

J. A. Szantyr

**Wykład 22: Kawitacja – Podstawy fizyczne – Konsekwencje
hydrodynamiczne**

Plan wykładu

1. Definicja kawitacji

2. Zapoczątkowanie kawitacji

3. Formy kawitacji

- kawitacja laminarna**
- kawitacja pęcherzykowa**
- kawitacja wirowa**
- formy przejściowe**

4. Konsekwencje kawitacji

- spadek sprawności maszyn przepływowych**
- erozja kawitacyjna**
- hałas i drgania**

5. Podsumowanie

Definicja kawitacji

Kawitacja jest to zjawisko dynamicznego wzrostu i zaniku pęcherzy parowo-gazowych w cieczy, wywołane zmianami ciśnienia przy stałej temperaturze.

O przebiegu zjawiska decydują:

- dyfuzja/odgazowanie**
- parowanie/kondensacja**
- bezwładność cieczy**
- napięcie powierzchniowe**
- adhezja**
- lepkość cieczy**

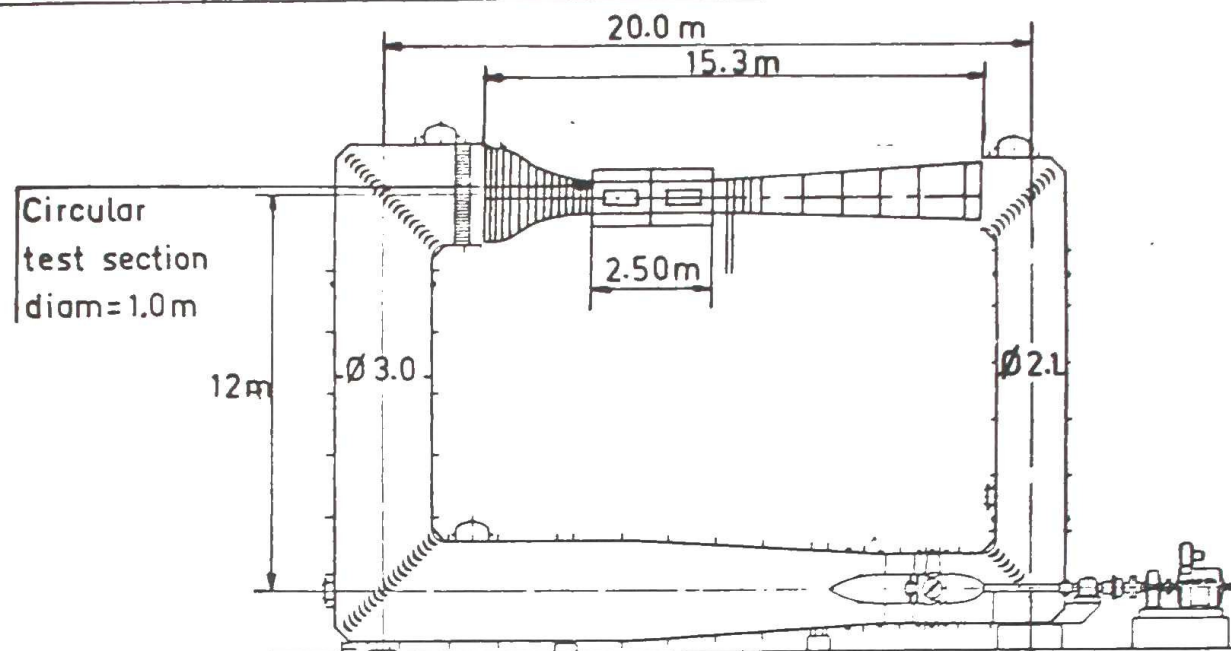
Występowanie kawitacji:

- **ciekłe gazy – paliwa silników rakietowych,**
- **ciekłe metale – chłodziwo reaktorów jądrowych,**
- **ciecze naturalne – czynniki robocze w maszynach hydraulicznych (na przykład paliwo w silniku wysokoprężnym),**
- **krew – w przepływie przez sztuczną zastawkę serca.**

SWEDISH MARITIME RESEARCH CENTRE (SSPA)
Box 24001, S-400 22 GÖTEBORG
TEL. 031-200130 TELEX: 20863

SWEDEN

CAVITATION TUNNEL No 2 (1970) test section 1 (high speed section)



DESCRIPTION OF FACILITY: Vert plane, closed recirc. Two test sections

TYPE OF DRIVE SYSTEM: 4-bladed axial flow impeller with thyristor control

TOTAL MOTOR POWER: 736 kW

WORKING SECTION MAX VELOCITY: 23 m/s

MAX & MIN ABS PRESSURES: 600 kPa, 15 kPa

CAVITATION NUMBER RANGE: $\sigma > 0.1$

Parametrem opisującym podobieństwo zjawisk kawitacyjnych jest liczba kawitacyjna σ

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

gdzie: p – ciśnienie w danym punkcie przepływu

p_v - ciśnienie krytyczne pary wodnej, ok. 2000 [Pa]

U – prędkość przepływu

ρ - gęstość cieczy

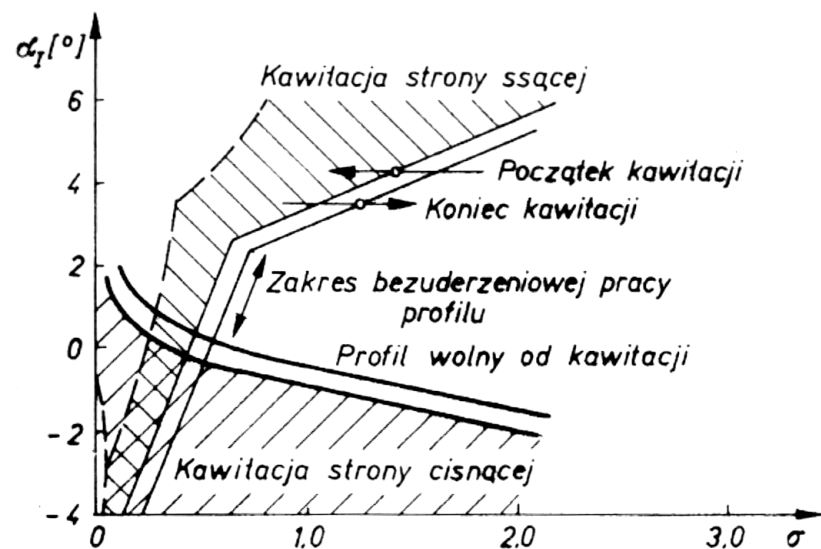
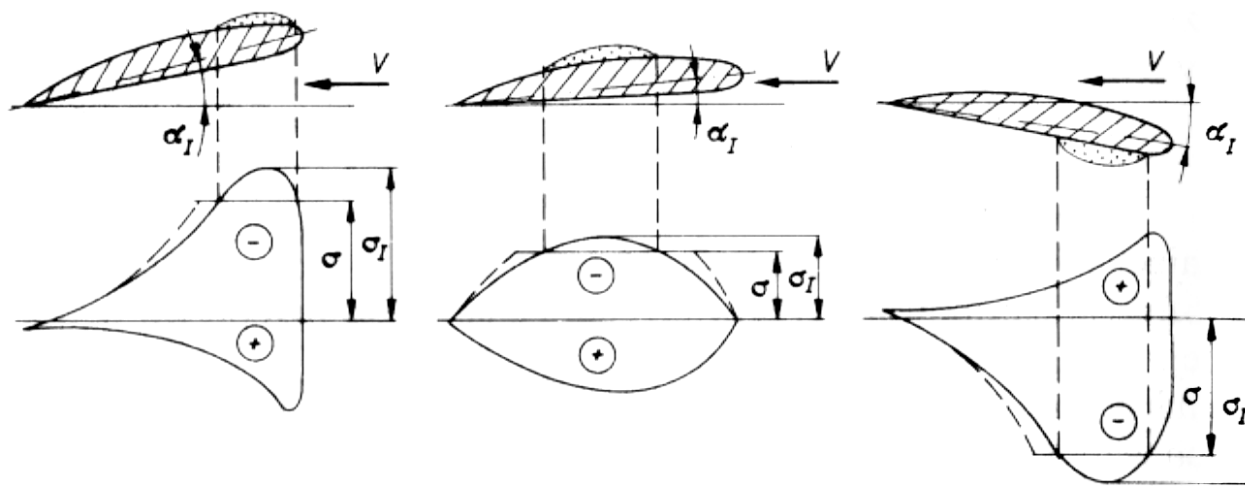
Uproszczony warunek zapoczątkowania kawitacji ma postać:

$$C_p = \frac{p_\infty - p}{\frac{1}{2} \rho U^2} \geq \sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad \text{czyli:} \quad p \leq p_v$$

gdzie: p_∞ - ciśnienie „daleko przed” badanym obiektem

p – ciśnienie w rozpatrywanym punkcie obiektu

Przybliżone oszacowanie zapoczątkowania kawitacji oraz ocena jej zasięgu przy różnych warunkach pracy profilu



Wykres kawitacyjny profilu

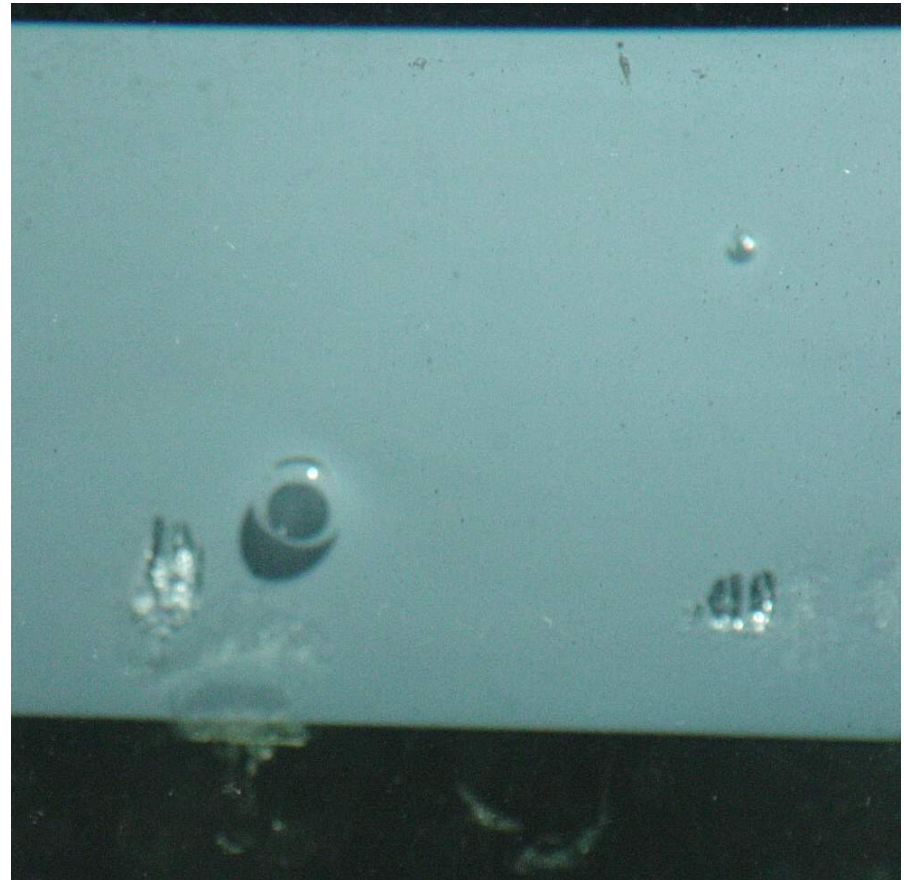




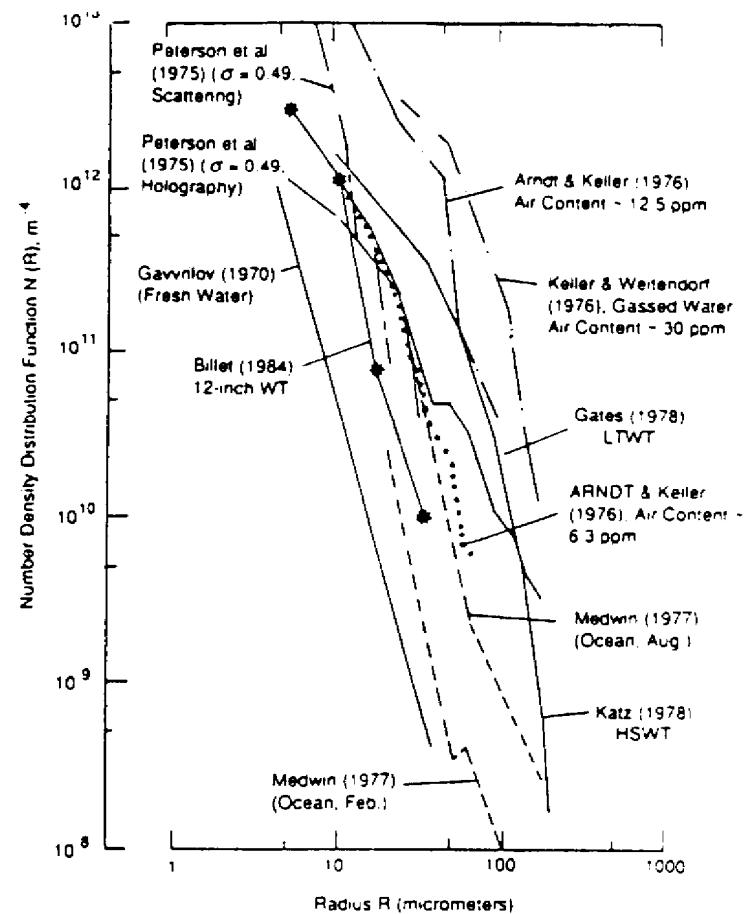
Zapoczątkowanie kawitacji

**Zapoczątkowanie kawitacji
polega na destabilizacji
mikropęcherzyków
stanowiących naturalną
zawartość cieczy**

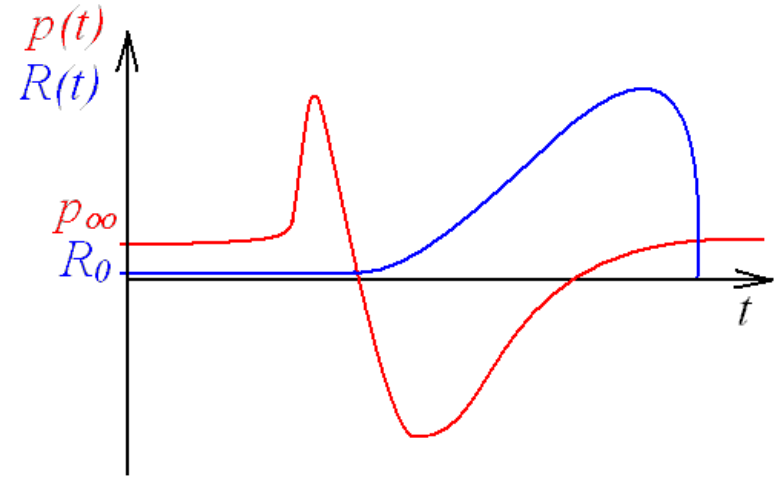
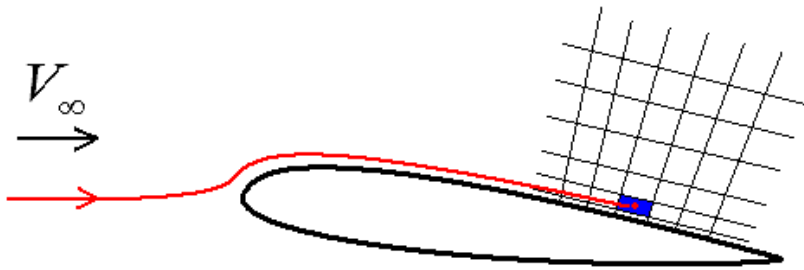
$$p_e = p_v + p_g - \frac{2\sigma}{R}$$



Rozkład mikropęcherzyków



Historia rozwoju i zaniku pęcherzyka kawitacyjnego



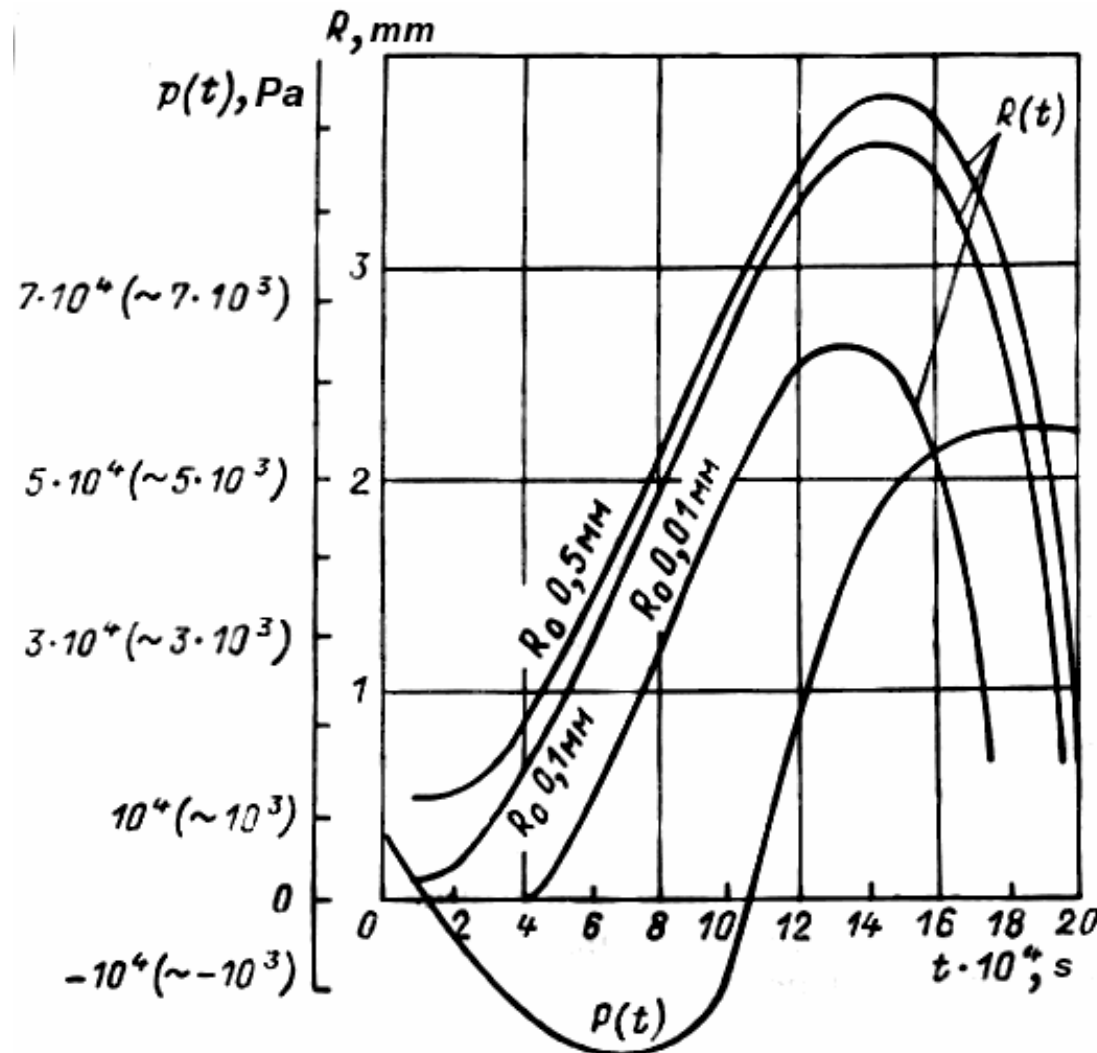
Równanie Rayleigha-Plesseta

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + 4 \frac{\mu}{\rho R} \frac{dR}{dt} = - \frac{p_\infty + \frac{2A}{R} - p_v - p_g}{\rho}$$

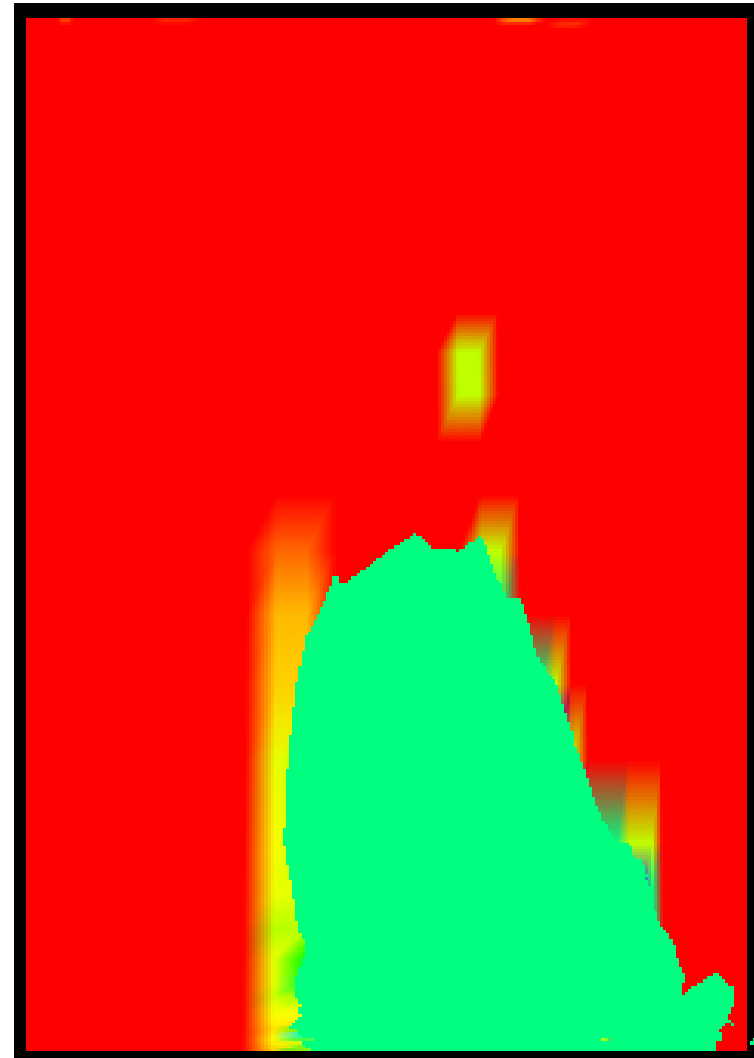
R – promień pęcherzyka

A – napięcie powierzchniowe cieczy

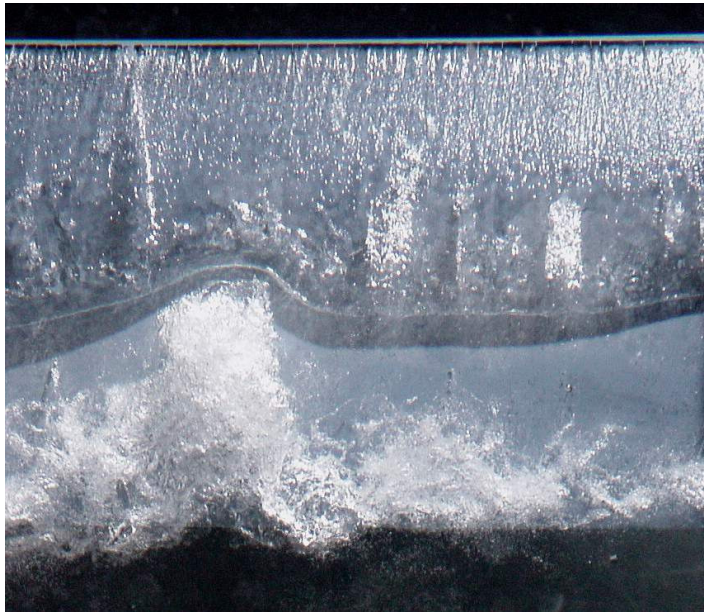
Historia rozwoju i zaniku pęcherzyków kawitacyjnych o różnych promieniach początkowych



Porównanie obliczonego i zmierzonego zakresu kawitacji



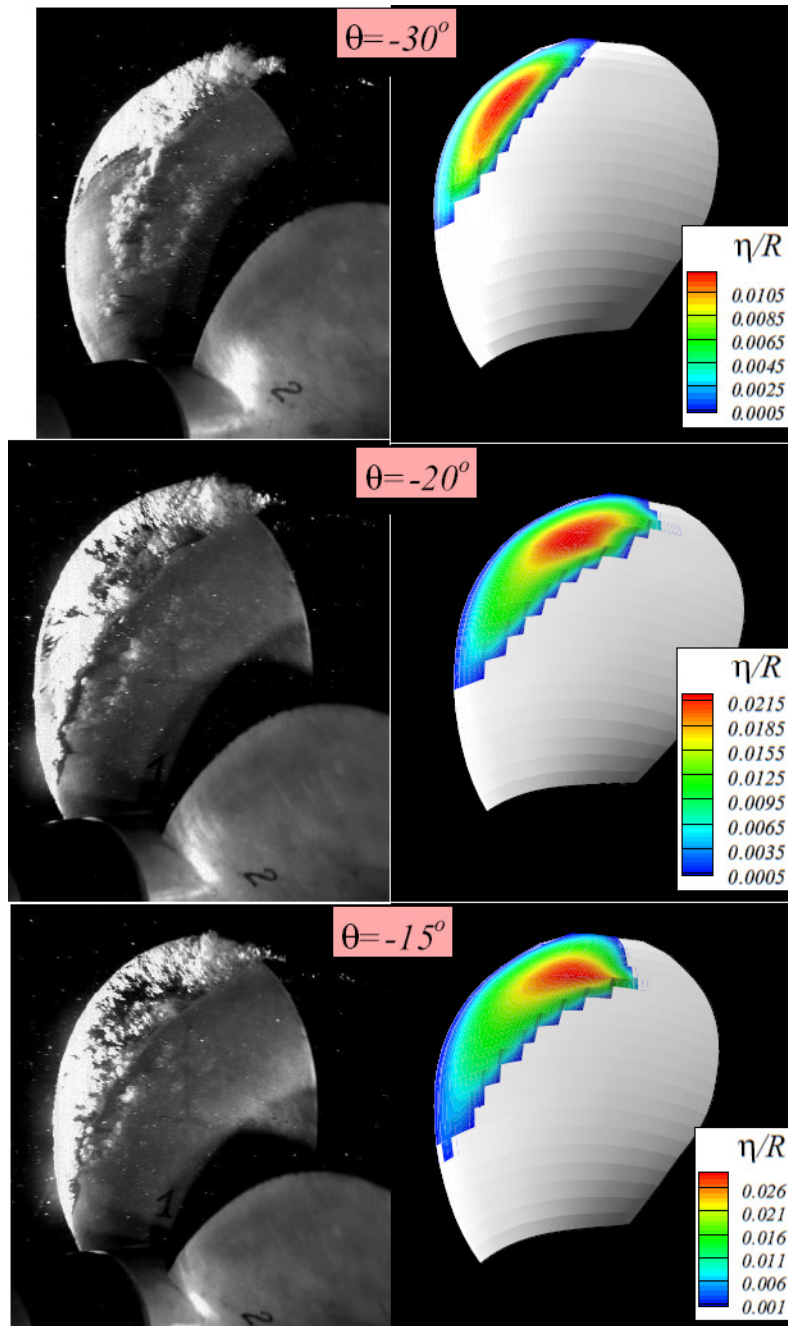
Formy kawitacji



Kawitacja laminarna

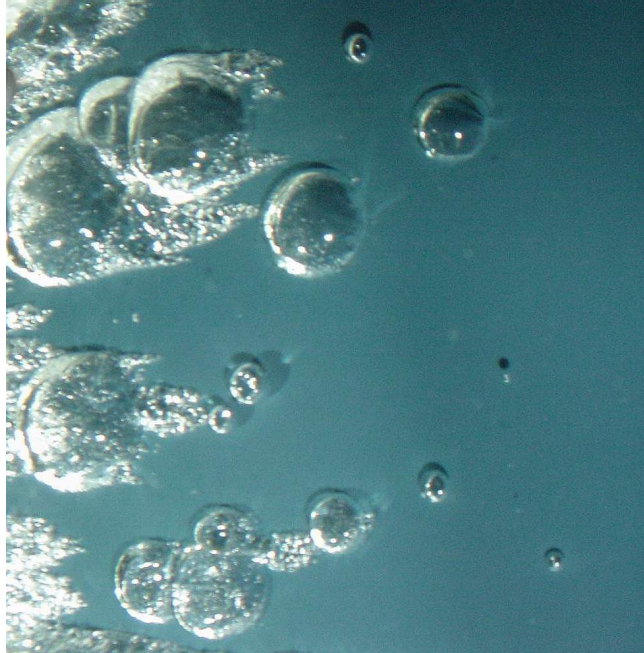
**duże naprężenia
rozciągające w cieczy
o wystarczająco długim
czasie oddziaływania na
mikropęcherzyki**





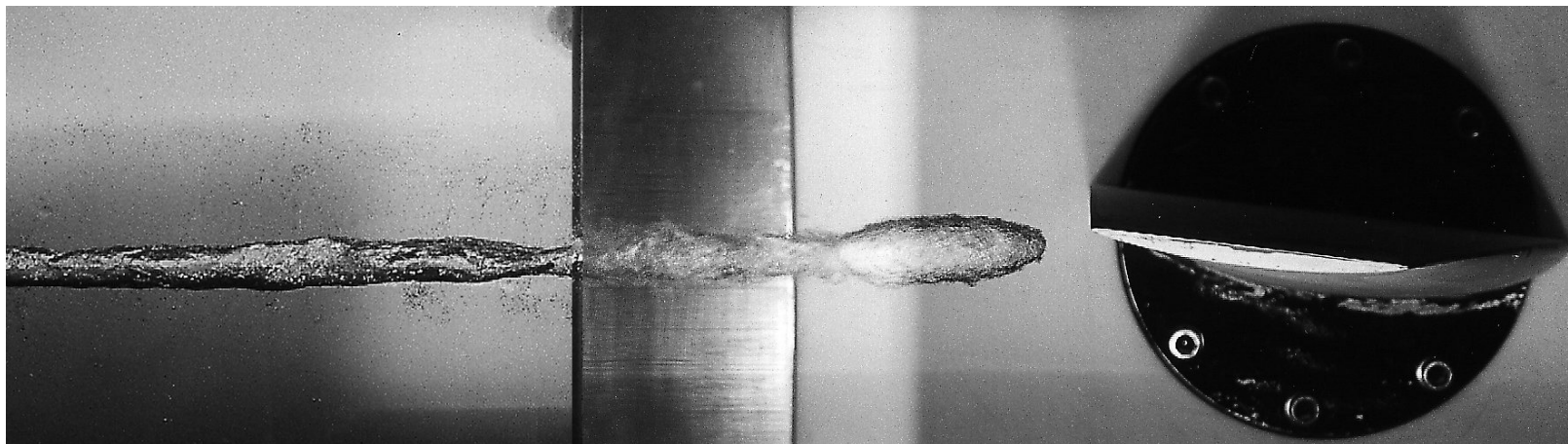
**Obliczeniowe
wyznaczenie kawitacji
laminarnej na skrzydle
śruby okrętowej
metodą elementów
brzegowych**

Formy kawitacji



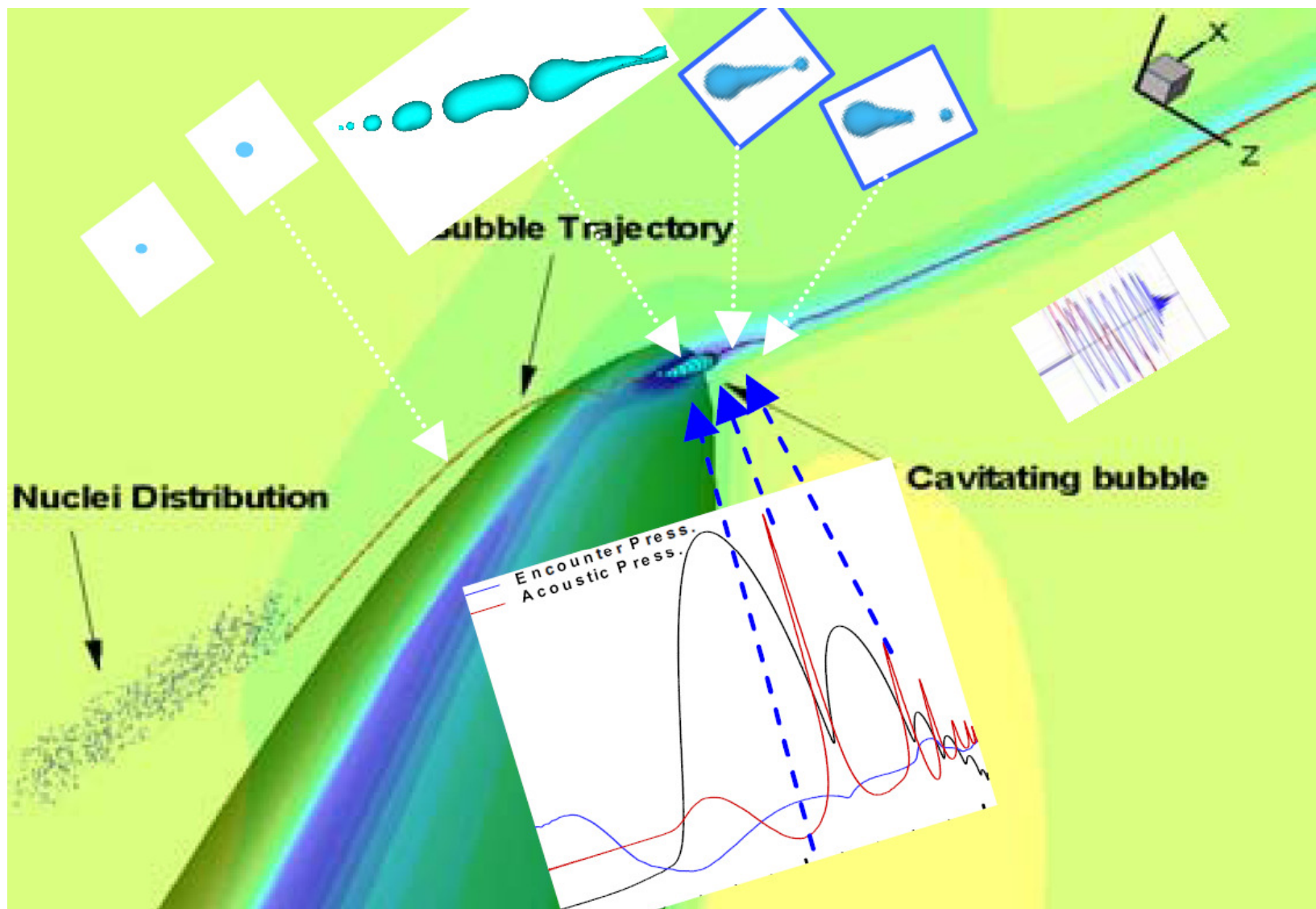
Kawitacja pęcherzykowa
niewielkie naprężenia
rozciągające w cieczy
o krótkim czasie
oddziaływania na
mikropęcherzyki

Formy kawitacji

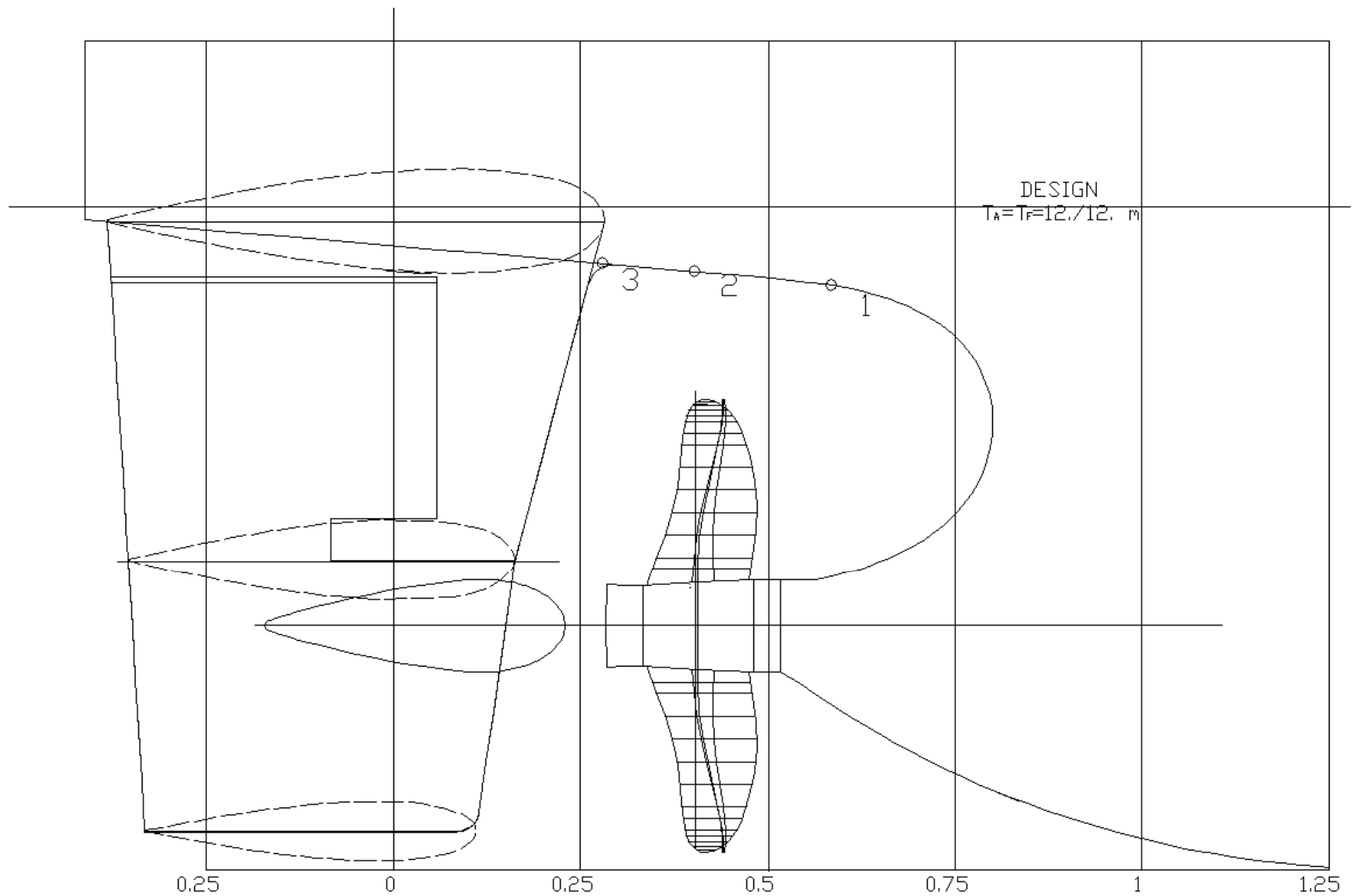


Kawitacja wirowa

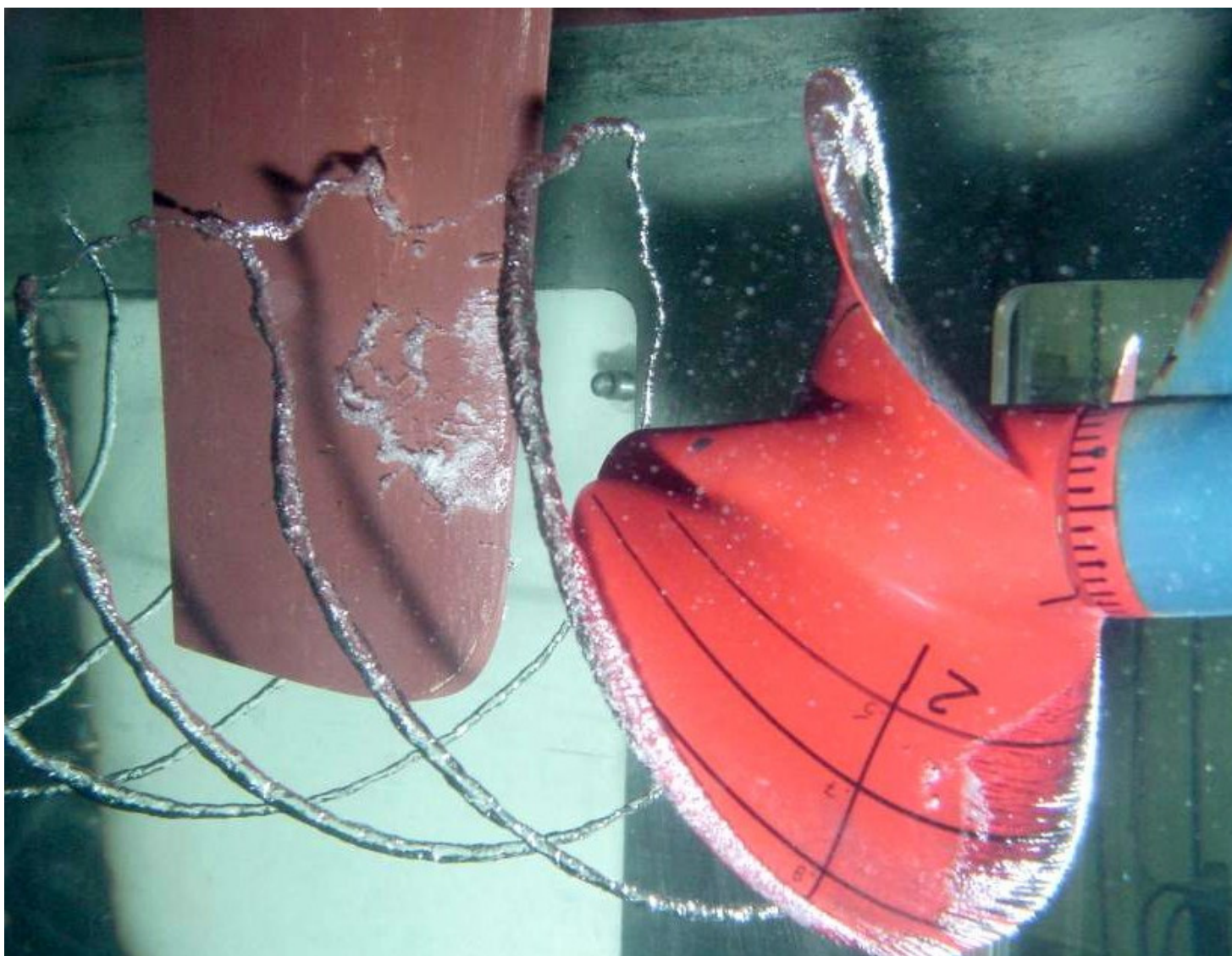




Mechanizm powstawania kawitacji wirowej



Konfiguracja śruba okrętowa - ster



Kawitujący wir wierzchołkowy zdeformowany przez oddziaływanie steru

Pulsacje ciśnienia generowane przez kawitujący wir wierzchołkowy ze sterem i bez steru

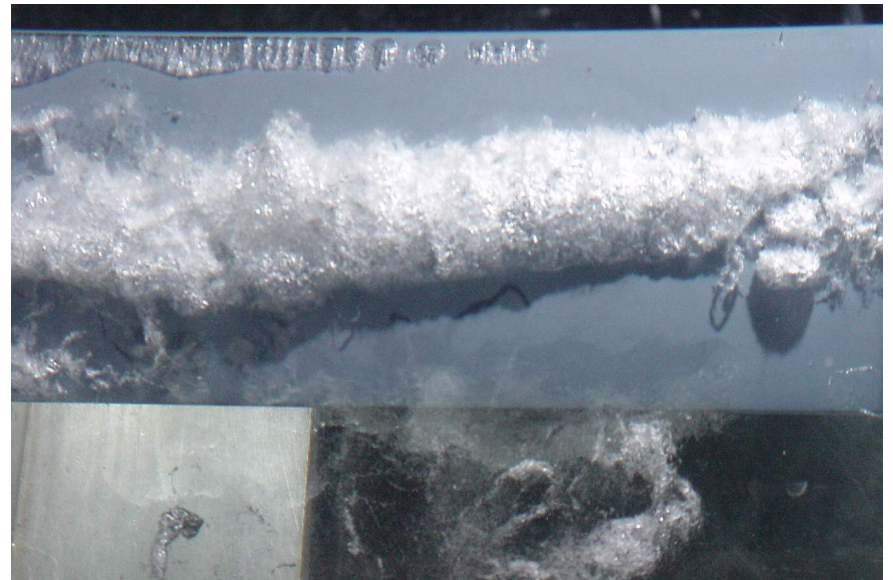
	Ze sterem	Ze sterem	Bez steru	Bez steru
Punkt nr	A1[kPa]	A2[kPa]	A1[kPa]	A2[kPa]
1	0.976	0.773	0.730	0.569
2	2.630	2.960	1.963	2.310
3	2.731	3.036	1.560	2.071

Formy przejściowe kawitacji



Kawitacja chmurzasta

wzrost ciśnienia w cieczy
napotykaną przez kawitację
powoduje powstawanie
przejściowych form zjawiska

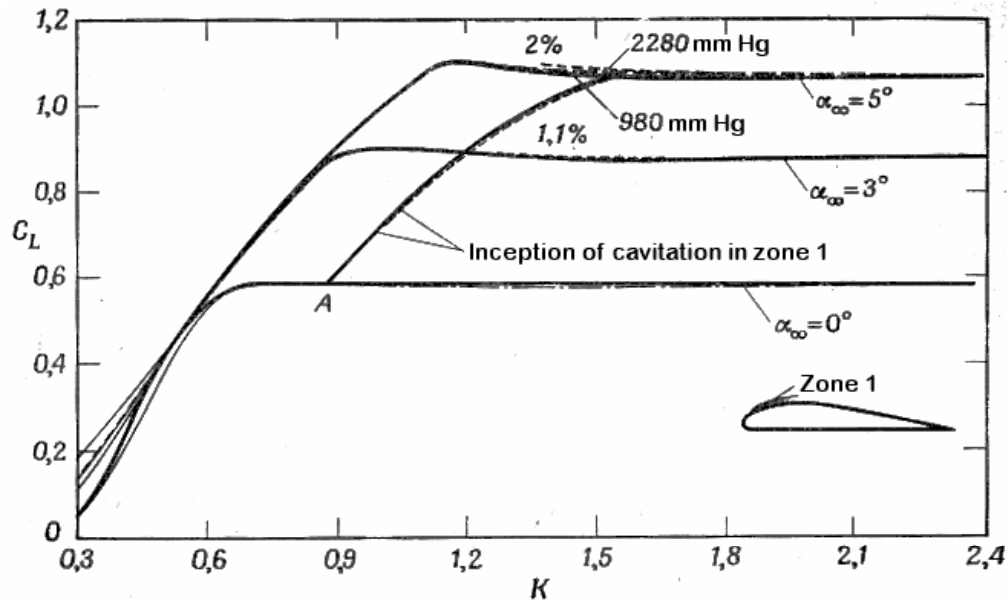


Konsekwencje kawitacji

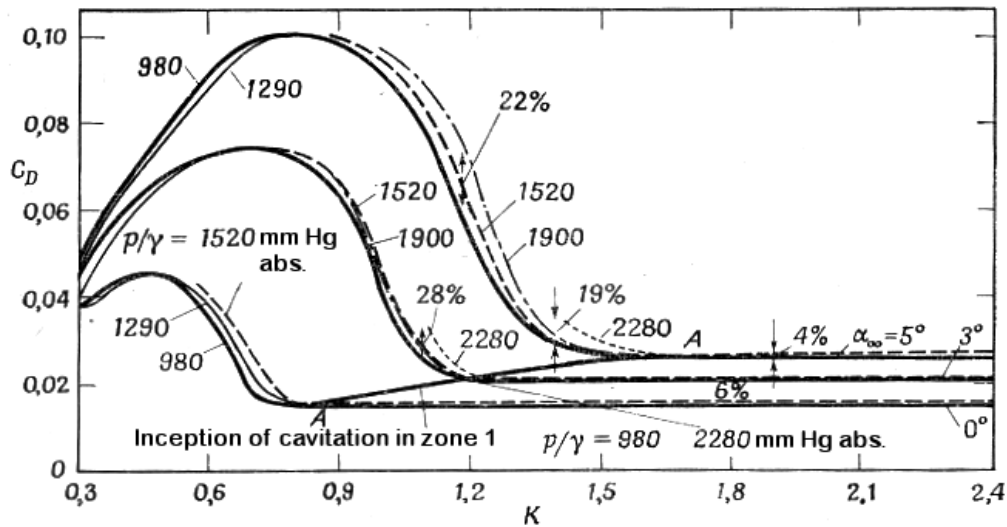
- spadek sprawności maszyn przepływowych**
- erozja kawitacyjna**
- hałas i drgania**

Spadek sprawności

$$K = \sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

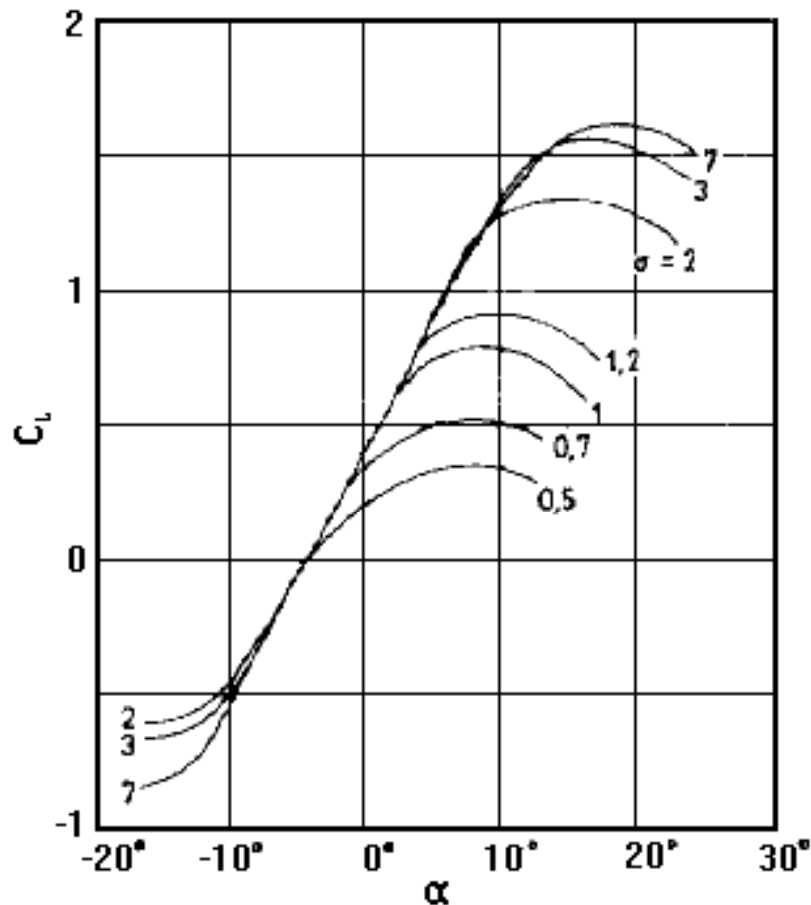


Zależność współczynnika siły nośnej płata od liczby kawitacyjnej i kąta natarcia



Zależność współczynnika oporu płata od liczby kawitacyjnej i kąta natarcia

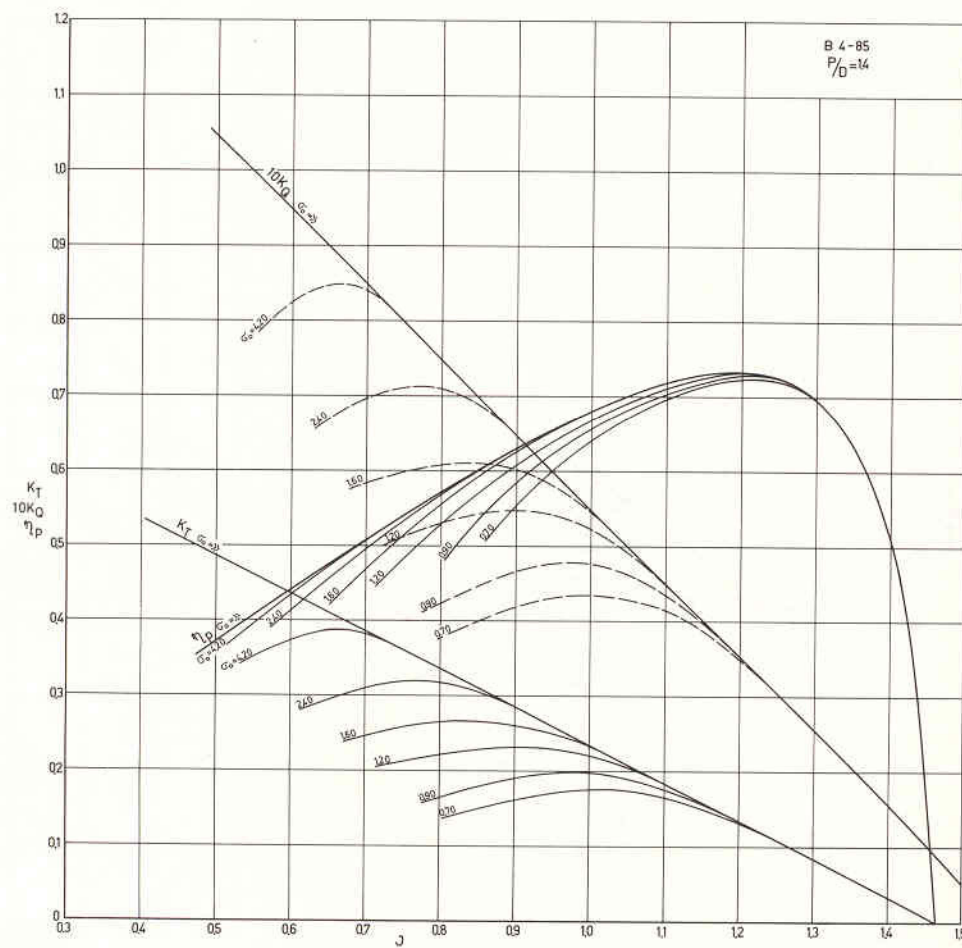
Spadek sprawności



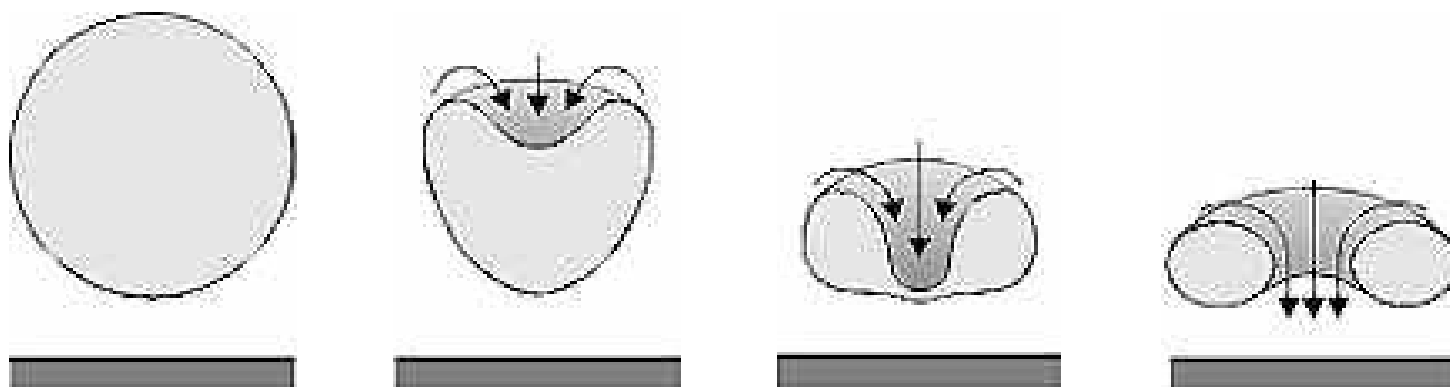
$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

Zależność przebiegu współczynnika siły nośnej C_l od liczby kawitacyjnej σ dla płata o profilu NACA 4418

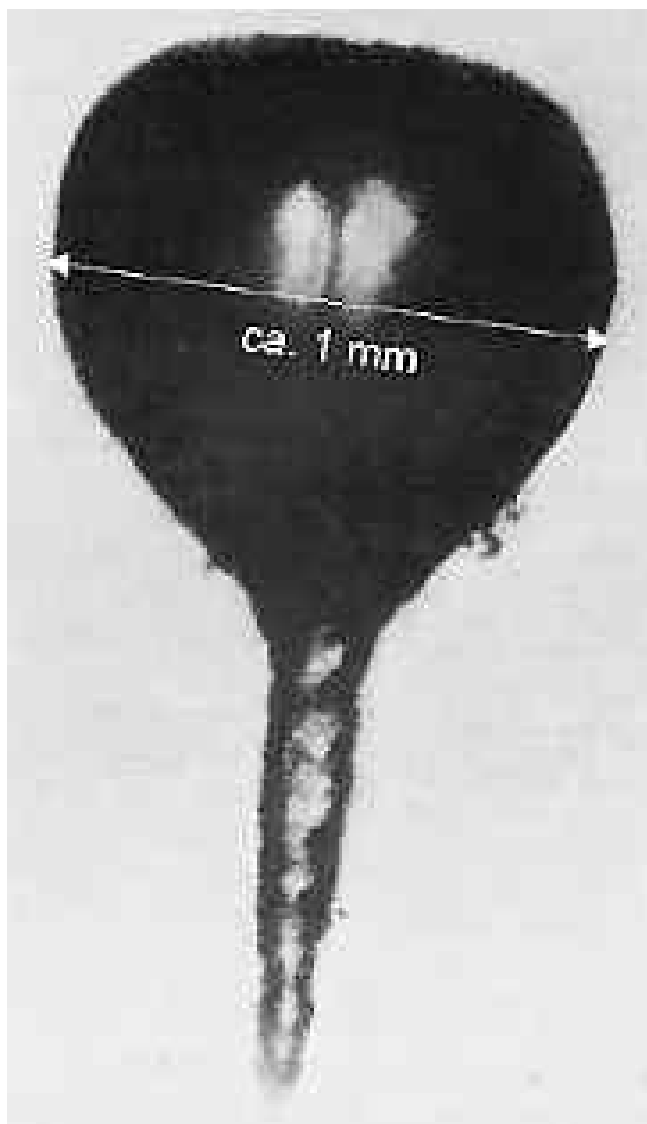
Wpływ kawitacji na sprawność śruby okrętowej



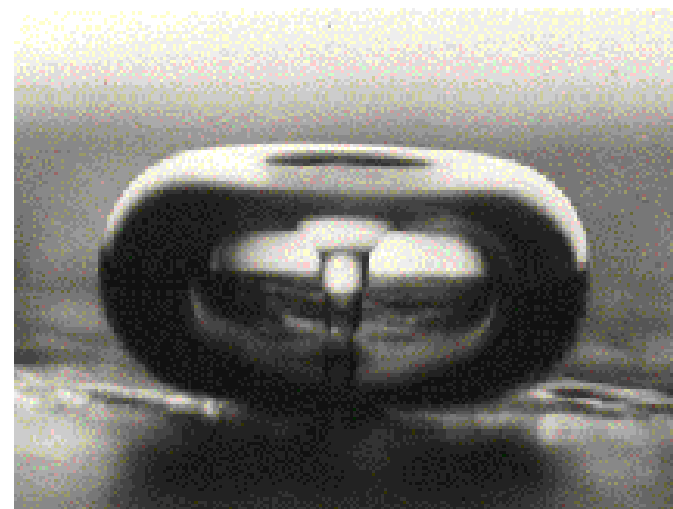
Erozja kawitacyjna



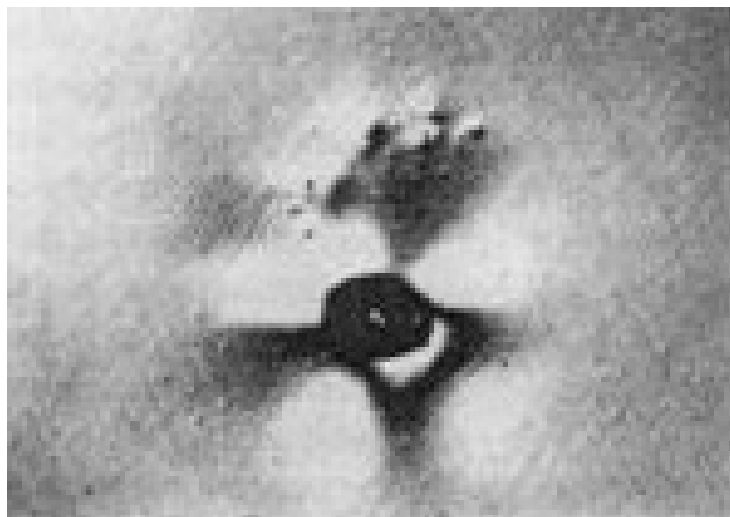
**przebieg kolapsu pęcherzyka kawitacyjnego
w pobliżu ścianki**



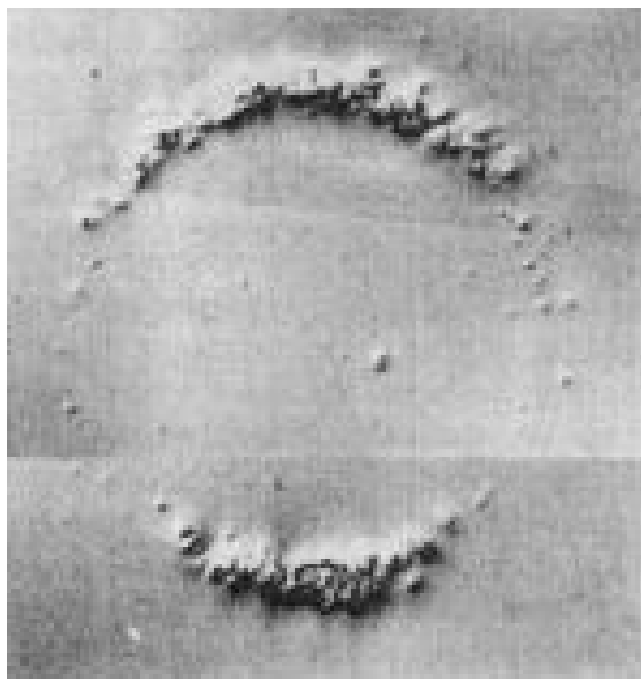
**Końcowa faza kolapsu
pęcherzyka kawitacyjnego
w pobliżu ścianki**



Pojedyncze wżery erozyjne

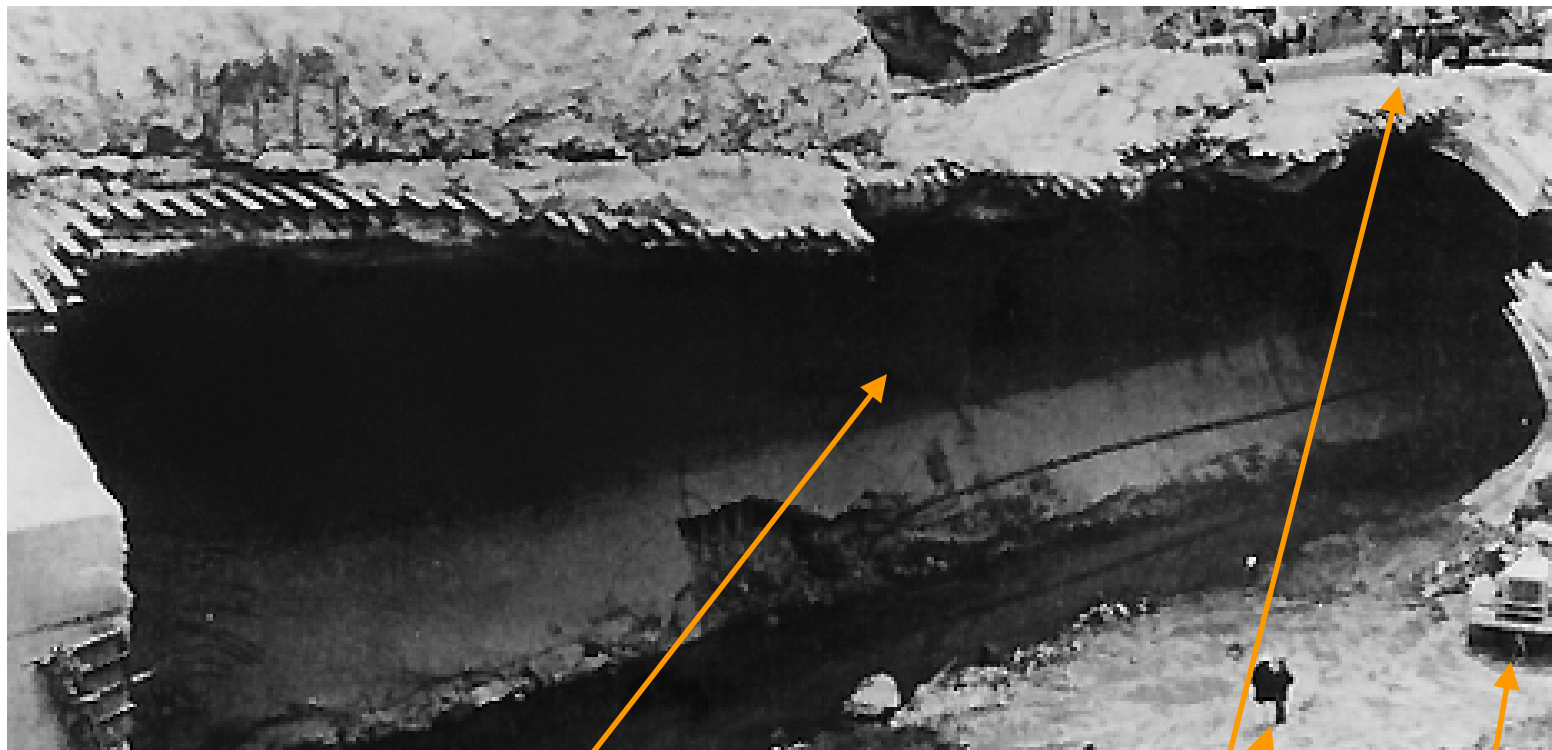


**Wżer wywołany strumieniem cieczy
przebijającym pęcherzyk położony
bardzo blisko ściany**



**Wżer wywołany wtórnym kolapsem
toroidalnego pierścienia pęcherzyków
jaki powstaje, gdy zanikający pęcherzyk
jest położony nieco dalej od ściany**

Konsekwencje erozji kawitacyjnej

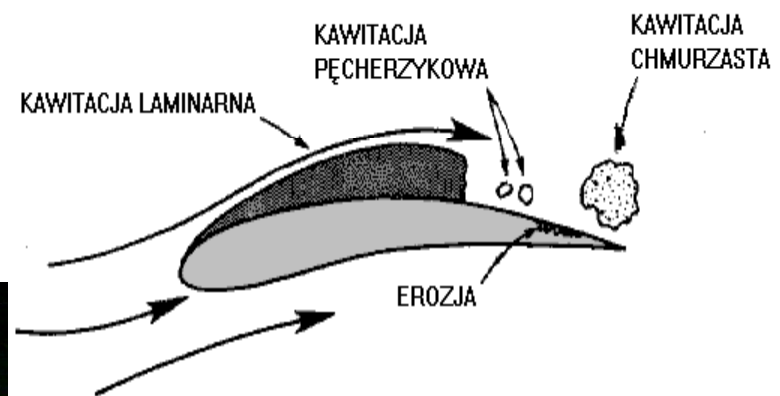


**60-metrowe uszkodzenie kanału
hydroelektrowni Tarbela Dam w Pakistanie**

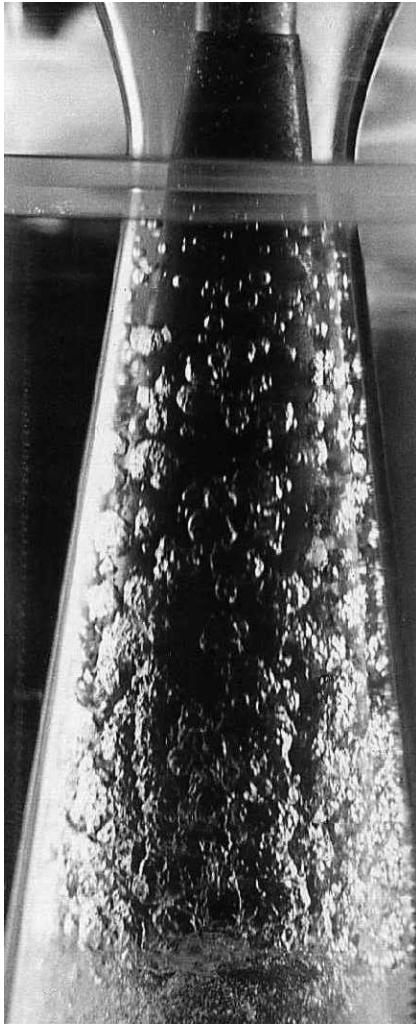
ludzie

koparka

Erozja na skrzydłach śruby okrętowej

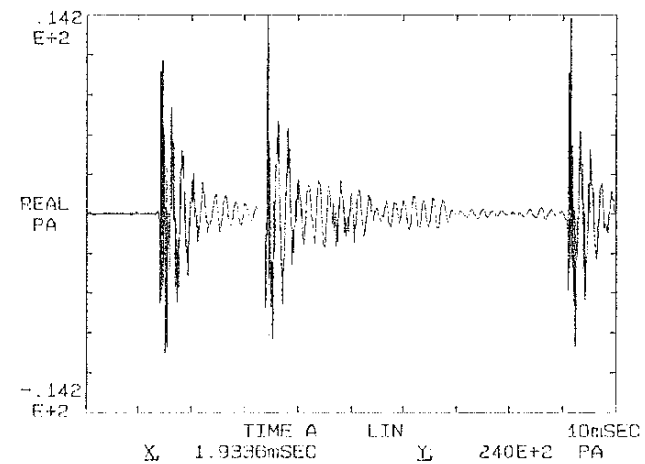


Hałas



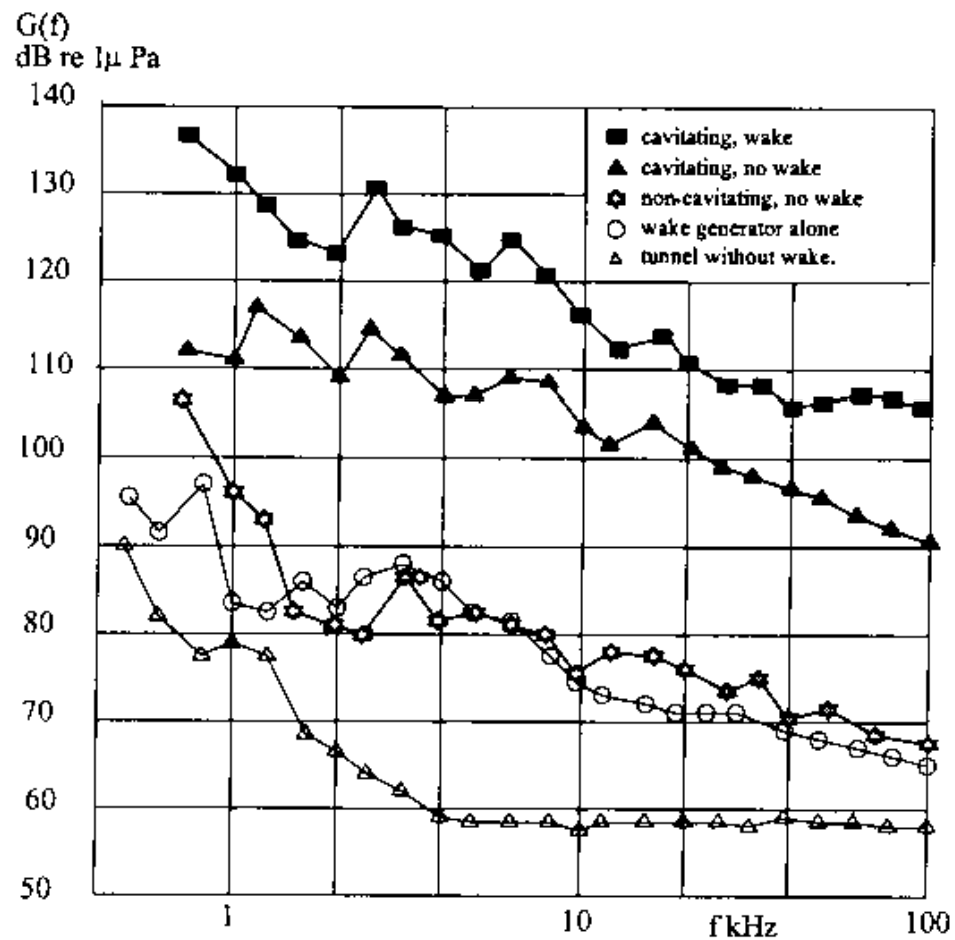
$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + 4\mu\frac{\dot{R}}{\rho R} = F(t)$$

S
40kHz A: AC/ 50V B: AC/ 50V S: PEK 2/128 ChA 1k

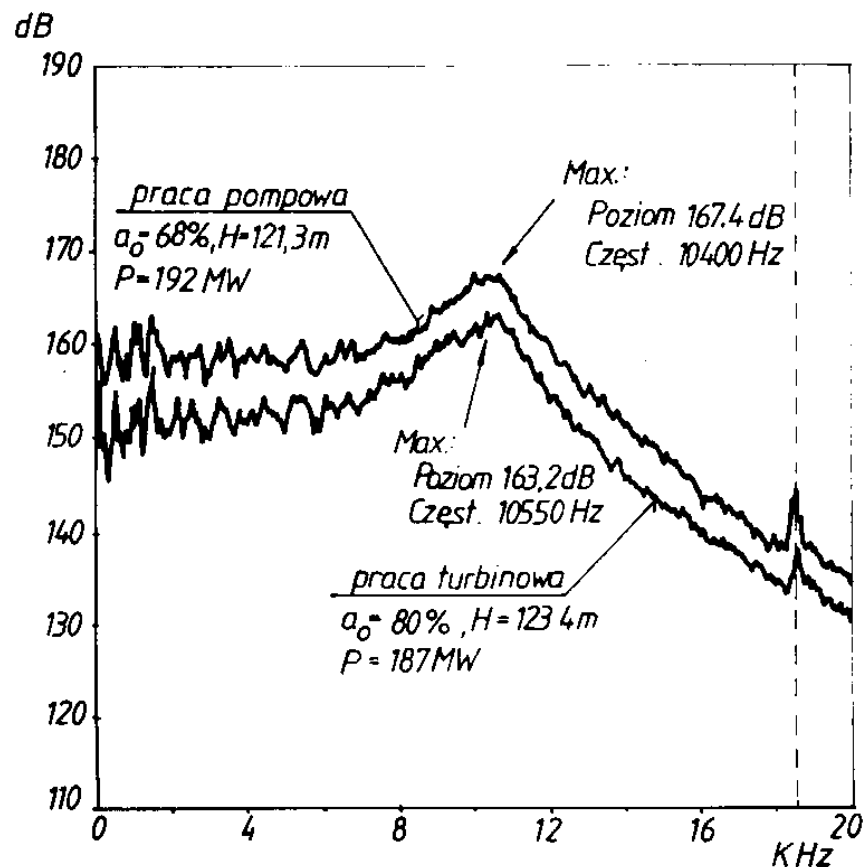


C2: 32

Widmo hałasu emitowanego przez śrubę okrętową



Drgania



**Porównanie widma
drgań rury ssącej
w elektrowni Żarnowiec
podczas pompowania
i pracy turbinowej**

Podsumowanie

- wszystkie maszyny i urządzenia, w których czynnikiem roboczym jest ciecz, są narażone na wystąpienie kawitacji**
- kawitacja niesie ze sobą poważne negatywne konsekwencje, prowadzące do zakłócania pracy oraz niszczenia tych maszyn i urządzeń**
- ograniczenie występowania kawitacji i jej negatywnych konsekwencji wymaga stosowania specjalnych, skomplikowanych metod projektowania maszyn i urządzeń, wykorzystujących nowoczesne techniki eksperymentalne i najbardziej zaawansowane teorie**