

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOVYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOVYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

67-68

WARSZAWA—POZNAŃ 1975

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380 + 90 egz.	Oddano do składania 10 I 1975 r.
Ark. wyd. 28,5. Ark. druk. 22	Podpisano do druku 20 IX 1975 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70×100 cm	Druk ukończono we wrześniu 1975 r.
Nr zam. 112/77	R-17/661 Cena zł 86,-

DRUKARNIA UNIwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu

HYDROFORUM

KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

na temat

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY BADAŃ
I EKSPLOATACJI MASZYN HYDRAULICZNYCH

Gdańsk, 3 - 5 października 1973 r.

*

HYDROFORUM

SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE

on

MODERN PROBLEMS OF RESEARCH AND
UTILIZATION OF HYDRAULIC MACHINES

Gdańsk, October 3 - 5, 1973

*

ГИДРОФОРУМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

г. Гданьск, 3 - 5 октября 1973 г.

SZCZEPAN MACKIEWICZ

Gdańsk*

Pośrednie metody wykrywania zaczątków kawitacji w przepływie

1. Określenie zaczątku kawitacji

Teoria zjawiska kawitacji [1, 2] zakłada istnienie w cieczy jąder kawitacyjnych (załączków kawitacji), w postaci niewidocznych pęcherzyków parowo-gazowych, o promieniu rzędu 10^{-6} m. Pęcherzyki o tak małych rozmiarach mogą istnieć w cieczy tylko dzięki czynnikom zmniejszającym napięcie powierzchniowe, do których należą domieszki organiczne, zaadsorbowane na powierzchni pęcherzyka w postaci warstwy monomolekularnej oraz wzajemne oddziaływanie jonów wodorowych i wodorotlenowych, zaadsorbowanych na powierzchni pęcherzyka z jonami swobodnymi. Bardzo prawdopodobna wydaje się hipoteza, umiejscawiająca jądro w szczelinie domieszki stałej.

Warunek równowagi statycznej pęcherzyka kawitacyjnego, zawierającego parę nasyconą i gaz, można napisać w postaci wzoru:

$$p + \frac{2\sigma}{r} = p_n + p_g, \quad (1)$$

gdzie p — ciśnienie w cieczy otaczającej pęcherzyk, p_n — ciśnienie pary nasyconej, p_g — ciśnienie gazu wewnątrz pęcherzyka, r — promień pęcherzyka, σ — napięcie powierzchniowe.

Zakładając powolne zmiany objętości można przyjąć, że $p_n = \text{const}$, a ciśnienie gazu zmienia się zgodnie z prawem przemiany izotermicznej:

$$p_g \frac{4}{3}\pi r^3 = p_{g0} \frac{4}{3}\pi r_0^3, \quad (2)$$

gdzie p_{g0} — ciśnienie gazu w jądrze, r_0 — promień jądra. Ponieważ

$$p_{g0} = p_0 - p_n + \frac{2\sigma}{r_0}, \quad (3)$$

zatem po uwzględnieniu (2) zależność ciśnienia w cieczy od promienia można zapisać w następującej postaci:

$$p = p_n + \left(p_0 - p_n + \frac{2\sigma}{r_0} \right) \frac{r_0^3}{r^3} - \frac{2\sigma}{r}. \quad (4)$$

* Instytut Maszyn Przepływowych PAN.

Graficzną postać zależności (4) dla wybranych $r_0 = 10^{-6}$ m i $5 \cdot 10^{-6}$ m przedstawia krzywa na rys. 1. Część krzywej na lewo od punktu przegięcia odpowiada stanom trwałości, natomiast część na prawo od punktu przegięcia odpowiada procesowi rozszerzania się pęcherzyka.

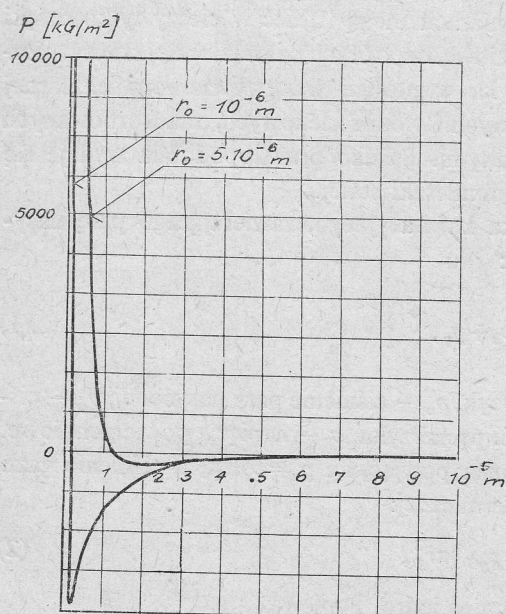
Różniczkując (4) względem r i przyrównując do zera, otrzymamy krytyczną wartość promienia

$$r_{kr} = \sqrt{3} r_0 \sqrt{\frac{r_0 p_{g0}}{2\sigma}} \quad (5)$$

i ciśnienie krytyczne

$$p_{kr} = p_n - \frac{2}{3} \frac{2\sigma}{r_{kr}} \quad (6)$$

Podane zależności nie uwzględniają bezwładności cieczy, odgrywającej dużą rolę przy szybkich zmianach ciśnienia i dyfuzji, istotnej dla zmian powolnych.



Rys. 1. Zależność ciśnienia w cieczy od promienia pęcherzyka dla $r_0 = 10^{-6}$ m i $5 \cdot 10^{-6}$ m

Stan, w którym jądro osiąga wymiary krytyczne, pozwalające na pokonanie sił napięcia powierzchniowego i ekspansję pęcherzyka nazwany został początkiem kawitacji. Z praktycznego punktu widzenia początek kawitacji występuje wtedy, gdy można dostrzec obłok kawitacyjny w nieznacznie małej strefie. Czy jednak po utracie trwałości pęcherzyki osiągną wystarczająco duże rozmiary, aby mogły być zauważone, zależy od ciśnienia ujemnego.

W czasie ruchu cieczy pojedynczy pęcherzyk przechodzi przez kolejne cykle zmian objętości, od momentu przekroczenia wartości krytycznej promienia aż do zaniku w przepływie, czy też katastrofy w pobliżu ścianki lub na jej powierzchni. Powstające w czasie katastrofy

pęcherzyków uderzeniowe fale ciśnienia i strugi kumulacyjne powodują niszczenie materiału i są bezpośrednią przyczyną szumów, trzasków, drgań korpusów maszyn, pulsacji ciśnienia i strat energii. Dlatego ważna jest możliwość wykrywania zaczątków kawitacji w maszynach hydraulicznych, tym bardziej, że zmiany charakterystyk energetycznych rejestrują kawitację już rozwiniętą.

2. Metody wykrywania zjawiska kawitacji

Metody wykrywania zjawiska kawitacji można ogólnie podzielić na bezpośrednie i pośrednie.

Metody bezpośrednie polegają na obserwacjach i stosowaniu techniki fotograficznej. Umożliwiają one śledzenie zjawiska od strony hydrodynamicznej, zarówno w zaczątku jak i w stadiach rozwiniętych.

Metody pośrednie polegają na:

- analizie drgań wybranego elementu urządzenia,
- pomiarze rozkładu ciśnienia na granicy strefy kawitacyjnej,
- analizie hałasu powstającego podczas pracy urządzenia w warunkach kawitacyjnych,
- rejestracji światła rozproszonego na pęcherzykach kawitacyjnych,
- rejestracji zmiany natężenia wiązki promieniowania gamma,
- rejestracji zmiany natężenia wiązki promieniowania ultradźwiękowego.

Pierwsza metoda ma wiele wad i nie daje informacji o charakterze hydrodynamicznym zjawiska. Druga metoda daje informacje o lokalizacji strefy kawitacyjnej i mechanizmie sił na granicy strefy. Jest ona przydatna do śledzenia kawitacji rozwiniętej. Metody pozostałe są szczególnie użyteczne do wykrywania zaczątku kawitacji.

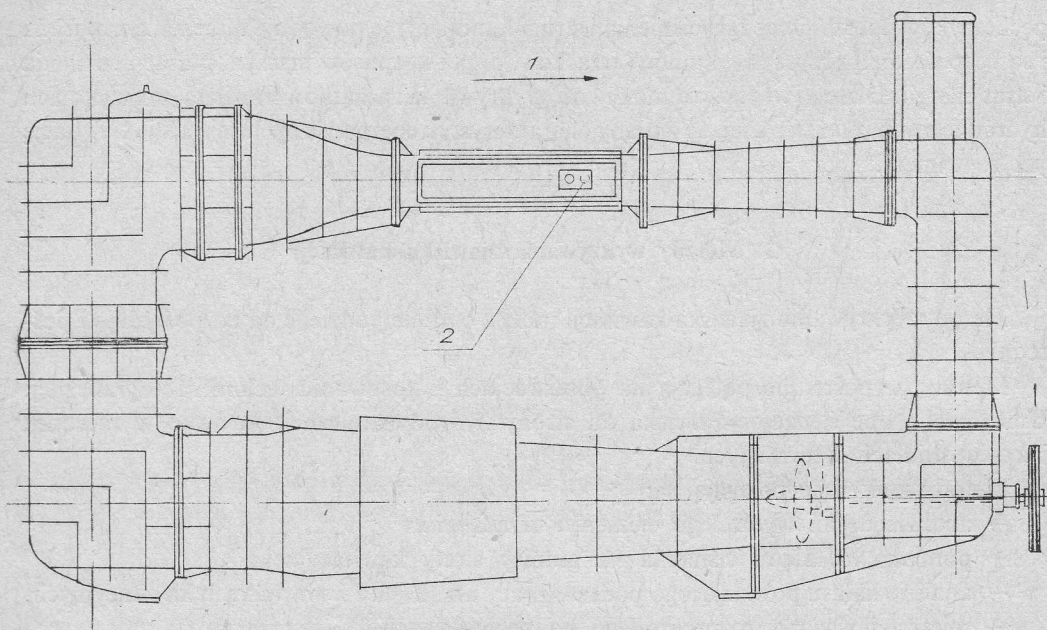
Ponadto, dysponując wynikami pomiarów natężeń wiązki gamma po przejściu przez układ jednofazowy (woda lub powietrze) i dwufazowy (woda z pęcherzykami), możemy obliczyć zawartość fazy gazowej [5, 6]. Zawartość fazy gazowej można również obliczyć dokonując pomiaru natężenia promieniowania ultradźwiękowego padającego na układ dwufazowy i po przejściu przez układ [7].

3. Zasada pomiaru zaczątku kawitacji i sposób przeprowadzania badań

W niniejszej pracy omówiono i porównano wyniki pomiaru zaczątku kawitacji przestrzennej w warunkach laboratoryjnych – metodą elektryczną [3, 4] (pomiar rezystancji cieczy) i optyczną (pomiar osłabienia wiązki światła białego).

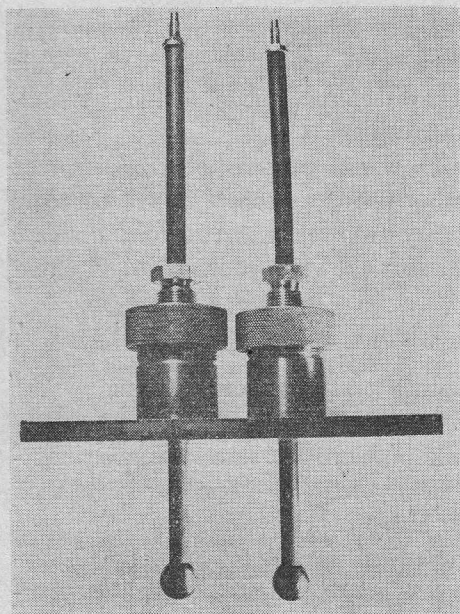
Istota metody elektrycznej polega na tym, że z pojawieniem się w przepływie pęcherzyków zmienia się średnia przenikalność dielektryczna ośrodka. Zakłada się, że jeżeli rezystancja pozostaje stała, przepływ w danym obszarze jest bezkawitacyjny, a początek kawitacji ma miejsce wtedy, gdy następuje wzrost rezystancji.

Pomiary rezystancji przeprowadzono w tunelu kawitacyjnym, przystosowanym do badań pędników okrętowych (rys. 2). W komorze tunelu o wymiarach $300 \times 300 \times 1100$ mm umieszczono elektrody kuliste (rys. 3) w odległości 6 cm od ścianki, 5,5 cm jedna od drugiej. Temperatura wody była stała i wynosiła 17°C . Rezystancję mierzono mostkiem TT-3152,



Rys. 2. Tunel kawitacyjny

1 - kierunek przepływu cieczy, 2 - płyta z elektrodami



Rys. 3. Elektrody

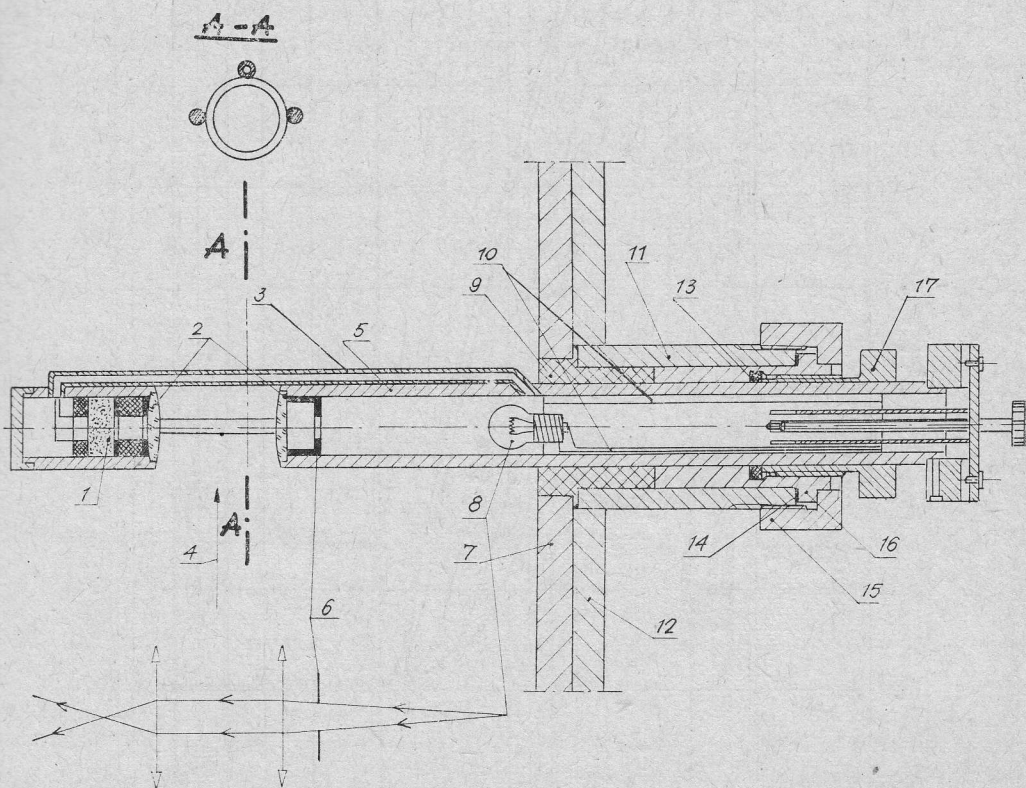
stosując prąd przemienny o częstotliwości 250 Hz. Kawitację wytwarzano poprzez redukcję ciśnienia, przy zadanej prędkości przepływu.

Istota pomiaru początku kawitacji metodą optyczną polega na tym, że wiązka światła przechodząc przez ciecz ulega osłabieniu, wskutek rozproszenia światła przez pęcherzyki. Osłabienie natężenia światła po przebyciu przez wiązkę określonej odległości zależy od

długości fali światła, koncentracji i rozmiarów pęcherzyków oraz współczynnika załamania światła ośrodka wypełniającego pęcherzyk.

Pomiar metodą optyczną przeprowadzono w tym samym miejscu w przepływie i starano się stworzyć takie same warunki jak w przypadku pomiaru rezystancji. Główny element układu pomiarowego stanowiła sonda (rys. 4), sporządzona z dwóch części rury metalowej. Wewnątrz dłuższego odcinka rury umieszczono wkład ruchomy z żarówką, wewnątrz krótszego odcinka – fotoopór. Obie części rury z zamontowanymi na końcach soczewkami połączono dwoma prętami mocującymi i rurką doprowadzającą przewody do fotooporu. Żarówkę zasilano napięciem stabilizowanym 3 V. Natężenie prądu w obwodzie fotooporu mierzone mikroamperomierzem klasy 0,5. Jako natężenie światła oświetlającego, przyjęto natężenie prądu i_0 w obwodzie fotooporu dla przepływu pod ciśnieniem atmosferycznym. Jako natężenie światła osłabionego przyjęto natężenie prądu i dla przepływu pod ciśnieniem zredukowanym.

Ponadto dokonano pomiaru ciśnienia w przepływie i prędkości przepływu oraz przeprowadzono obserwacje.



Rys. 4. Sonda

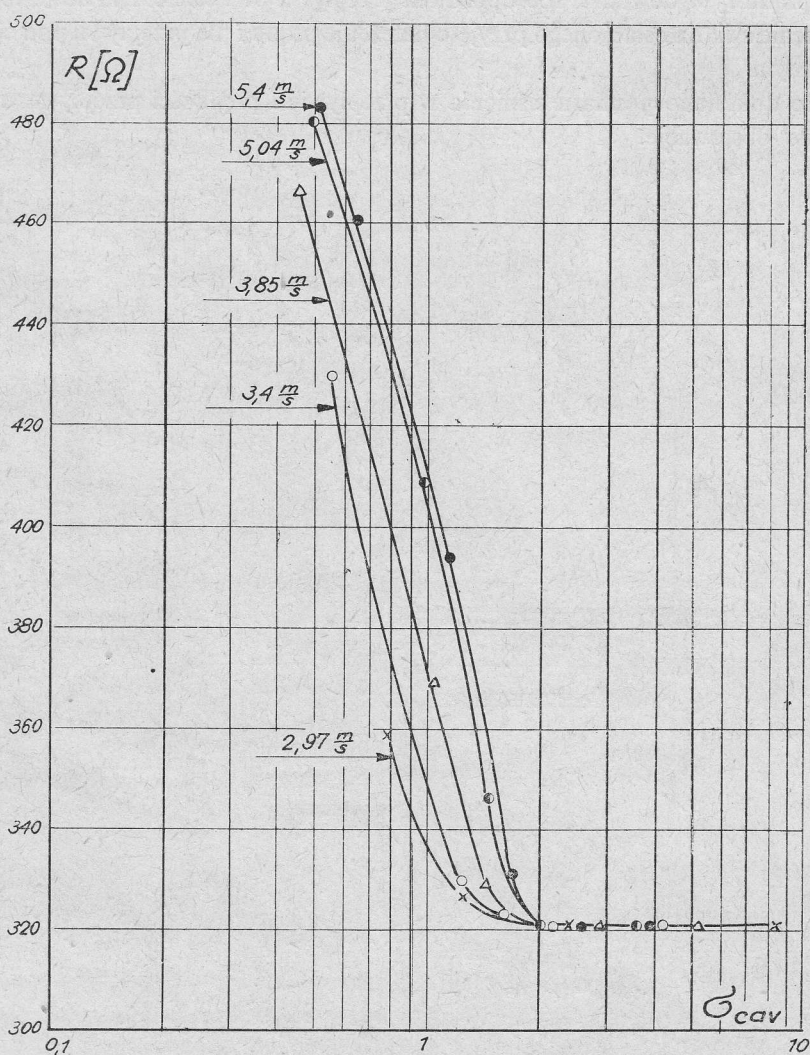
1 – fotoopór, 2 – soczewki, 3 – rurka doprowadzająca przewody do fotooporu, 4 – kierunek przepływu cieczy, 5 – obudowa metalowa, 6 – przesłona, 7 – ściana tunelu, 8 – źródło światła, 9 – parafina, 10 – kanały doprowadzające przewody, 11 – tuleja, 12 – płyta mocująca, 13 – uszczelka gumowa, 14 – uszczelka, 15 – nakrętka dociskająca, 16 – tuleja dławnicy, 17 – dławik

4. Wyniki pomiarów i ich omówienie

Prawdopodobieństwo wystąpienia kawitacji jest tym większe, im mniejszą wartość przyjmuje wyróżnik kawitacji

$$\sigma_{cav} = \frac{p - p_w}{0,5 \rho v^2}, \quad (7)$$

gdzie p — oznacza ciśnienie przepływu niezakłóconego, p_w — ciśnienie wrzenia, ρ — gęstość cieczy, v — prędkość przepływu.

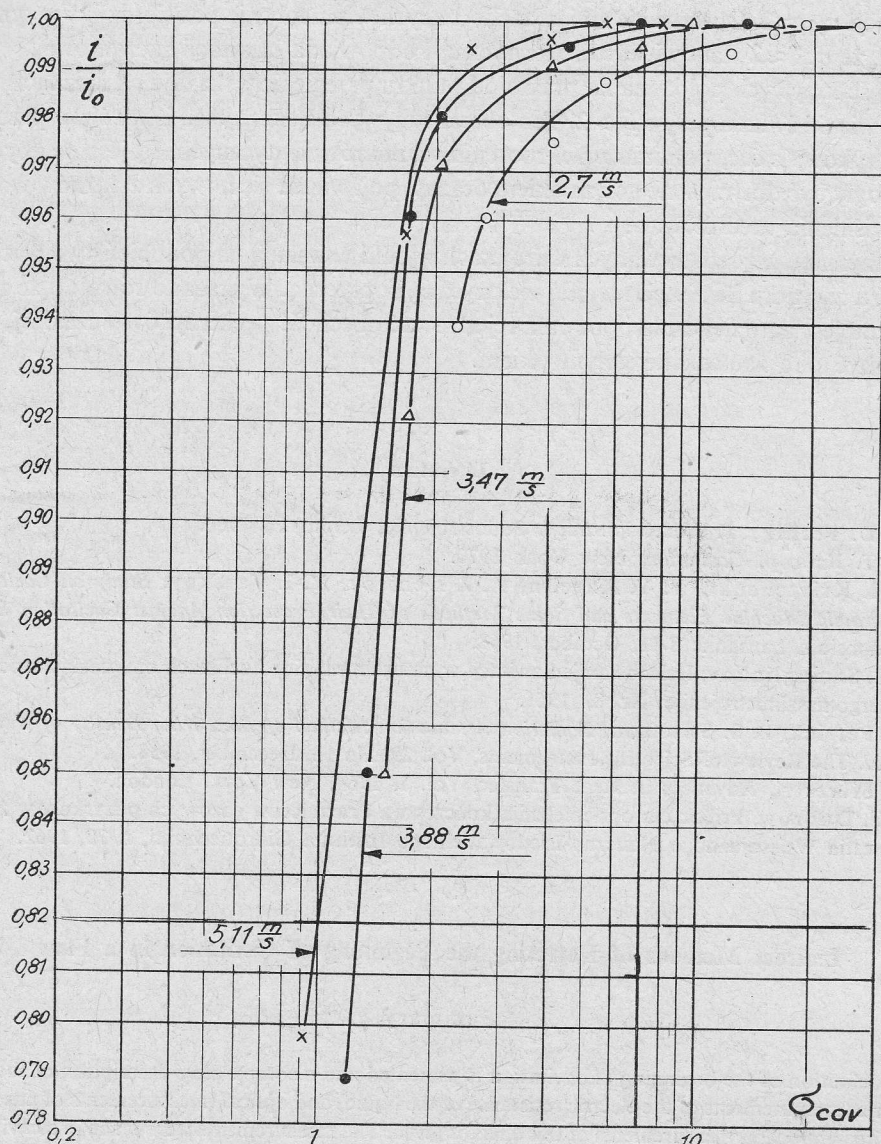


Rys. 5. Zależność rezystancji zmierzonej w przepływie od wyróżnika kawitacji dla ustalonych prędkości przepływu

Pomiary zmierzały do ustalenia krytycznej wartości σ_{kr} , która odpowiada kawitacji zaczątkowej.

Dla stałych prędkości przepływu (2,97, 3,4, 3,85, 5,04, 5,4 m/s) mierzono rezystancję R w przepływie pod ciśnieniem atmosferycznym, a następnie przy ciśnieniu zredukowanym. Wyniki przedstawiono na rys. 5 w postaci funkcji $R=f(\sigma_{cav})$.

Wyniki pomiaru osłabienia światła przedstawiono na rys. 6 w postaci funkcji $i/i_0=f(\sigma_{cav})$ dla prędkości 2,7, 3,47, 3,88 i 5,11 m/s. Osłabienie wiązki światła w przepływie bezkawita-



Rys. 6. Względne osłabienie wiązki światła w przepływie w funkcji wyróżnika kawitacji, dla ustalonych prędkości przepływu

cyjnym wskutek rozproszenia na zawirowaniach w pobliżu soczewek wynosiło około 0,25 % i_0 (przy największej prędkości przepływu) i zostało pominięte w obliczeniach.

Analizując krzywe na rys. 5 można zauważyć, że rezystancja pozostaje stała przy dużych wartościach wyróżnika aż do $\sigma_{cav} \approx 2$, a następnie rośnie wraz ze zmniejszeniem σ_{cav} . Pozwala to wnioskować, że $\sigma_{cav} \approx 2$ stanowi wartość krytyczną i odpowiada kawitacji zaczątkowej. Zaobserwowany zaczątek kawitacji pozostaje w zgodności z wyznaczonym poprzez pomiar zmiany rezystancji przepływającej wody.

Krzywe na rys. 6 charakteryzują się punktem przegięcia również dla wartości wyróżnika kawitacji $\sigma_{cav} \approx 2$. Obserwacje zmian zachodzących w przepływie potwierdziły i w tym przypadku, że $\sigma_{cav} \approx 2$ stanowi wartość krytyczną i odpowiada kawitacji zaczątkowej.

Część krzywych położona na prawo od punktu przegięcia wskazuje na nieznaczne osłabienie wiązki światła przy $\sigma_{cav} > 2$. Ten obszar krzywych wskazuje na istnienie w przepływie pęcherzyków, które, pomimo przekroczenia rozmiarów krytycznych, są jeszcze zbyt małe, aby mogły być dostrzeżone gołym okiem oraz na pojawienie się nowych załączków w warunkach ciśnienia zredukowanego.

Otrzymane w rozpatrywanych warunkach wyniki wskazują na podobieństwo rezultatów pomiaru zaczątku kawitacji metodą elektryczną i optyczną. Wykazano również, że metoda optyczna jest bardziej czuła i pozwala rejestrować obecność pęcherzyków wcześniej, aniżeli mogą być one zauważone gołym okiem.

Literatura

- [1] A. D. Pernik, *Problemy kawitacji*. Sudostrojenije, Leningrad 1966.
- [2] R. T. Knapp, *Cavitation*. New York 1970.
- [3] G. I. Kriwtchenko, V. Y. Karelin, A. J. Denisov, Y. I. Varskoy, *Study on Cavitation in Hydraulic Machine Elements and Some Methods of Their Protection Against Cavitation Damage*. Symposium Lausanne 8-11, October, 1968.
- [4] L. S. Szmugliakov, *Issledowanie kavitacji w naturalnych gidroturbinach omiczeskich sposobom*. Energiomaszinstrojenije Nr 8, 1961.
- [5] M. Petrick, B. S. Swanson, *Radiation Attenuation Method of Measuring Density of Two-Phase Fluid*. The Review of Scientific Instruments, Vol. 29, No 12, December, 1958.
- [6] M. Silvestri, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 1, 1964, New York, London.
- [7] E. F. Dubrow, *Pribor dla opriedielenija koliczestwa i razmierow gazowych puzyrkow w zidkosti*. Izwestia Wsiesojuznogo Nauczno-Isledowatielnogo Instituta Gidrotechniki, t. 70, 1962.

Indirect Methods of Detecting the Beginning of Cavitation in a Flow

Summary

A definition of the beginning of cavitation is presented and a comparative description of the results of electric (measurements of the electric resistance of the liquid) and optical (measurements of attenuation of a white light beam) measurements of this effect is given. The measurements were made in a cavitation tunnel adapted for the investigations of ship's propellers (Fig. 2). The cavitation was generated by the reduction of pressure at particular flow velocity. The results of the resistance measurements in the flow were presented as a function $R = f(\sigma_{cav})$ (Fig. 5) for five chosen flow velocities. The attenuation of a white

light beam was measured with a probe of the Author's design (Fig. 4). The results are presented in Fig. 6 as a function $i/i_0 = f(\sigma_{cav})$, where i/i_0 is a measure of the light attenuation in the flow. The suitability of the both methods for detecting the beginning of cavitation was proved. Attention was paid also to other methods serving the same purpose.

Посредственные методы обнаружения зачатков кавитации в потоке

Резюме

В работе дается определение зачатка кавитации, а также описываются и сравниваются результаты замеров зачатков кавитации электрическим (замер электрического сопротивления жидкости) и оптическим (замер ослабления пучка белого света) методами. Замеры проводились в кавитационной трубе, приспособленной к исследованиям судовых движителей (рис. 2). Кавитацию создавали путем редукции давления при данной скорости течения. Результаты замера электрического сопротивления в потоке представлены в виде функции $R = f(\sigma_{cav})$ (рис. 5) для пяти установленных значений скорости течения. Замер ослабления пучка белого света проводился с помощью зонда, спроектированного автором (рис. 4). Результаты представлены на рис. 6 в виде функции $i/i_0 = f(\sigma_{cav})$, где i/i_0 является мерой ослабления пучка света в потоке. Доказывается, что зачаток кавитации можно обнаружить также электрическим и оптическим методами. Кроме того, в работе указываются и другие методы обнаружения зачатка кавитации.