

wowana jako biała mgławica pęcherzyków pary z towarzyszącymi jej charakterystycznymi trzaskami. Przy wzroście natężenia przepływu do $Q_2 = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ i zmniejszeniu wyróżnika $G = 0,081$ kawitacja była bardzo silnie rozwinięta i charakteryzowała się obok widocznej smugi pęcherzyków kawitacyjnych silnymi trzaskami i dudnieniem oraz drganiami zespołu pomiarowego.

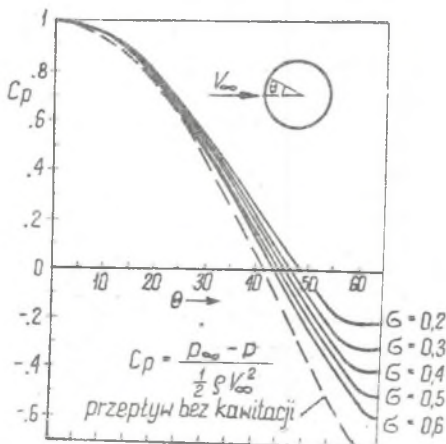
Profile prędkości opracowano podobnie jak w punkcie 2.1. Dla natężenia przepływu Q_1 profil pokrył się praktycznie z uzyskanym dla przepływu bezkawitacyjnego. Dla przepływu o wydajności Q_2 uzyskano pewne zmniejszenie zmierzonych prędkości. Uzyskane z pomiaru profile prędkości dla opisanego przepływu naniesiono na rysunkach 3 i 4.

3. Analiza wyników pomiarów i wnioski

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że w przepływie z rozwiniętą kawitacją potwierdza się opisany w pracy [3] i pokazany na rysunku 5 efekt spłaszczenia rozkładu ciśnień na powierzchni opływowej kuli wraz z maleńiem wyróżnika kawitacji G .

Zmniejszanie wyróżnika G i wzrost liczby Re powoduje maleńie kąta Θ , przy którym następuje oderwanie kawitacyjnego obłoku od powierzchni kuli. Taką zależność ujmuje rysunek 6 zaczerpnięty z pracy [4]. W niniejszych pomiarach dla przepływów kawitacyjnych wokół sondy umieszczonej w osi rurociągu liczba Re wynosiła:

$$Re_{Q_{1,2}} = \frac{v_{r=0} d}{\nu} = 64470; 91980 \quad (5)$$



Rys. 5. Zależność rozkładu ciśnienia na kuli od wyróżnika kawitacji [4]

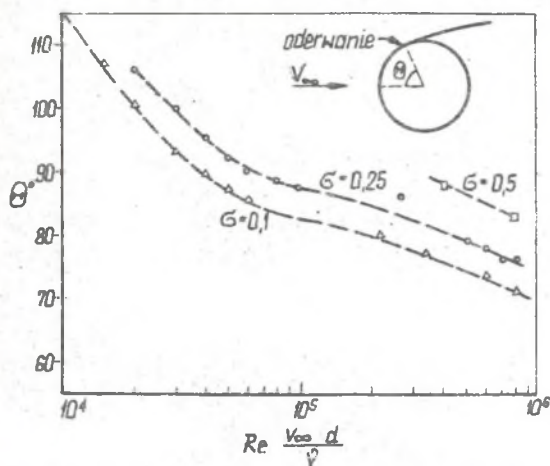
Z analizy parametrów przepływu i zależności na rys. 6 wynika, że kąt oderwania Θ był większy od 80° , czyli oderwanie strumienia nastąpiło poza otworami impulsowymi.

Wzrost drgań rurociągu i hałasu ze wzrostem natężenia kawitacji jest związany ze wzrostem liczby Eulera opisanej wzorem:

$$Eu = \frac{\sqrt{(p')^2}}{\rho \frac{v^2}{2}}, \quad (6)$$

gdzie: p' - amplituda pulsacji ciśnienia.

Dodatkowe pulsacje ciśnienia obok turbulencji przepływu są powodowane implozją pęcherzyków pary. Pomiarów efektów opisano w pracy [5].



Rys. 6. Kąt oderwania obłoku kawitacyjnego od kuli w funkcji liczb Re i G [3]

Korekty wymaga efekt spłaszczenia rozkładu ciśnienia na powierzchni sondy wraz z maleniem wyróżnika kawitacji G , jednakże dopiero w zakresie przepływów z silnie rozwiniętą kawitacją.

Praktyczny dla konstrukcji zespołu sondy wniosek sprowadza się do potrzeby osadzenia jej w odpowiednio sztywnym uchwycie, dla zapobieżenia przed drganiami.

LITERATURA

- [1] Korczak A., Janik G.: Pomiar prędkości i ciśnienia cieczy sondą kulową, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, nr 163/1070/83.
- [2] Steller K.: Kawitacja, pojęcia podstawowe ze szczególnym uwzględnieniem pojęć dotyczących maszyn hydraulicznych, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAI w Gdańsku, nr 140/1057/82.
- [3] Yao-tsu Wu: Cavity flow analysis, Cavitation state of knowledge, The ASME 1969, ss.106-137.
- [4] Brennen C.: Some viscous and other real fluid effects in fully developed cavity flows, Cavitation state of knowledge. The ASME 1969, ss.141-147.
- [5] Vigander S.: Wall-pressure fluctuations in a cavitating turbulent shear-flow, Symposium on Cavitation in fluid Machinery, Chicago 1965, ASME ss.215-223.
- [6] Wasiliev O.F., Kvon V.I., Lytkin I.M., Rozovskij I.L.: Stratificirovannyje tečenija, Gidromechanika, tom 8, Itogi nauki i techn. Moskwa 1975.
- [7] Korczak A., Drozd A.: Budowa stanowiska do badań charakterystyk uniwersalnych i kawitacyjnych pomp wirowych, Sprawozdanie z realizacji zadania 6.4.7.03 PR-8, zlec.: Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, 1982.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jest możliwy opisany sposób pomiaru prędkości cieczy sondą kulową w przepływie z występującą kawitacją mgłową, spowodowaną znacznym obniżeniem ciśnienia w kanale z przewężeniem.

Wzrost liczb Re i Eu w zakresie przepływów kawitacyjnych nie wpływa ujemnie na stabilizację ciśnienia mierniczego i dla celów pomiarowych można przyjmować przepływ potencjalny kuli strumieniem jednorodnym jako model badanego przepływu.

ИЗМЕРЕНИЕ ШАРОВЫМ ЛОТОМ СКОРОСТИ
ОСЕВО-СИММЕТРИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ
С РАЗВЕРНУТОЙ КАВИТАЦИЕЙ

Р е з ю м е

В статье описывается измерительная установка и способ произведения замера скорости жидкости при помощи шарового лота зонда. Приводятся параметры измеряемых течений и результаты замера скорости для безкавитационного течения и для течения с развёрнутой кавитацией. Произведен анализ полученных результатов.

MEASUREMENTS OF THE VELOCITY FIELD OF AN AXIALLY SYMMETRICAL FLOW
WITH A DEVELOPED CAVITATION BY MEANS OF A SPHERICAL PROBE

S u m m a r y

The subject matter of this paper is an installation and way of measuring the velocity of fluids by means of a spherical probe. The parameters of the measured flows as well as the measuring results of the velocities of a flow without cavitation and a flow with developed cavitation have been presented. The obtained results have been subjected to analysis.