

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

83-84

WARSZAWA - POZNAŃ 1983

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

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

RADA REDAKCYJNA—EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY—EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA—EDITORIAL OFFICE

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1983

Printed in Poland

ISBN 83-01-04553-1
ISBN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 17 VI 1982 r.
Ark. wyd. 21,5. Ark. druk. 16,75+1 wkl.	Podpisano do druku 22 IV 1983 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1983 r.
Nr zam. 489/184.	E-9/215. Cena zł 200,—

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

HYDROFORUM

KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

na temat

PROBLEMY ROZWOJU HYDRAULICZNYCH MASZYN WIROWYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM POTRZEB ENERGETYKI

Porąbka-Kozubnik, 20 - 23, września 1980 r.

*

HYDROFORUM

SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE

on

DEVELOPMENT PROBLEMS OF HYDRAULIC TURBOMACHINES WITH SPECIAL ACCOUNT OF THE NEEDS OF POWER ENGINEERING

Porąbka-Kozubnik, September 20 - 23, 1980

*

ГИДРОФОРУМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ МАШИН С ОСОБЫМ УЧЕТОМ НУЖД ЭНЕРГЕТИКИ

Поромбка-Козубник, 20 - 23 сентября 1980 г.

JULIUSZ KIREJCZYK

Gdańsk*

Diagnostyka kawitacji w pompach diagonalnych

W pracy przedstawiono wyniki diagnostycznych badań kawitacyjnych pompy diagonalnej, obejmujące obserwację rozmiarów i postaci obłoku kawitacyjnego w wirniku, oddziaływania kawitacji na charakterystyki wymiany energii między cieczą i układem łopatkowym, natężenia destrukcyjnego działania zjawiska oraz towarzyszących mu szumów i pulsacji ciśnienia.

1. Wprowadzenie

W miarę rozwoju techniki zjawiska kawitacyjne sprawiają coraz więcej kłopotów. Dzieje się tak w wyniku postępu polegającego na poprawie parametrów technicznych i ekonomicznych hydraulicznych maszyn wirowych przez zwiększenie prędkości przepływu cieczy. Wynikiem tego jest wprawdzie zmniejszenie obciążeń statycznych, wzrasta jednak zagrożenie powstawania zjawisk o charakterze nieustalonym, mogących powodować zwiększenie obciążeń dynamicznych i nadmierne straty energii.

Zagrożenie to zmniejszyć można na drodze eksploatacyjnej, nie dopuszczając do powstawania niekorzystnych zjawisk.

Z punktu widzenia eksploatacji ważna jest umiejętność identyfikacji zjawiska oraz oceny stanu badanej maszyny na podstawie pomiaru wybranych wielkości charakteryzujących pracę obiektu. Zagadnienie polega więc na znalezieniu parametru pozwalającego wskazać warunki pracy układu, w których kawitacja pojawia się oraz takie, przy których jej oddziaływanie na maszynę jest największe. Idąc dalej należałoby poszukiwać parametru dającego informacje ilościowe, tak, aby w liczbach bezwzględnych wyrazić można było natężenie zjawisk kawitacyjnych.

W diagnostyce zjawisk wyróżnić można trzy elementy składowe: strukturalny, funkcjonalny i dynamiczny. Aspekty te określają w pełni zewnętrzne oddziaływanie rozpatrywanego zjawiska. W przypadku działania kawitacji na maszynę hydrauliczną, zależność charakterystyki funkcjonalnej (zmiany zewnętrznych charakterystyk roboczych, powodowanych zaburzeniami przepływu i wymiany energii między cieczą i układem łopatkowym) i dynamicznej (wywoływania erozji i drgań) od strukturalnej (opisującej rozmiary i strukturę obłoku kawitacyjnego) nie jest jednoznacznie określona. Stosunki między parametrami wyznaczającymi te charakterystyki, jakościowe, a tym bardziej ilościowe, są indywidualną

* Instytut Maszyn Przepływowych PAN.

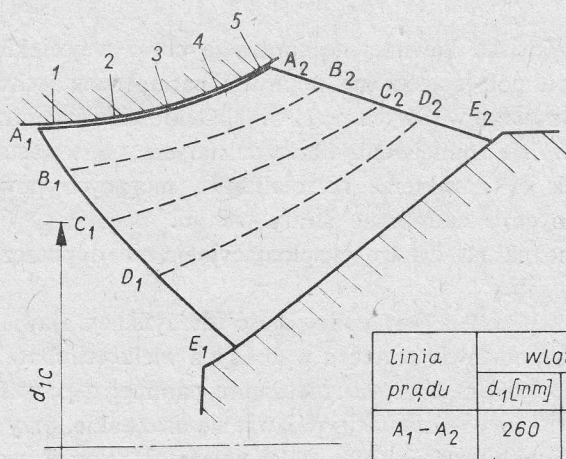
cechą każdej maszyny. Obecny poziom wiedzy o kawitacji nie umożliwia nawet przybliżonego ich przewidywania. Jedynym więc rozwiązaniem jest przebadanie takich relacji w warunkach doświadczalnych.

W pracy przedstawiono charakterystyki przebiegu kawitacji w pompie diagonalnej, sporządzone przy użyciu metod diagnostycznych bezpośrednich (polegających na pomiarze skutków kawitacji) i pośrednich (opierających się na śledzeniu zjawisk towarzyszących kawitacji). Omówiono ponadto relacje między natężeniem poszczególnych aspektów zjawiska.

2. Metoda i warunki badań

Badania przeprowadzono na pompie diagonalnej o średnicy wlotowej wirnika $d_1 = 260$ mm i wyróżniku szybkobieżności $n_{sQ} = 120$. Rysunek 1 przedstawia kształt i wymiary łopatki wirnika w rzucie na płaszczyznę równoległą do osi przepływu.

Badaną pompę umieszczono w obiegu hydraulicznym, którego schemat przedstawia rysunek 2.



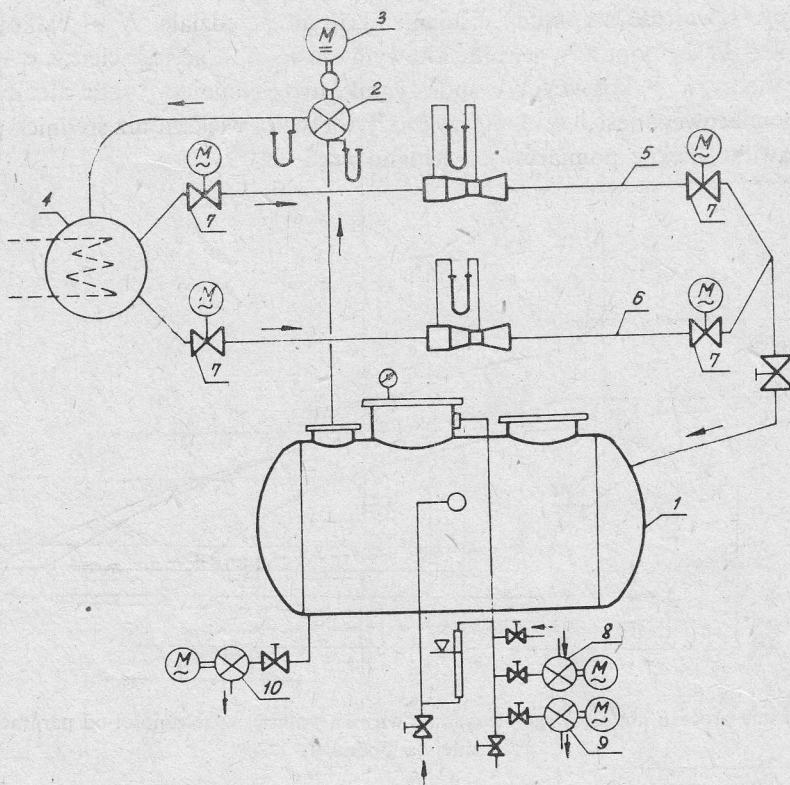
linia prądu	wlot		wylot	
	d_1 [mm]	$\angle \beta_1^\circ$	d_2 [mm]	$\angle \beta_2^\circ$
$A_1 - A_2$	260	16,3	300	19,5
$B_1 - B_2$	225	18,7	288	20,5
$C_1 - C_2$	185	22,5	271	22,5
$D_1 - D_2$	138	29,0	255	23,5
$E_1 - E_2$	80	49,0	236	32,0

Rys. 1. Łopatka wirnika badanej pompy

Badania przeprowadzono w jedenastu seriach pomiarowych, przy różnych prędkościach kątowych wirnika ω i różnych wydajnościach Q pompy. Warunki pracy maszyny dobrano tak, aby przy zmianie prędkości kątowej osiągnąć podobne kinematycznie warunki przepływu ($Q/\omega = \text{const}$).

W poszczególnych seriach pomiarowych zmianę stanu kawitacji osiągnięto zmieniając ciśnienie w obiegu hydraulicznym stanowiska pomiarowego.

Badania obejmowały obserwację i pomiar długości obłoku kawitacyjnego na jednej z łopatek wirnika (osłonę wirnika zaopatrzone w tym celu we wzzierniki), pomiar wysokości podnoszenia oraz pulsacji ciśnienia na osłonie otwartego wirnika pompy. Pomiaru pulsacji dokonywano w pięciu punktach, rozmieszczonych w sposób przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny stanowiska pomiarowego

1 – zbiornik główny, 2 – badana pompa, 3 – silnik napędzający pompę, 4 – kolektor, 5, 6 – cięgi pomiarowe o średnicach 350 i 200 mm, 7 – zawory z napędem elektrycznym, 8 – sprężarka, 9 – pompa próżniowa, 10 – pompa opróżniająca

Mierzono ponadto parametry określające warunki pracy pompy: ciśnienie w króćcu ssawnym, wydajność i prędkość kątową, oraz parametry wibroakustyczne: drgania korpusu pompy, szum o częstotliwości 120 kHz i pulsacje ciśnienia w rurze ssawnej.

3. Wyniki

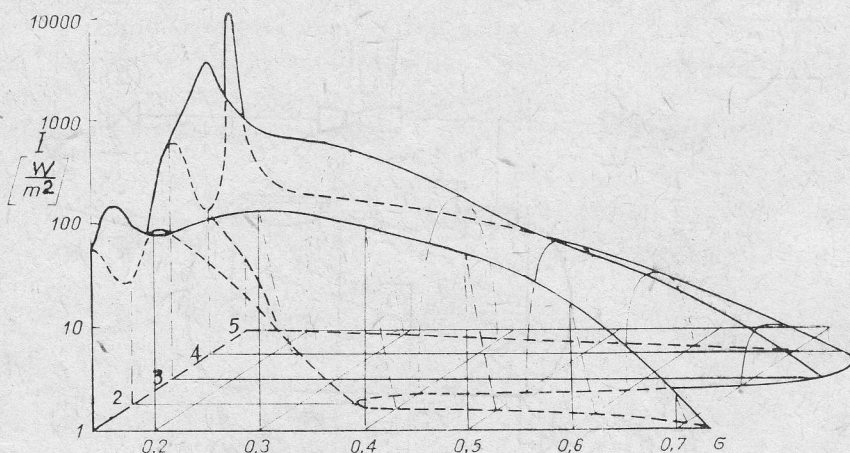
3.1. Pomiar energii zawartej w impulsach

Wyniki otrzymane z pomiarów kawitacyjnych pulsacji ciśnienia na osłonie wirnika pozwoliły oszacować energię implozji pęcherzyków kawitacyjnych, przechodzącą do ścianek ograniczających przepływ. Do obliczenia natężenia procesu użyto dwuparametrowej

wielkości [1]:

$$I = k \cdot \frac{1}{2\rho c} \cdot \frac{\lambda}{N} \sum_{i=1}^N n_i p_i^2,$$

gdzie n_i oznacza liczbę impulsów kawitacyjnych, zliczonych w i -tym przedziale wartości amplitud, p_i – wartość amplitudy ciśnienia w i -tym przedziale, N – całkowitą liczbę impulsów, λ – liczbę impulsów w jednostkowym czasie, ρ – gęstość cieczy, c – prędkość dźwięku w cieczy, k – korekcyjny współczynnik, uwzględniający to, że membrana przetwornika pomiarowego jest o dwa ÷ trzy rzędy wielkości większa niż średnica przeciętnej implozji kawitacyjnej; z pomiarów otrzymano $k \approx 5 \cdot 10^{-5}$.



Rys. 3. Natężenie procesu impulsowego na osłonie wirnika pompy, w zależności od parametrów pracy i miejsca pomiaru

Powierzchnia osłony wirnika, na której mierzono impulsy ciśnienia, styka się z obłokiem kawitacyjnym i może być uznana za reprezentatywną do określania dynamicznego obciążenia kanałów międzyłopatkowych kawitacją.

Przykład wyników pomiaru rozkładu energii impulsów kawitacyjnych na powierzchni osłony wirnika, w zależności od liczby kawitacji:

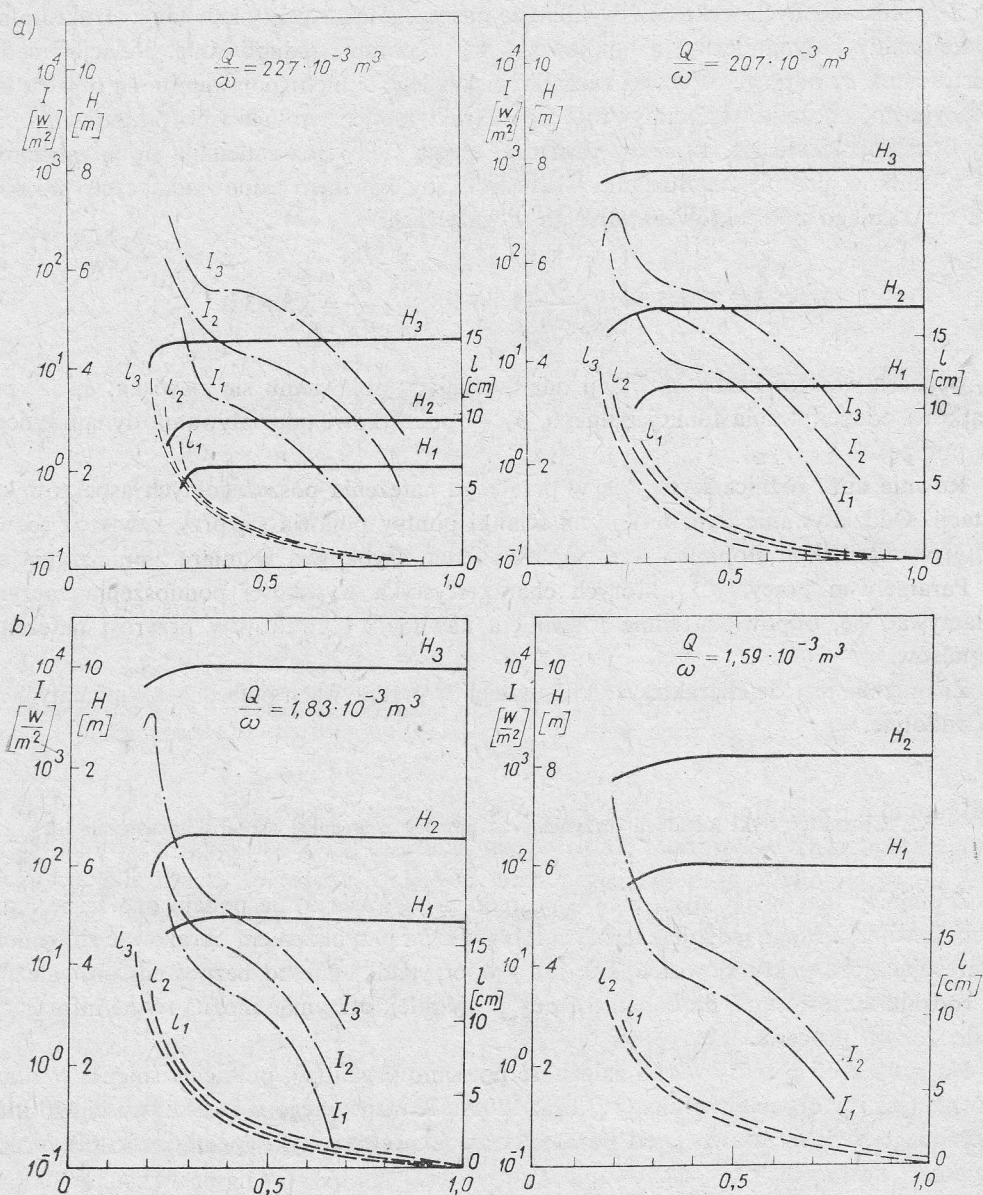
$$\sigma = \frac{p_0 - p_v + \frac{\rho c_0^2}{2}}{\frac{\rho u_1^2}{2}}$$

przedstawiono na rysunku 3 (p_0 i c_0 oznaczają w powyższej formule ciśnienie i średnią prędkość przepływu w króćcu ssawnym pompy, p_v – prężność pary nasyconej, u_1 – prędkość obwodową punktu A_1 , rys. 1).

3.2. Relacje między cechami charakterystycznymi kawitacji w pompie

Do oceny relacji między różnymi aspektami kawitacji w pompie wygodnie jest zestawiać charakterystyki diagnostyczne, sporządzone metodami bezpośrednimi.

W wyniku analizy [2] przyjęto, że pełną charakterystykę kawitacji w pompie uzyskać można mierząc rozmiary obłoku kawitacyjnego w wirniku, zmianę wysokości podnoszenia



Rys. 4. Charakterystyki diagnostyczne otrzymane metodami bezpośrednimi

H – wysokość podnoszenia, I – natężenie impulsów kawitacyjnych, l – długość obłoku kawitacyjnego ($1 - \omega = 105 \text{ rd/s}$, $2 - \omega = 126 \text{ rd/s}$, $3 - \omega = 158 \text{ rd/s}$)

nia oraz natężenie impulsów ciśnienia, mierzone na osłonie wirnika. Wartość średnia tego natężenia, obliczona na podstawie pomiarów wzdłuż linii zarysu łopatki, może wyrażać zagrożenie erozyjne ścianki osłony wirnika.

Zestawienia charakterystyk diagnostycznych, otrzymanych metodami bezpośrednimi, przedstawiono na rysunku 4. Obejmują one wszystkie serie pomiarowe. Zestawienia te sporządzono w układzie $\sigma = \text{var}$, $\omega = \text{var}$, $Q/\omega = \text{const}$.

Z przedstawionych wykresów wynika, że poszczególne aspekty kawitacji: strukturalny, funkcjonalny i dynamiczny, nie pojawiają się w pompie jednocześnie. Relacje między wartościami σ , odpowiadającymi początkowi każdego z nich (pojawieniu się obłoku kawitacyjnego, początkowi załamywania się charakterystyki zdolności do podnoszenia cieczy oraz pojawieniu się impulsów ciśnienia) nie są stałe, lecz zmieniają się w zależności od warunków przepływu. Stosunki wartości liczby kawitacji odpowiadających pojawieniu się każdego z aspektów zawarte są w granicach:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_H} = 2,75 \div 5,50, \quad \frac{\sigma_i}{\sigma_I} = 1,1 \div 1,8, \quad \frac{\sigma_I}{\sigma_H} = 2,5 \div 3,0$$

(σ_i oznacza wartość liczby kawitacji odpowiadającą pojawieniu się zjawiska, σ_H – początkowi oddziaływania funkcjonalnego, σ_I – początkowi oddziaływania dynamicznego na pompę).

Równie duże różnice występują w przebiegu natężenia poszczególnych aspektów kawitacji. Oddziaływanie dynamiczne na ścianki pompy pojawia się przy kawitacji rozwiniętej w niewielkim stopniu i wzrasta ze zmienną szybkością w miarę zmniejszania się σ . Parametrom pracy, przy których charakterystyka wysokości podnoszenia zaczyna załamywać się, odpowiada silnie rozwinięta kawitacja i gwałtowny przyrost natężenia impulsów.

Znamienne jest, że charakterystyki kawitacji w przepływach podobnych kinematycznie są podobne.

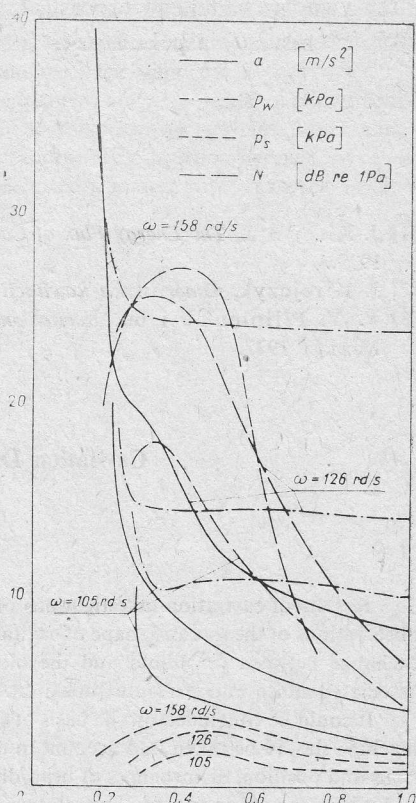
3.3. Charakterystyki kawitacji otrzymane za pomocą pośrednich metod diagnostycznych

Z definicji diagnostycznych metod pośrednich wynika, iż nie podają one ściśle natężenia kawitacji. Mogą jedynie z lepszym lub gorszym przybliżeniem obrazować zmienność interesującego aspektu zjawiska. Tak jak i w przypadku metod bezpośrednich, zależnie od rodzaju zastosowanej do badań metody pośredniej, otrzymać można różne informacje o śledzonym procesie.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność poziomu drgań (a), pulsacji ciśnienia w rurze ssawnej (p_s) i w obrębie wirnika (p_w) oraz szumu kawitacyjnego o częstotliwości 120 kHz mierzonego w rurze ssawnej, od parametru σ . Charakterystyki sporządzono dla trzech prędkości kątowych, przy zachowaniu $Q/\omega = \text{const}$.

Porównując rysunek 5 z rysunkiem 4 wnioskować można, że zmienność dynamicznego natężenia kawitacji najlepiej obrazuje poziom drgań pompy. O parametrach pracy odpowiadających załamaniu się charakterystyki wysokości podnoszenia informuje najlepiej

poziom pulsacji ciśnienia w obrębie wirnika. Szersze badania [2] dowiodły, że stan początkowy kawitacji określić można najdokładniej przez pomiar szumu o dużej częstotliwości, a także drgań korpusu pompy.



Rys. 5. Charakterystyki diagnostyczne otrzymane metodami pośrednimi

p_w – pulsacje ciśnienia w obrębie wirnika, p_s – pulsacje ciśnienia w rurze ssawnej, N – składowa szumu o częstotliwości 120 kHz, a – drgania (przyspieszenia drgań) korpusu pompy ($Q/\omega = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$)

Śledzenie pulsacji ciśnienia w rurze ssawnej pompy daje mniej informacji o interesujących w niniejszej pracy skutkach kawitacji, niż pozostałe ze stosowanych metod diagnostycznych. Nie znaczy to jednak, iż jest to metoda bezużyteczna. Wykorzystywana jest bowiem do badania dynamiki układów przepływowych przy kawitacji [3].

4. Wnioski

1. Pełny opis diagnostyczny kawitacji zawierać powinien informacje dotyczące rozmiarów obłoku, natężenia dynamicznego, oraz stopnia, w jakim zaburzone są charakterystyki wymiany energii między układem łopatkowym i cieczą. W praktyce rzadko wymaga się znajomości natężenia kawitacji we wszystkich jej aspektach jednocześnie. Ponieważ każdemu aspektowi odpowiadają najlepiej pewne określone metody oceny natężenia, badania diagnostyczne powinny być poprzedzone wyborem odpowiednich metod.

2. Bezpośrednie metody diagnostyczne kawitacji pozwalają ocenić intensywność zjawiska w liczbach bezwzględnych, a więc i porównywać natężenie przy różnych parametrach pracy i w różnych układach przepływowych.

3. Pośrednie metody diagnostyczne pozwalają jedynie na jakościowe porównywanie intensywności badanego procesu, lub na wskazanie parametrów pracy pompy, przy których interesujący aspekt kawitacji zaczyna pojawiać się.

Literatura

- [1] J. Kirejczyk, *The Energy Flux of Cavitating Flow*. Proc. 6th Conf. on Fluid Machinery, Budapest 1979.
- [2] J. Kirejczyk, *Diagnostyka kawitacji w pompach diagonalnych*. Praca doktorska, Gdańsk 1980.
- [3] V. V. Pilipienko i in., *Kavitacionnye avtokolebanija i dinamika gidrosistem*. Mašinostroenie, Moskva 1977.

Cavitation Diagnostics in Diagonal Pumps

Summary

Results of cavitation investigations of a diagonal pump are presented. The investigations included observations of the size and shape of cavitation cloud in the impeller, influence of cavitation on the energy exchange between the liquid and the blading, intensity of destructive effect of the phenomena and associated noise and pressure pulsation.

It could be concluded on the basis of the above results that three aspects of cavitation in a hydraulic machine should be taken into account in order to fully characterize its course. These are spatial dimensions and position, disturbances of head/discharge curves, and the influence on the working part of erosion and vibrations of the system. The relation between the appearance of the respective aspects and between their intensities is not defined strictly. Possibilities of concluding on some aspects based on the data on the intensity of one of the others are very limited. It is also impossible to quantitatively evaluate some aspects on the basis of measurements of the others. Besides, the dependence between intensities of the respective aspects is an individual feature of the machine type.

Results of diagnostics of cavitation characteristics carried out using most popular indirect methods are presented. It was concluded that each of indirect diagnostic methods concerns some cavitation aspects only. Besides, the relation obtained has a qualitative character only.

Диагностика кавитации в диагональных насосах

Резюме

В работе представлены результаты кавитационных исследований диагонального насоса, охватывающих наблюдение размеров и формы кавитационного облака в роторе, воздействие кавитации на характеристики обмена энергии между жидкостью и лопаточной системой, интенсивности разрушительного действия явления, а также сопутствующих ему шумов и пульсаций давления.

Из сопоставления результатов следует, что полная характеристика хода кавитации в гидравлической машине требует представления трех аспектов явления: пространственных размеров и локализации, волнений характеристик течения, а также влияния на эрозию проточной части и колебания системы. Зависимость между появлениями отдельных аспектов, а также между их интенсивностями не является слишком строгой. Знание интенсивности одного из аспектов позволяет в очень ограниченной степени делать выводы о других. При этом не является возможной оценка одних на основе измерений других. Зависимость между интенсивностями отдельных аспектов кавитации кроме того является индивидуальной чертой данного типа машины.

В работе кроме того представлены результаты диагностических измерений характеристик кавитации проведенных применяя чаще всего встречаемые посредственные методы. Такие сопоставления позволяют сделать вывод, что каждый из посредственных диагностических методов показывает только некоторые аспекты кавитации. Эта зависимость кроме того является исключительно качественной.