

Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

Janusz Steller

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk



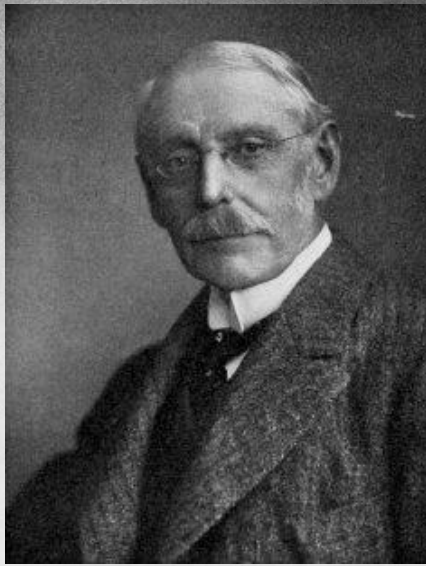
Instytut Oceanologii PAN, Sopot, 28 maja 2010



Kuter torpedowy **Daring**

- spadek prędkości jednostki ze wzrostem obrotów śruby napędowej





Sir Charles Parsons
(1854-1931)



Turbinia (1894)

- spadek prędkości jednostki ze wzrostem obrotów śruby napędowej
- uszkodzenia erozyjne śruby

Jaice (Bośnia) – całkowite zniszczenie wirnika turbiny Francisa
po kilku tygodniach eksploatacji



Fotografia:
remont okresowy w jednej z polskich elektrowni wodnych

Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- rys historyczny

Badania w okresie I wojny światowej i bezpośrednio po wojnie

Wielka Brytania

Sir Charles A. Parsons

Lord Rayleigh (*John Strutt*)

Niemcy

Hermann Föttinger (Gdańsk, Berlin/Charlottenburg)

Dieter Thoma (Monachium)

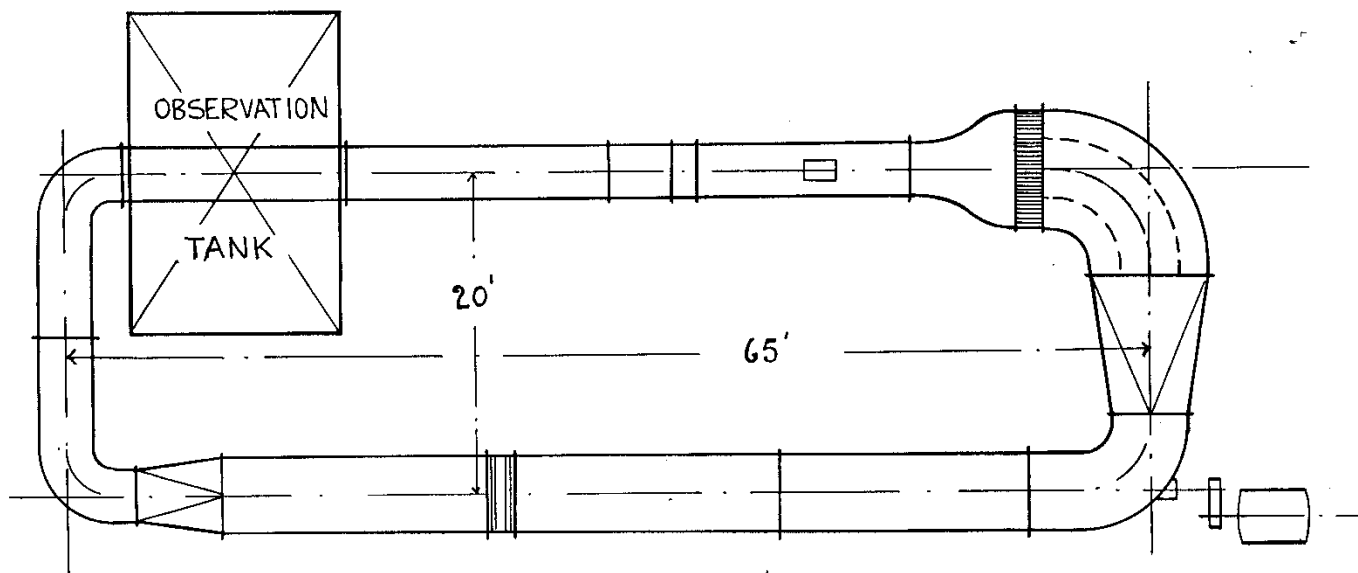
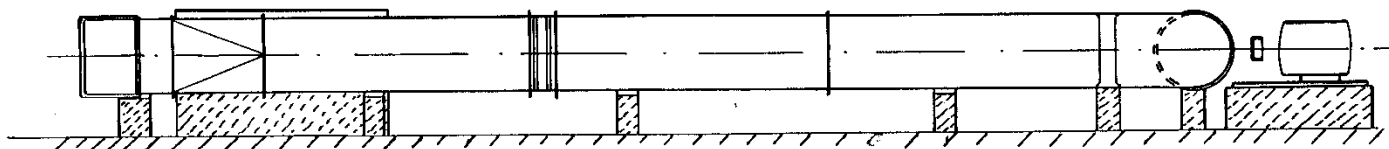
Tunel kawitacyjny Emersona
na Uniwersytecie Newcastle



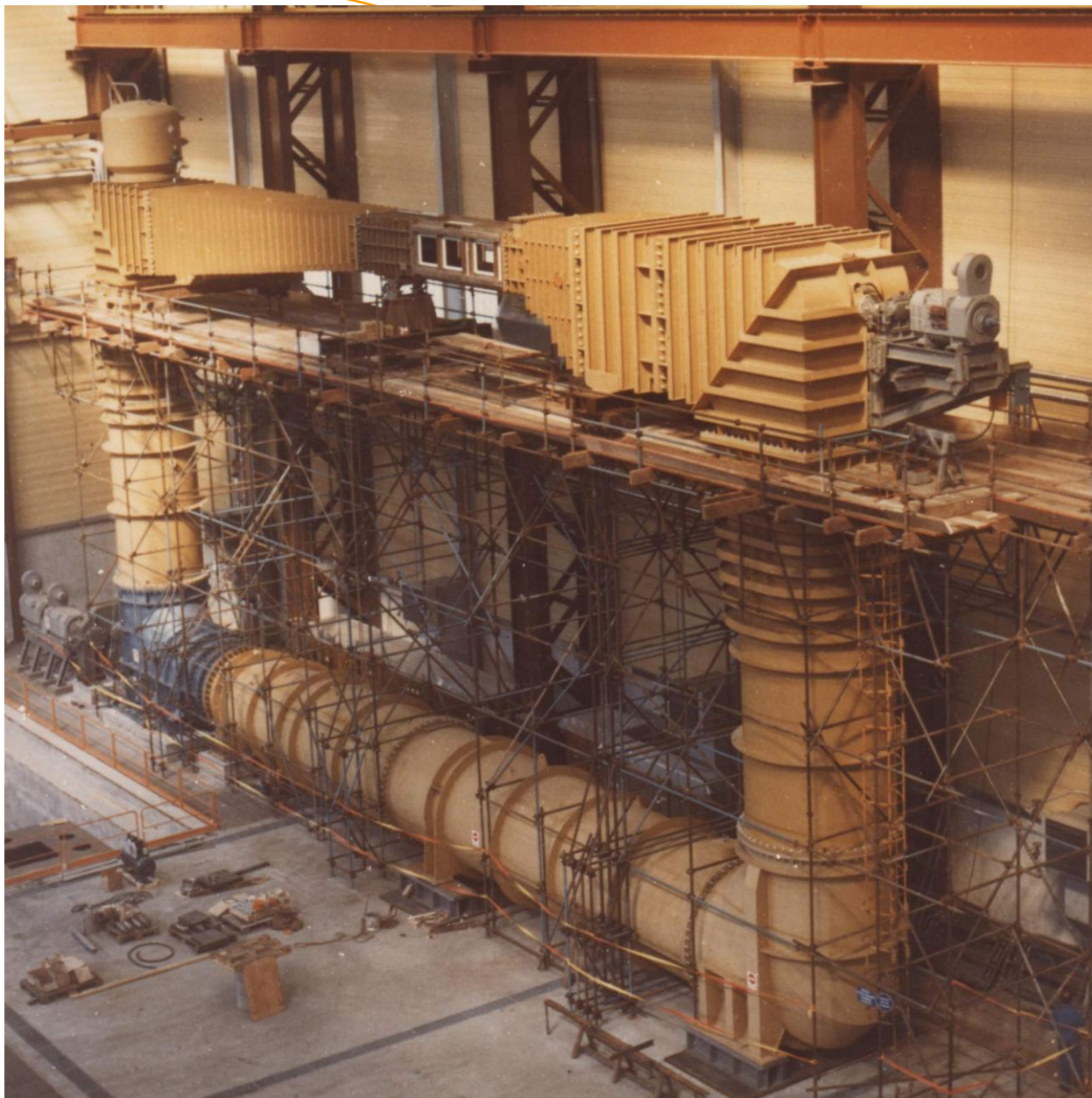
Tunel C.A.Parsonsa



Kawitacja na śrubie okrętowej



Tunel kawitacyjny w *Nachrichten Versuchsanstalt, Pelzerhaken*
(Laboratorium Wywiadu Rzeszy Niemieckiej, 1938-40)



Tunel kawitacyjny Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku

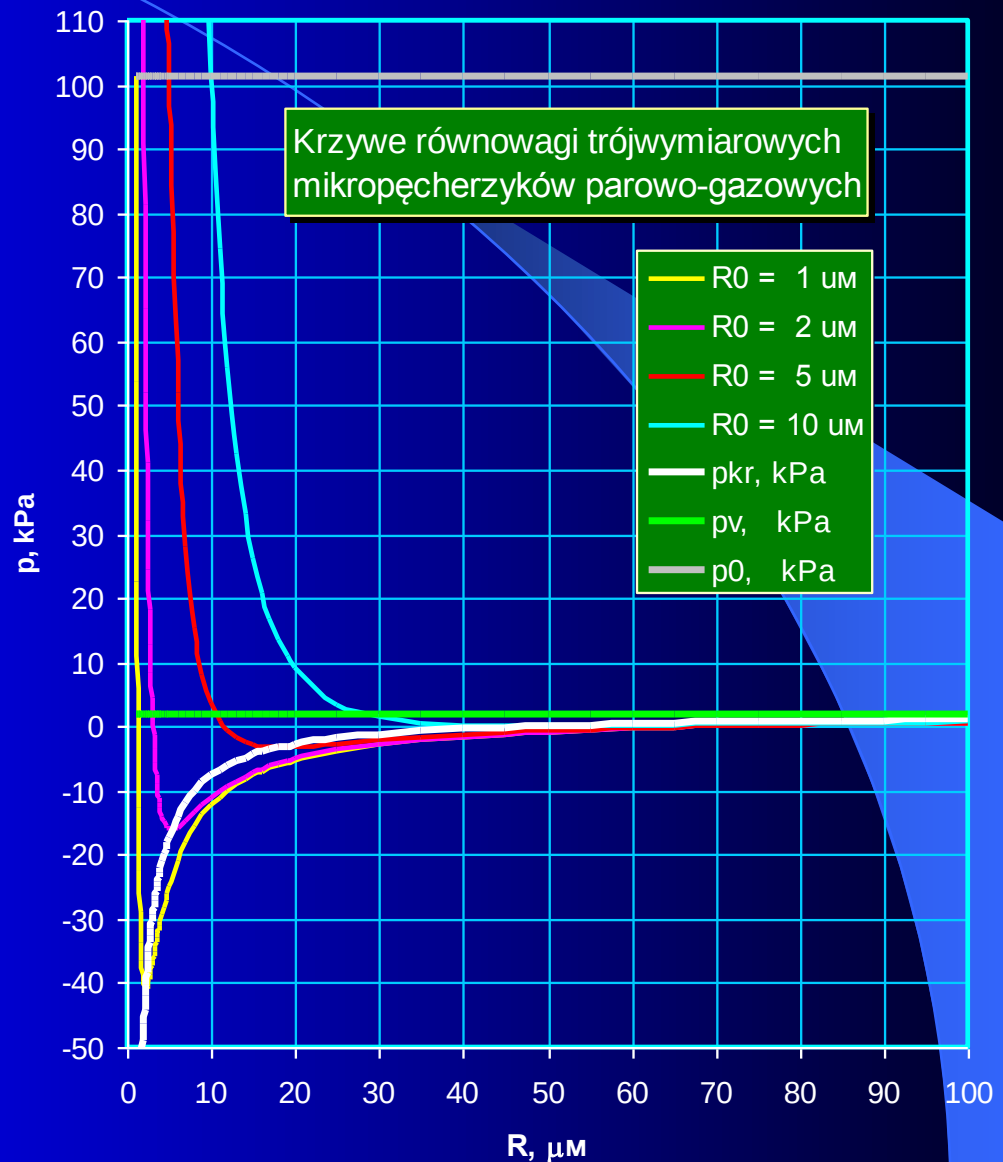


Tunel kawitacyjny w Berlinie (Tiergarten)

Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- podstawy fizyczne

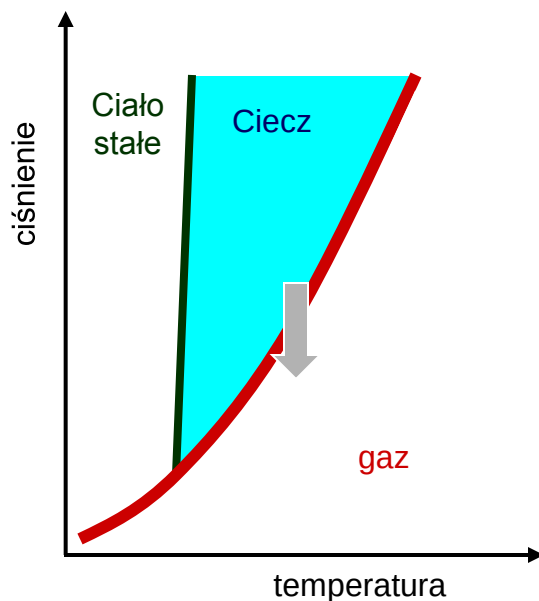
$$\left(p - p_v + \frac{2\sigma}{R} \right) R^3 = \text{const}$$



Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- podstawy fizyczne

Nazwa (W.Froude, 1895) – od słowa **cavus** (pustka)

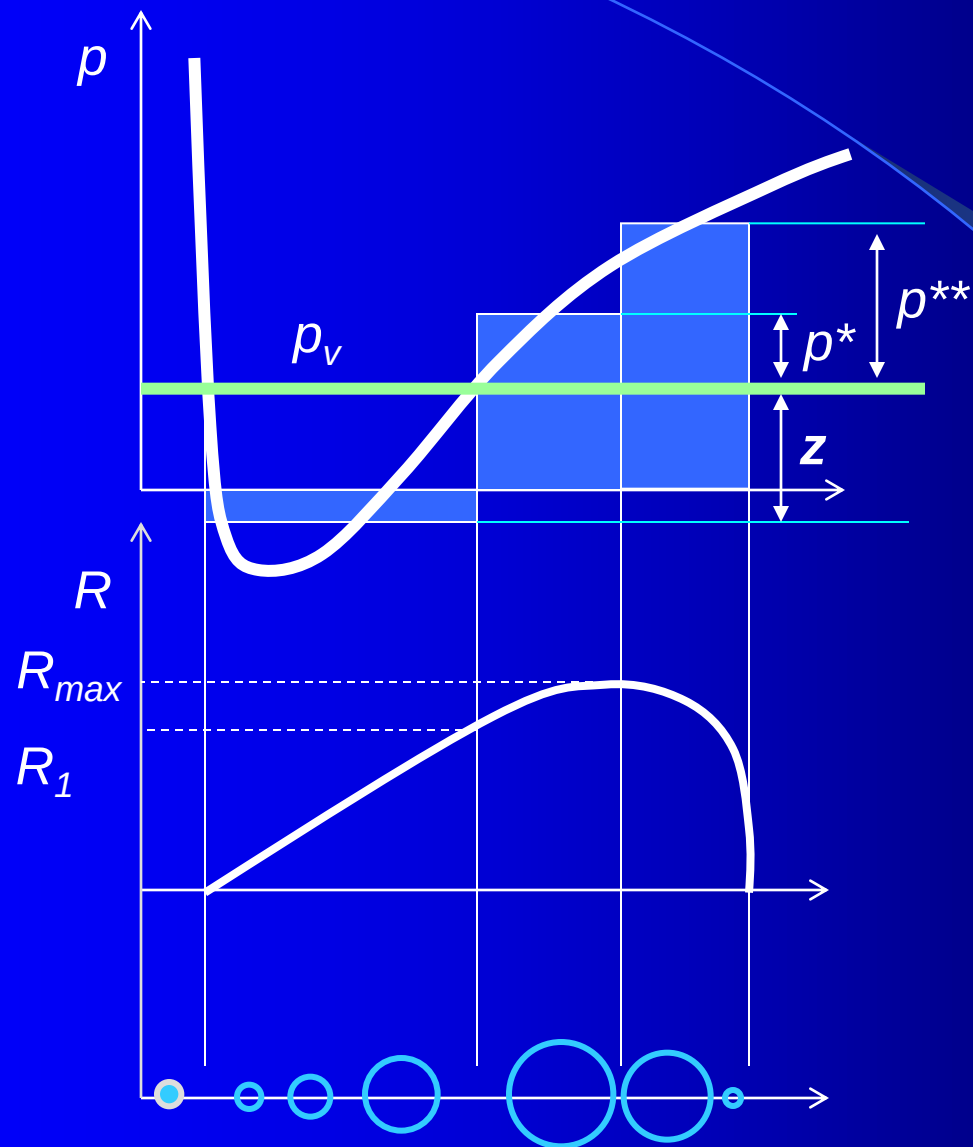


Nierównowagowa przemiana fazy ciekłej w fazę gazową w wyniku obniżenia ciśnienia

*Tworzenie kwasistacyjnych kawern parowo-gazowych
w obszarach obniżonego ciśnienia przepływającej cieczy*

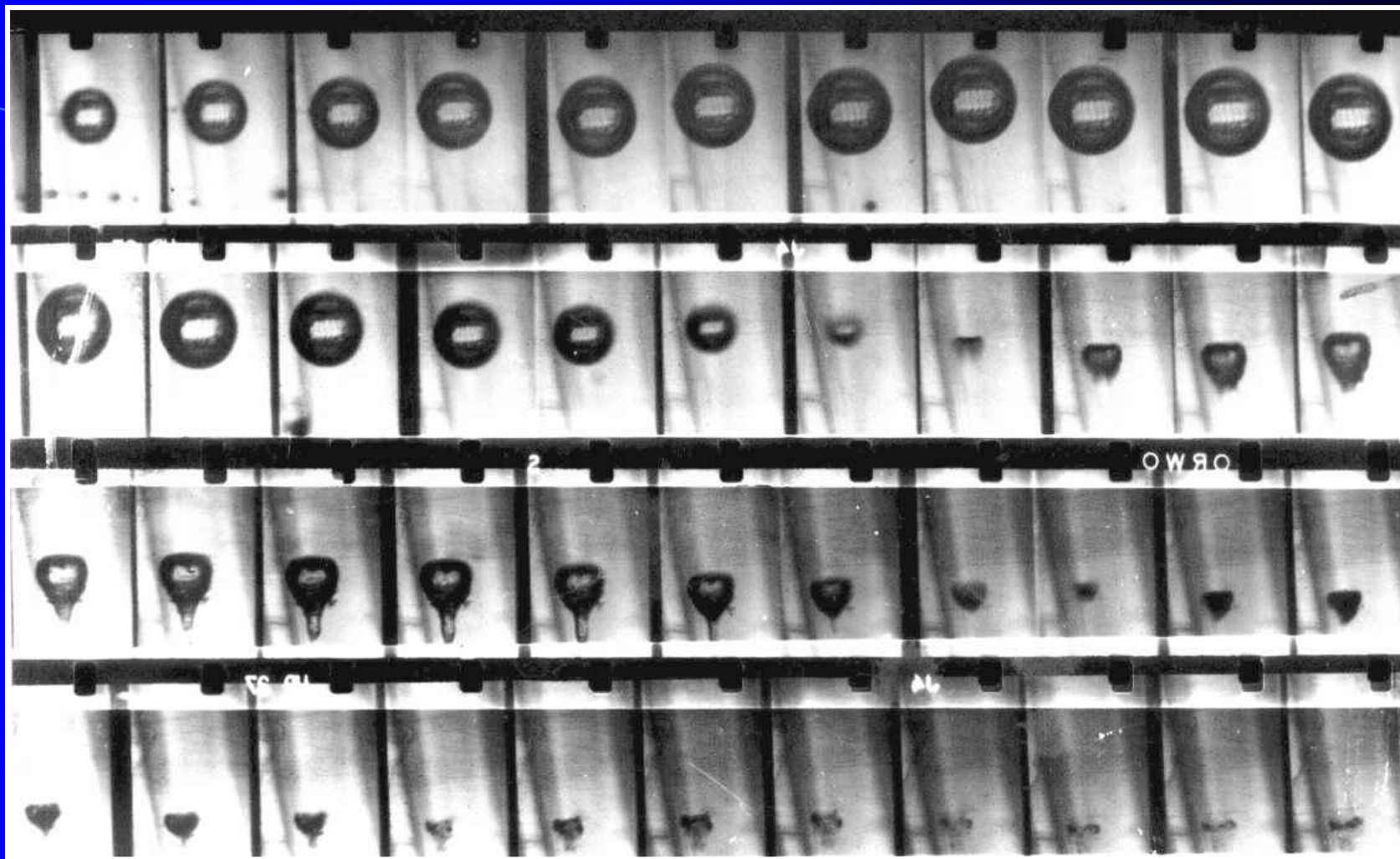
Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- historia rozwoju pęcherzyka kawitacyjnego na opływanym ciele



Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

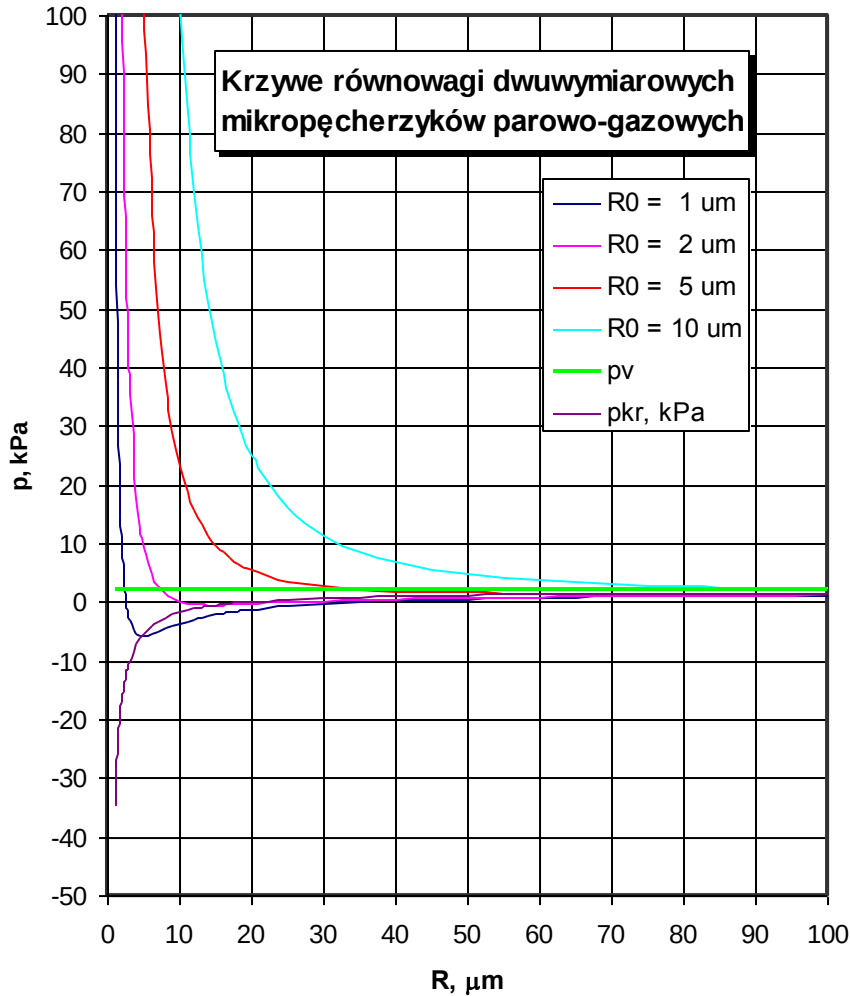
- historia rozwoju sztucznie wygenerowanego pęcherzyka



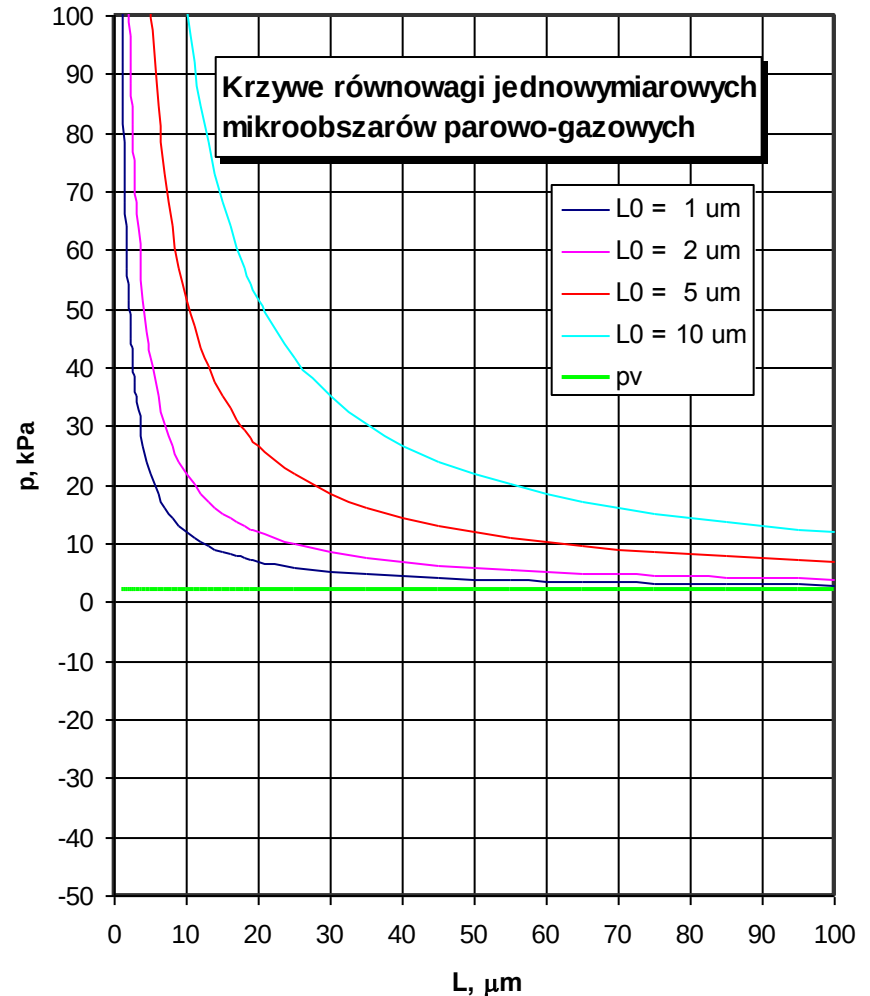
Laboratorium IMP PAN, 50 000 klatek/s

Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- Czy możliwa jest kawitacja w układach dwu- i jednowymiarowych?



$$\left(p - p_v + \frac{\sigma}{R} \right) R^2 = \text{const}$$



$$(p - p_v)L = \text{const}$$

Dynamika pęcherzyka sferycznego w cieczy nieściśliwej

- wyprowadzenie równania Rayleigha przy użyciu formalizmu Lagrange'a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = 0$$

Funkcja Lagrange'a:

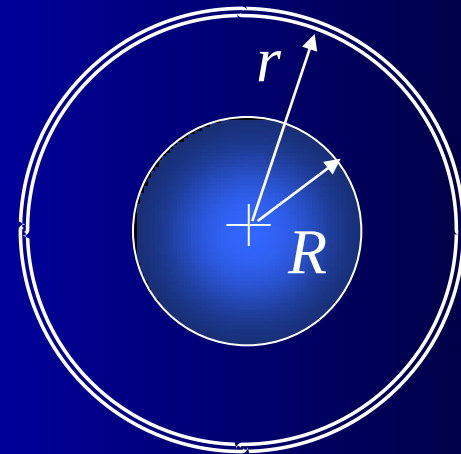
$$\mathcal{L} = U - E$$

$$U = \frac{4\pi R^3 (p - p_v)}{3}$$

$$E = 4\pi \int_R^\infty \rho \frac{\dot{r}^2}{2} r^2 dr \quad \dot{r} = \dot{R} \left(\frac{R}{r} \right)^2$$

Równanie dynamiki

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{p_v - p_\infty}{\rho}$$



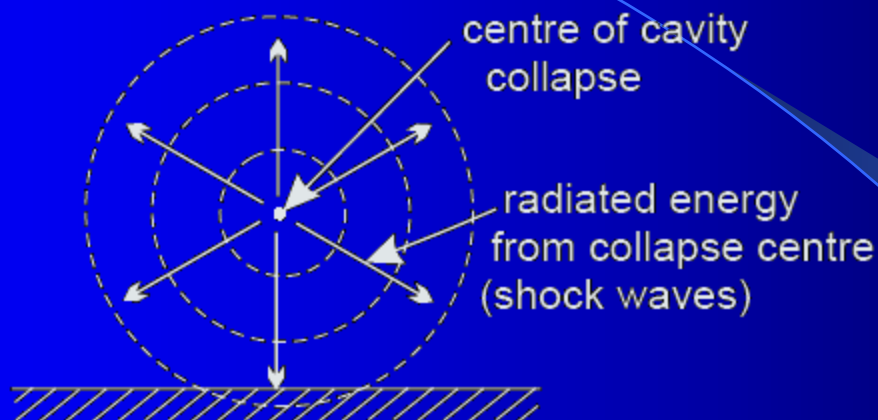
Dynamika pęcherzyka sferycznego w cieczy nieściśliwej z uwzględnieniem napięcia powierzchniowego lepkości

Równanie Rayleigha-Plesseta (Noltingka/Neppirasa/Poritskiego)

$$\rho \left(R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) + 4\mu \frac{\dot{R}}{R} = \left(p_{\infty 0} - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} - p_{\infty} + p_v - \frac{2\sigma}{R}$$

Dynamika pęcherzyka kawitacyjnego w pobliżu powierzchni ciała stałego

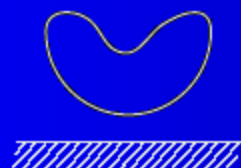
A



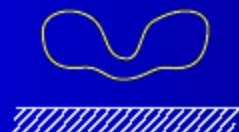
B



initial
spherical
bubble



perturbation
of the side away
from the surface



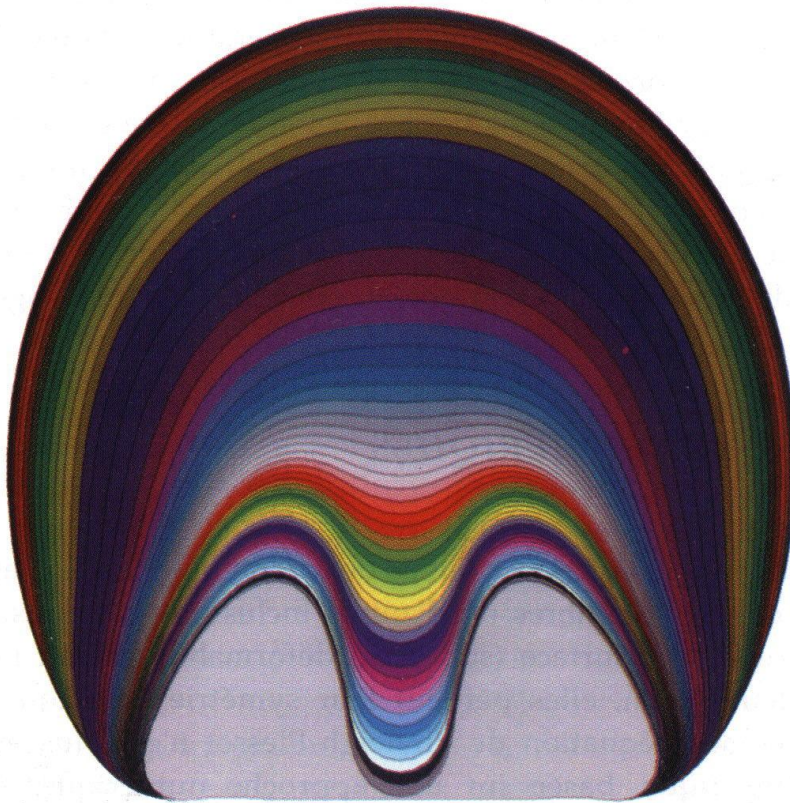
upper fluid
penetrating
flattened side
of the bubble



formation of jet

Dynamika pęcherzyka kawitacyjnego

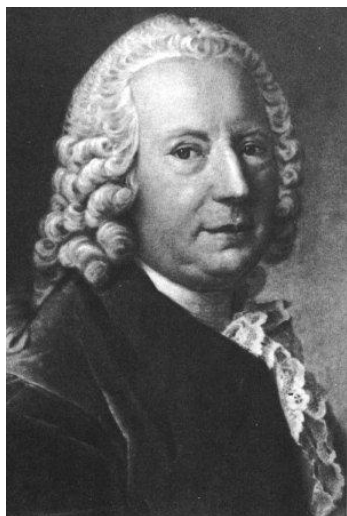
- symulacja numeryczna implozji



Chahine & Duraswami (1994)

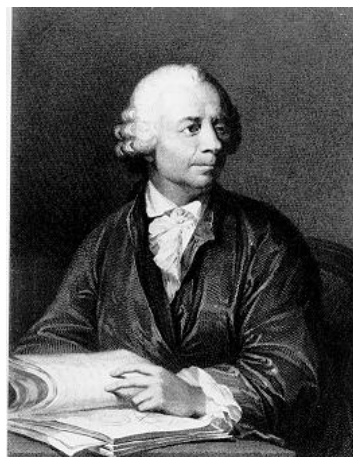
Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- oni byli pierwsi



Daniel Bernoulli (1730):
rozważania dotyczące
zachowania energii w płynącej cieczy

$$p + \rho g z + \rho \frac{v^2}{2} = \text{const}$$



Leonhard Euler (1754):
Równanie Bernoulliego
Traktat o turbinach wodnych

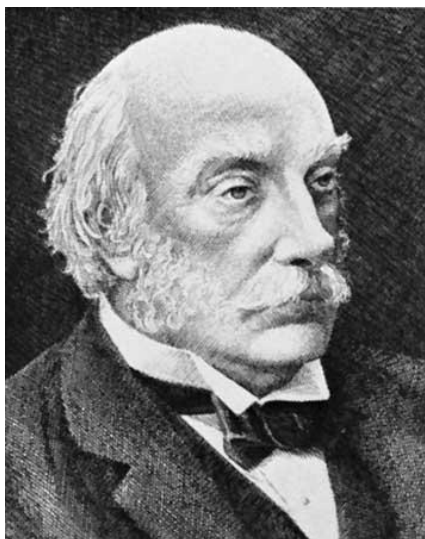
Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

- oni byli pierwsi



William H. Besant (1859):

Rozwiązanie zagadnienia
dynamiki pustego pęcherzyka w cieczy nieściśliwej
(praca przez lata zapomniana)



Lord Rayleigh (1917):

Rozwiązanie zagadnienia
dynamiki pęcherzyka kawitacyjnego
(niezależnie od Besanta)

Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

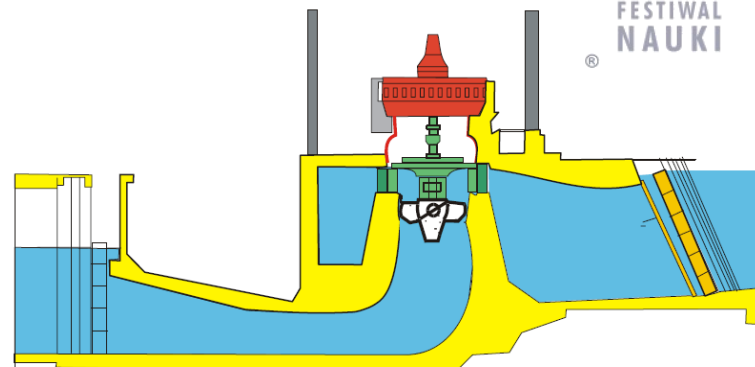
- oni byli pierwsi



Dieter Thoma:

$$\sigma = \frac{NPSH}{H}$$

$$NPSH = H_a - H_s - h_v$$

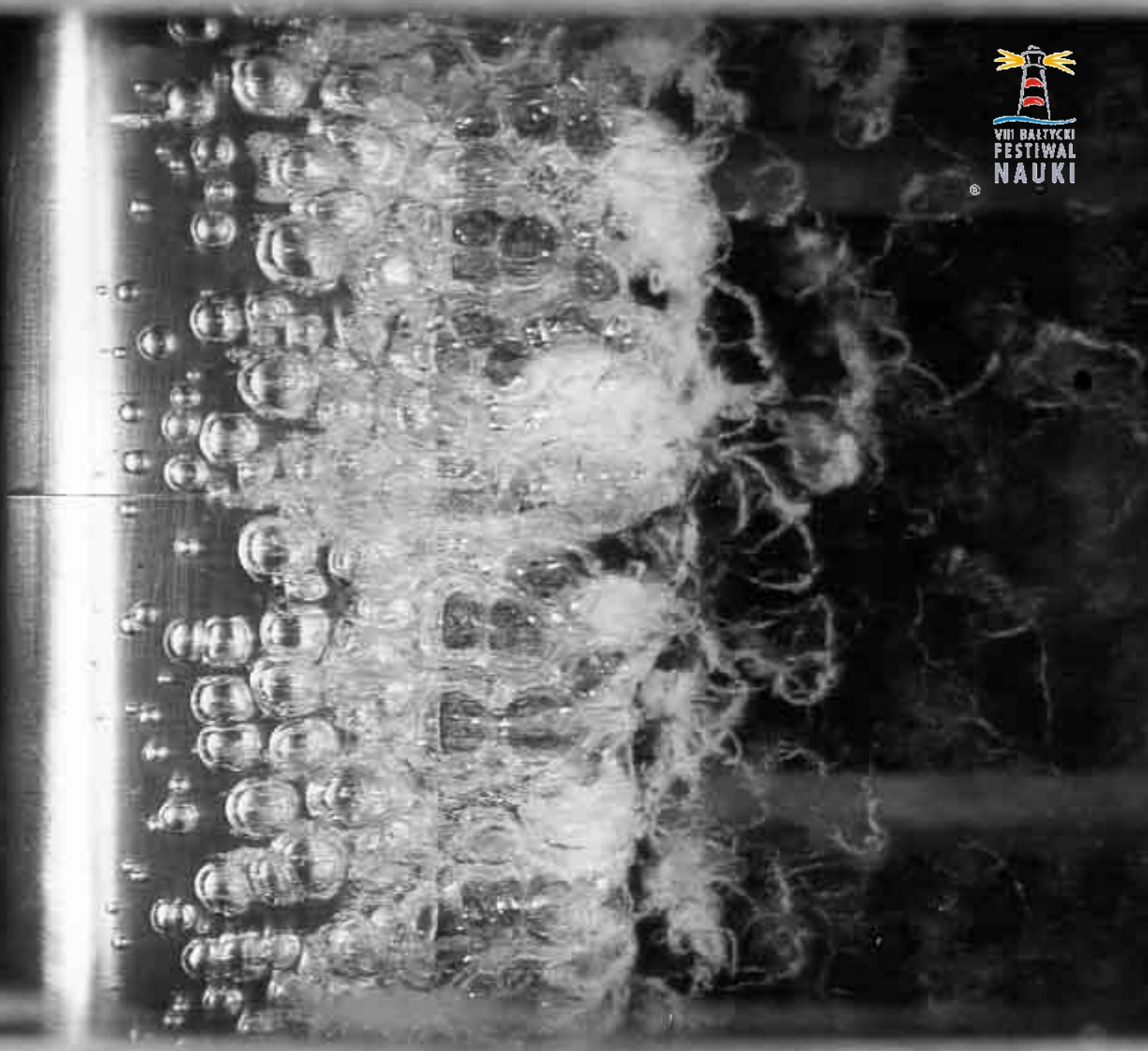


Hermann Föttinger:

$$\sigma_F = \frac{p - p_v}{\rho u^2 / 2}$$

Formy i miejsca występowania

Kawitacja
pęcherzykowa
CalTech, USA



Formy
i miejsca
występowania

Kawitacja
powłokowa
CalTech, USA

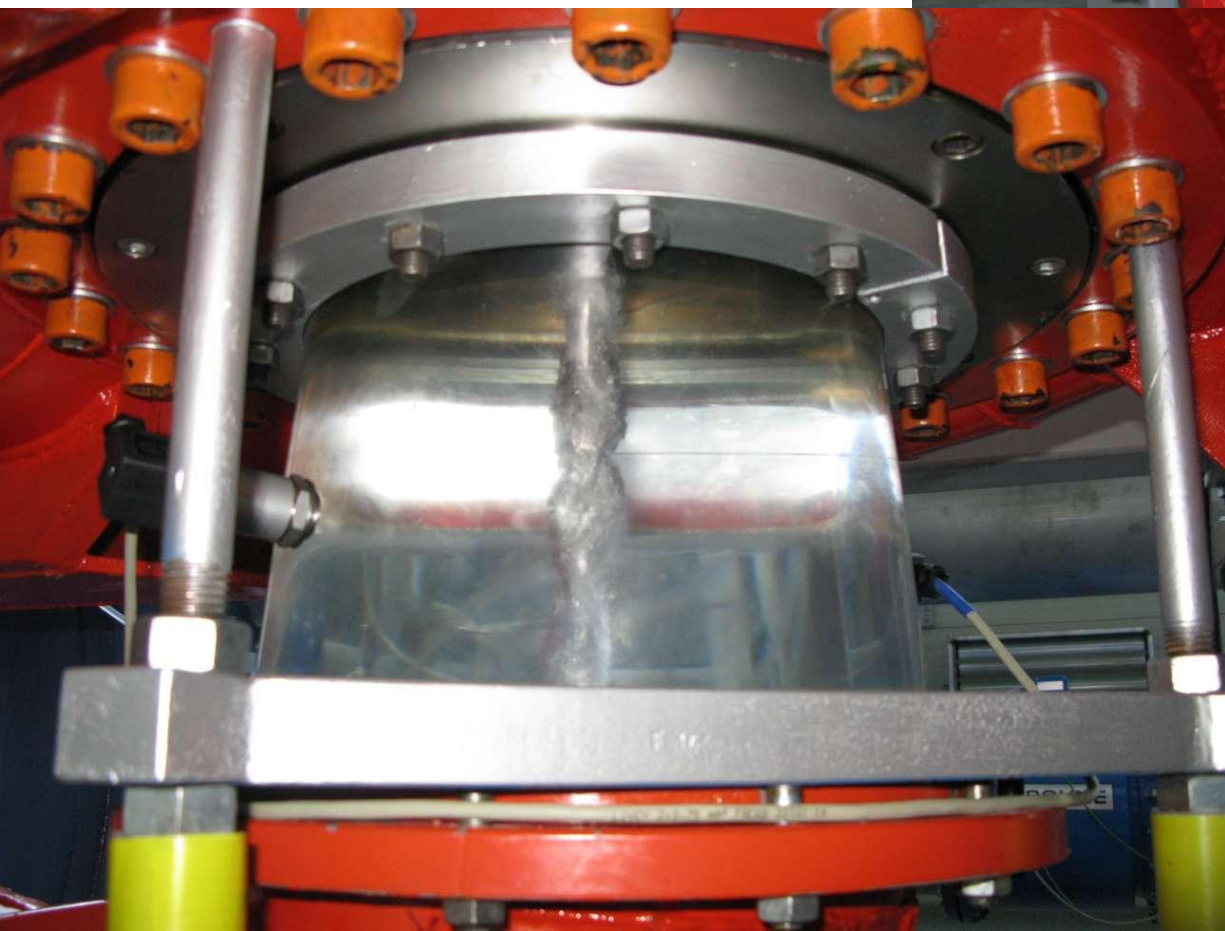
Formy i miejsca występowania kawitacji



Kawitacja wirowa wierzchołkowa i osiowa
National Research Council, Canada

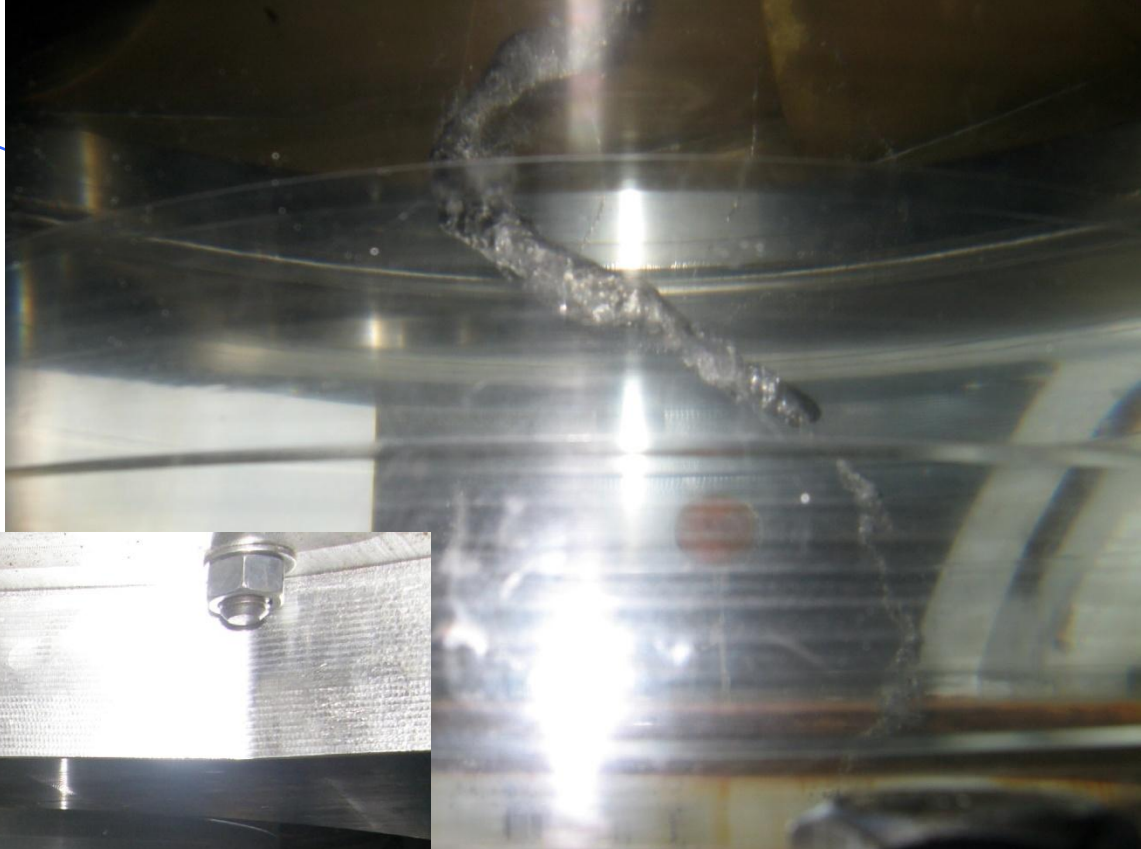
Formy i miejsca występowania kawitacji

Kawitacja wirowa
w rurze ssącej pompoturbiny
z badań modelowych dla ESP Żydowo



Formy i miejsca występowania kawitacji

Kawitacja wirowa
w rurze ssącej pompoturbiny
z badań modelowych
dla EW Żarnowiec

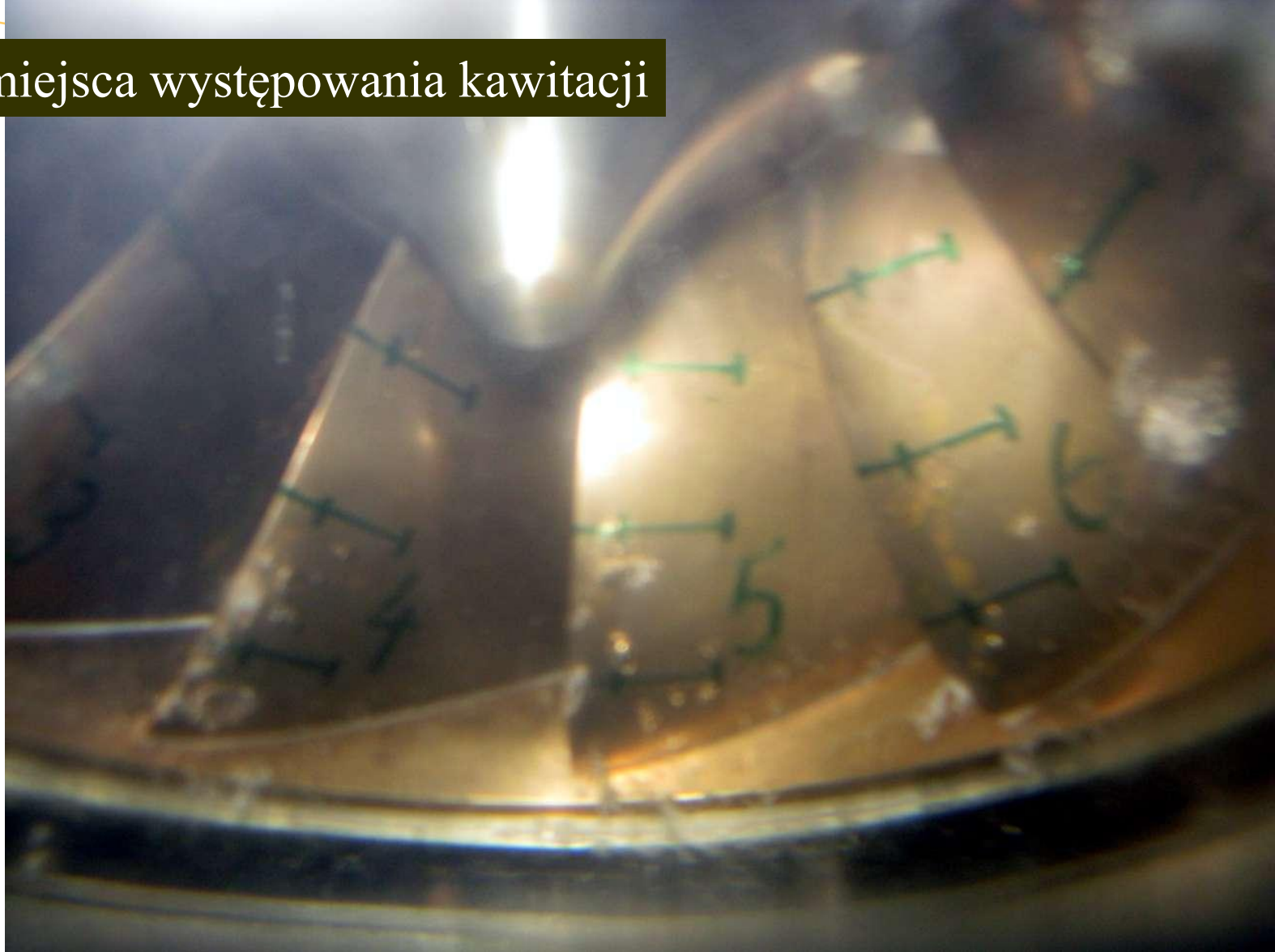


Formy i miejsca występowania kawitacji



Kawitacja na krawędziach natarcia i spoinach łopatek wirnika pompoturbiny w ruchu pompowym
z badań modelowych dla EW Żydowo ($\sigma \ll \sigma_{\text{elektrowni}}$)

Formy i miejsca występowania kawitacji



Kawitacja po stronie ssącej
wirnika pompoturbiny w ruchu turbinowym
z badań modelowych dla EW Żydowo ($\sigma \ll \sigma_{\text{elektrowni}}$)

Formy i miejsca występowania kawitacji



Kawitacja szczelinowa w wirniku turbiny śmigłowej
Laboratorium IMP PAN

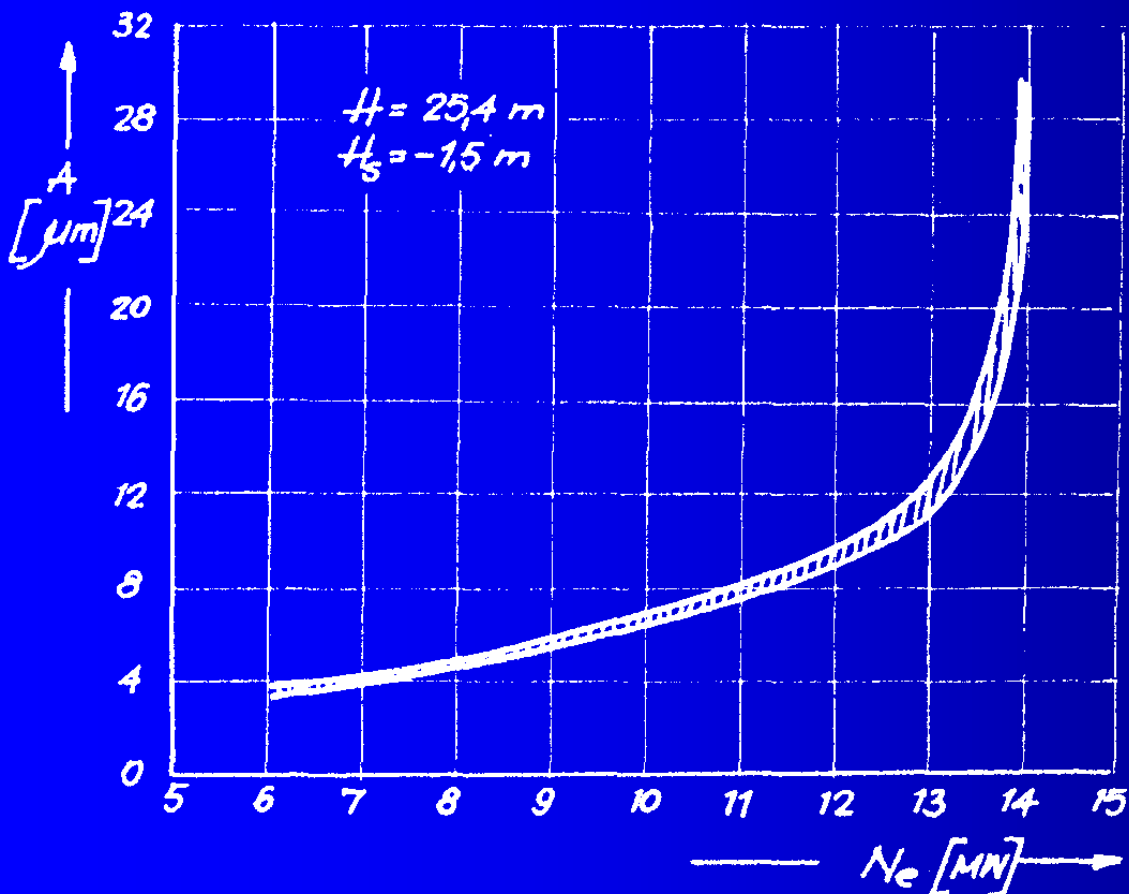
Kawitacja w maszynach i urządzeniach hydraulicznych

niepożądane skutki zjawiska

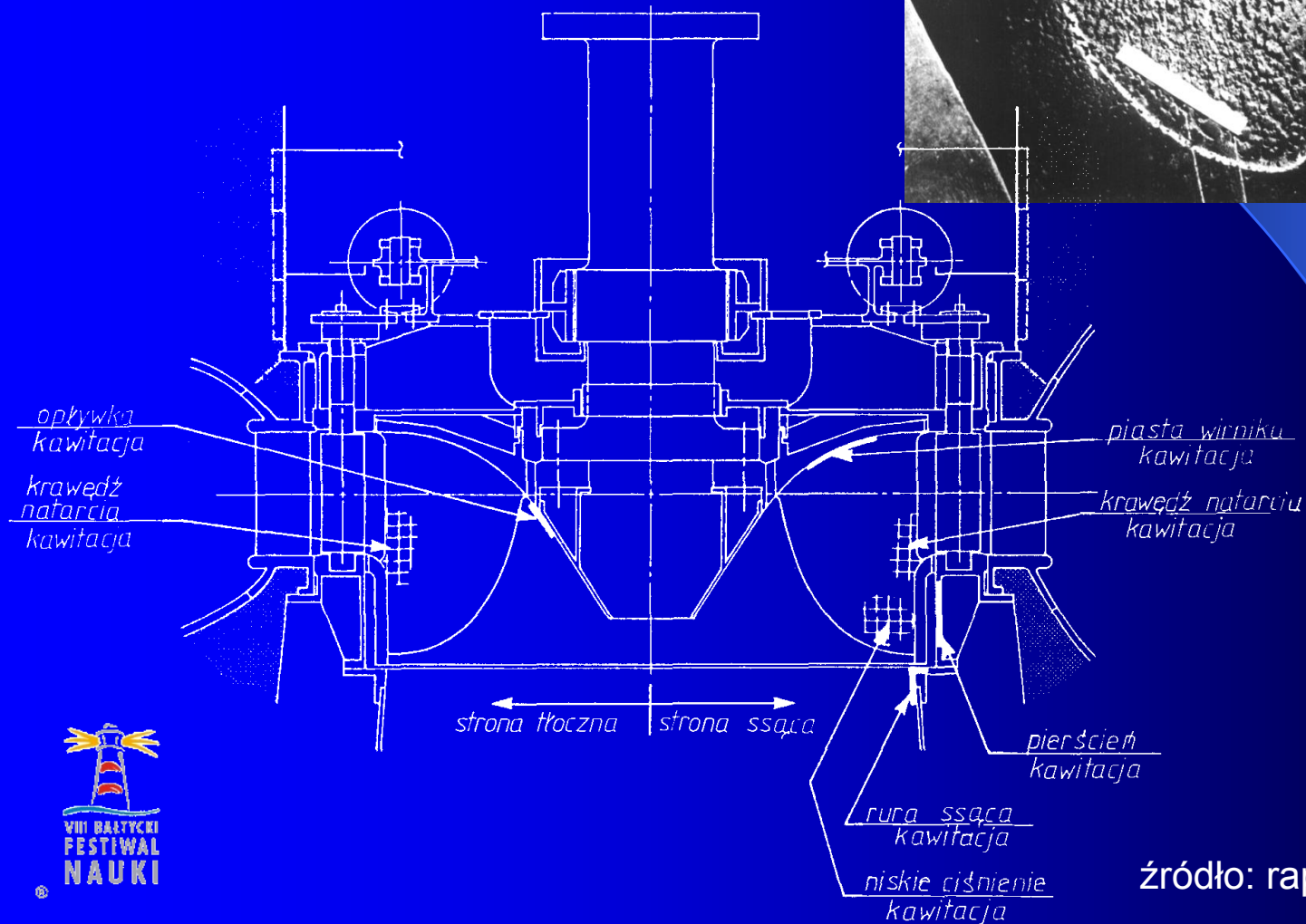
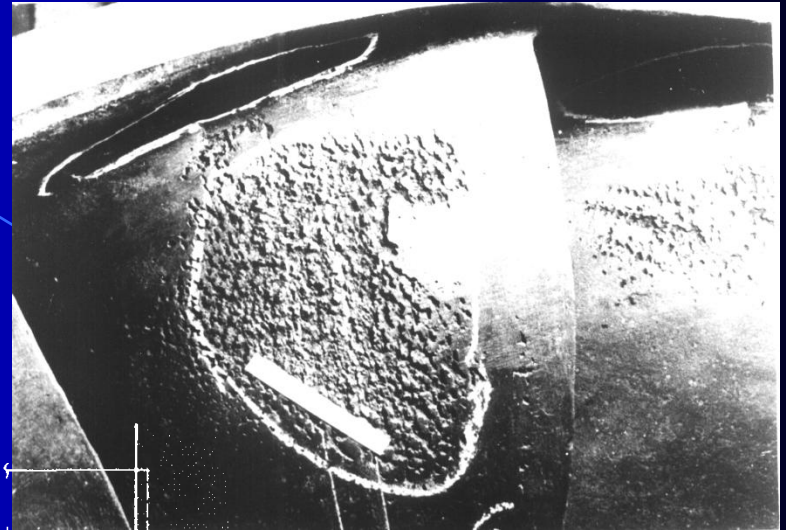
- efekty wibroakustyczne
- erozja kawitacyjna
- pogorszenie własności energetycznych

EW Koronowo

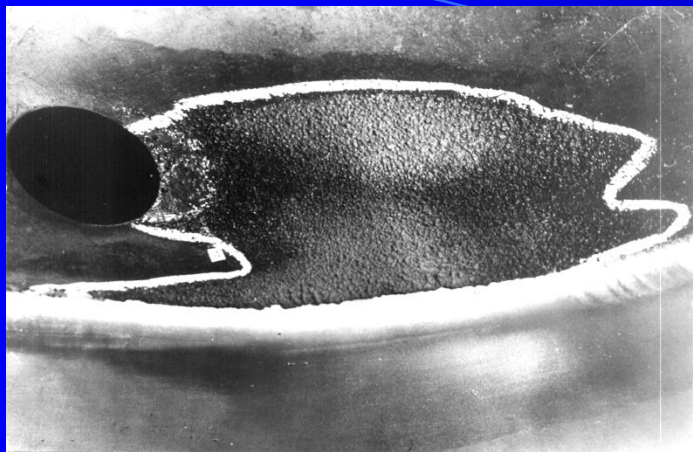
amplituda drgań korpusu turbiny Kaplana
wskutek zjawisk kawitacyjnych



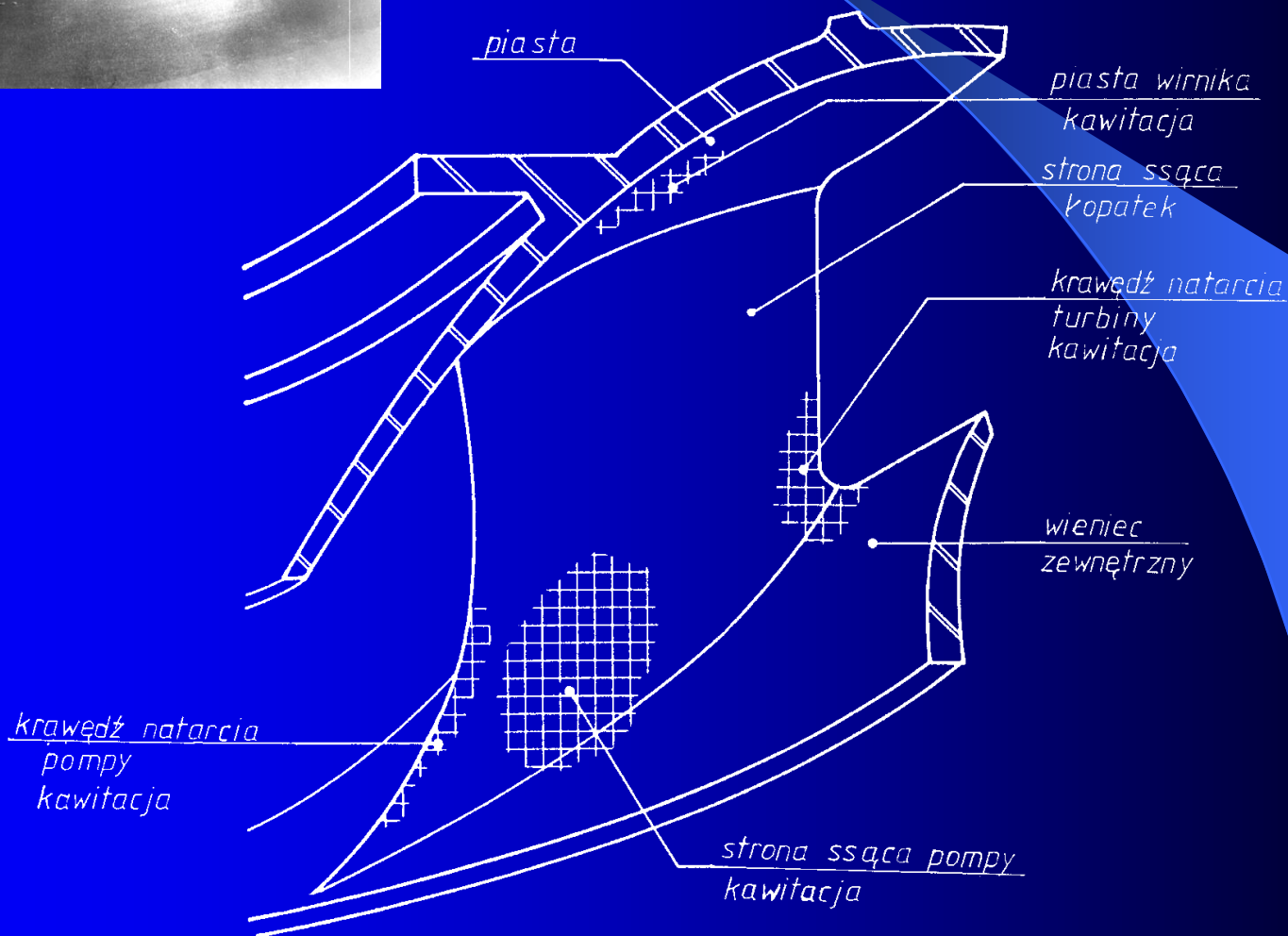
EROZJA KAWITACYJNA w turbinach Francisa



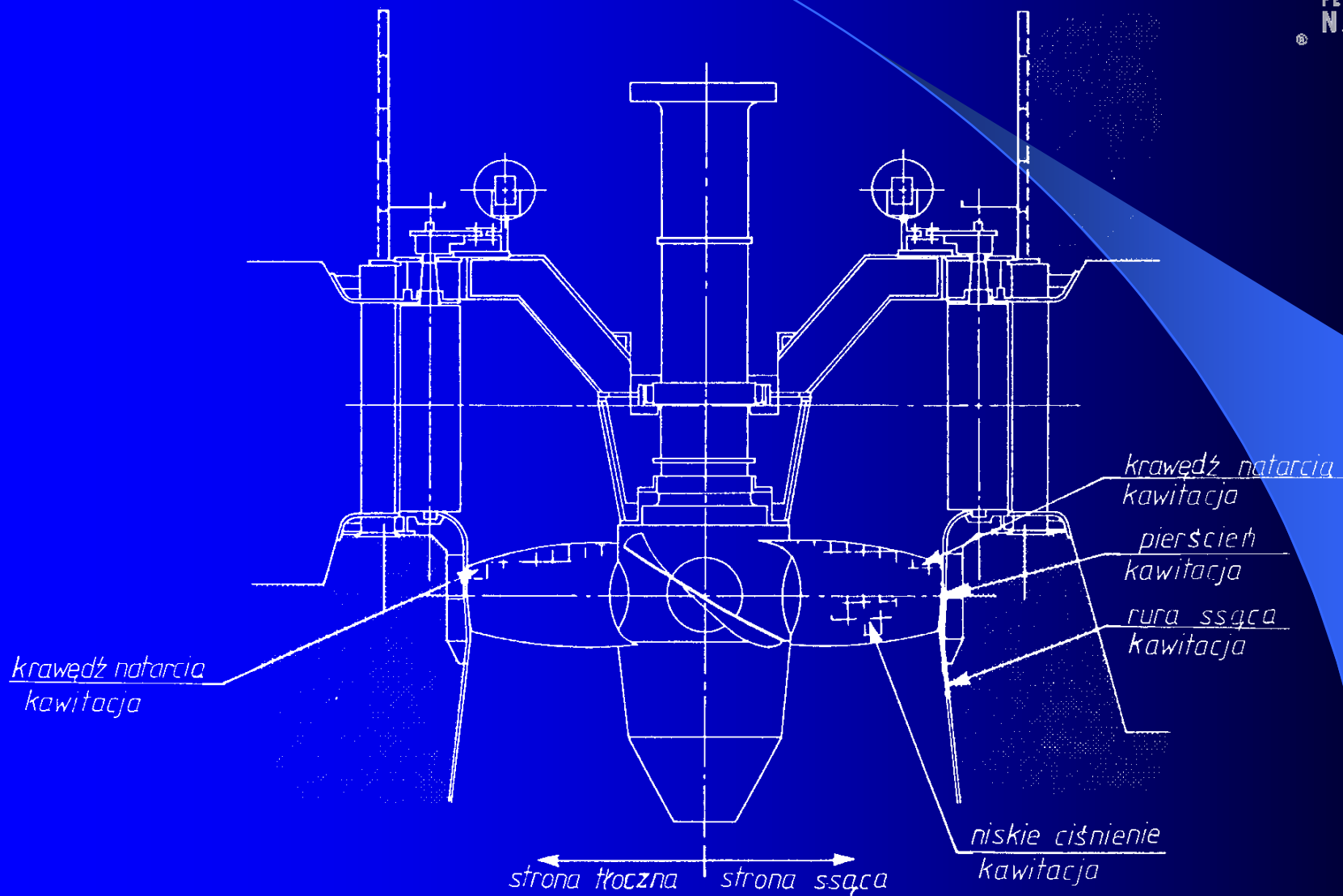
źródło: raport EPRI



EROZJA KAWITACYJNA w maszynach odwracalnych



EROZJA KAWITACYJNA w turbinach Kaplana



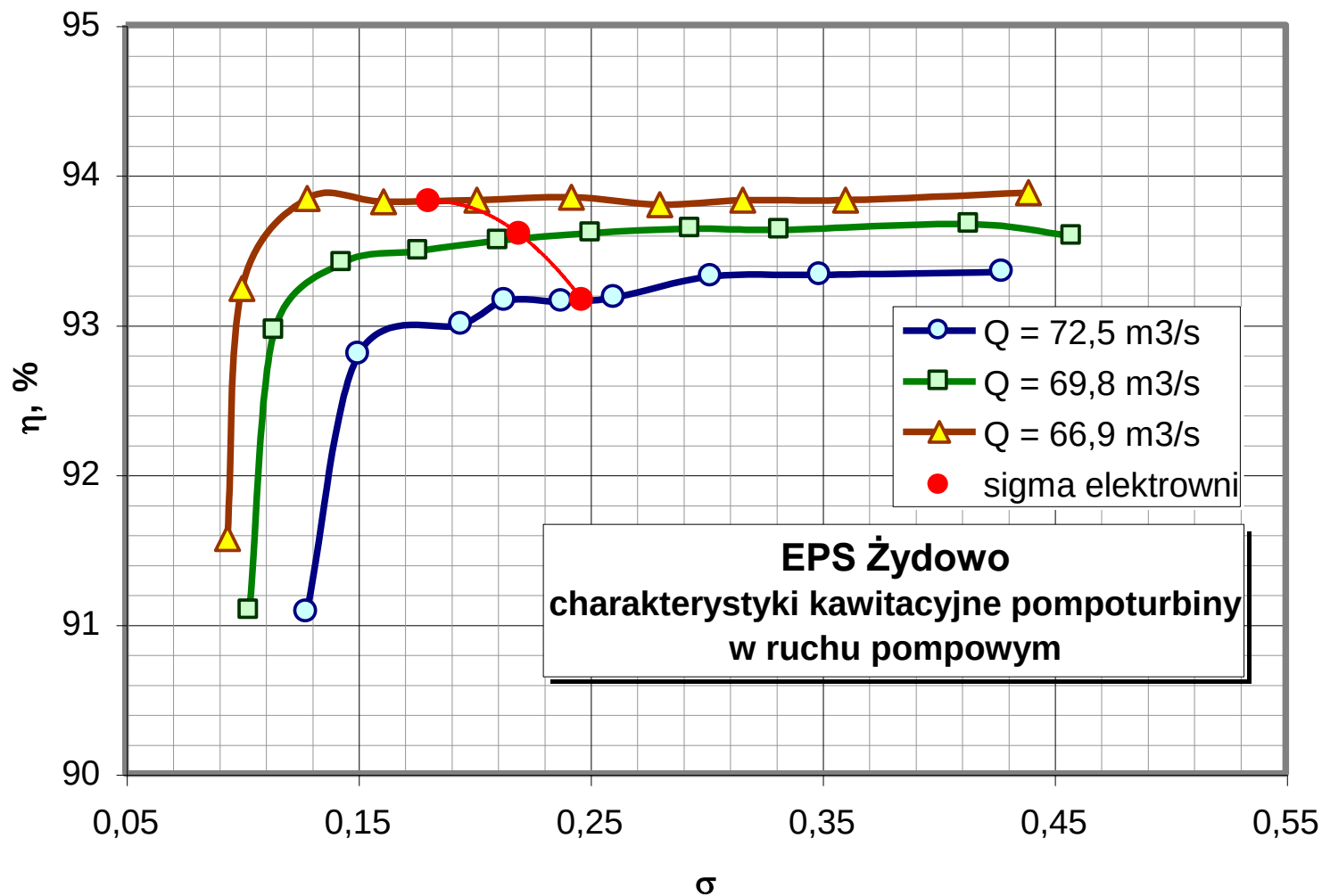
Uszkodzenia kawitacyjne
wirnika turbiny Kaplana

2007 8 9

Uszkodzenia kawitacyjne wirnika turbiny Kaplana



Wpływ kawitacji na sprawność maszyny w ruchu pompowym

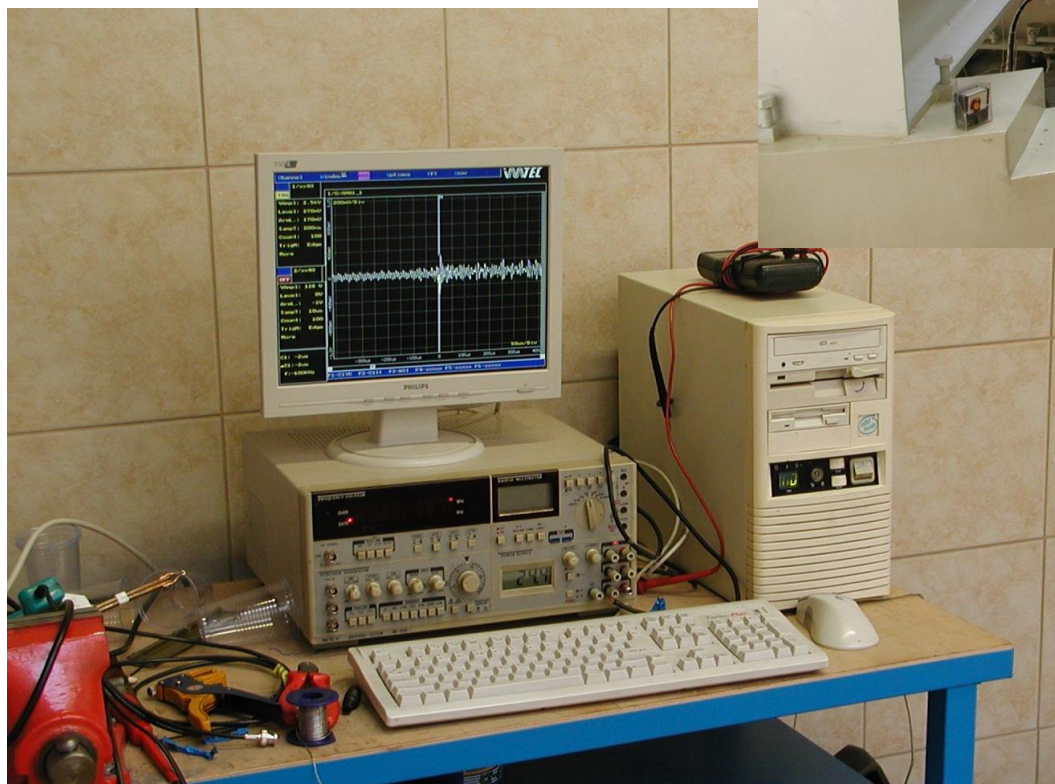


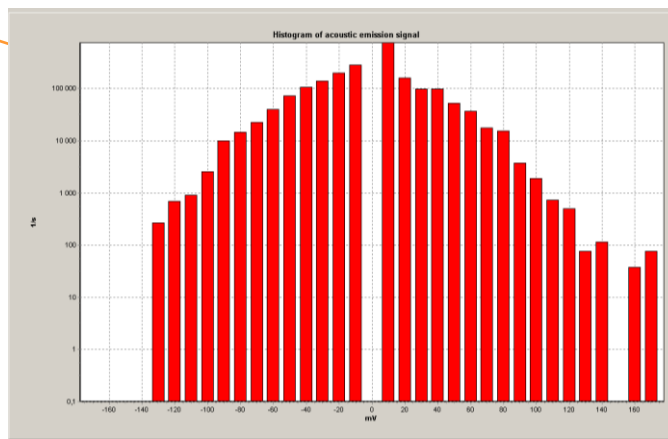
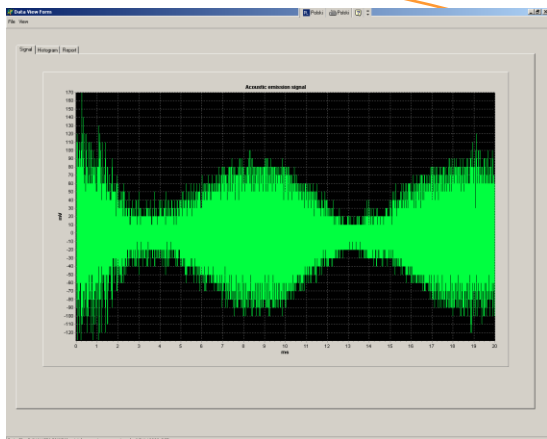
Metody przeciwdziałania kawitacji i jej skutkom



- właściwa konstrukcja układu przepływowego
- dobór materiałów konstrukcyjnych odpornych na kawitację, stosowanie powłok ochronnych, opracowanie właściwej technologii napraw
- dobór odpowiedniego posadowienia maszyny i sposób prowadzenia ruchu
- stosowanie środków specjalnych (napowietrzanie, inhibitory itp.)

Diagnostyka kawitacji pomiarzy hałasu i emisji akustycznej na pokrywie turbiny Kaplana



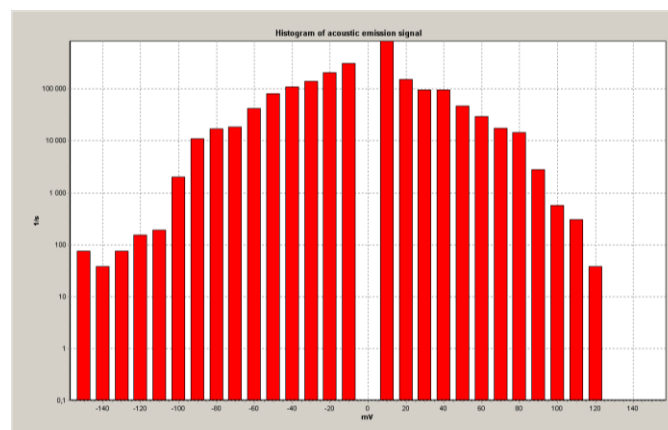
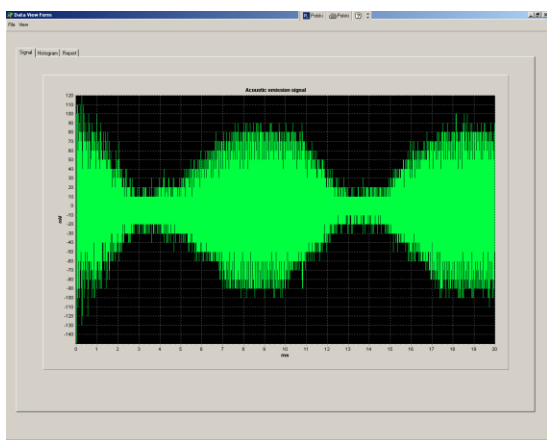


$H = 5,35 \text{ m}$

$H_s = -3,06 \text{ m}$

$\sigma = 2,41$

$\eta = 76,8 \%$

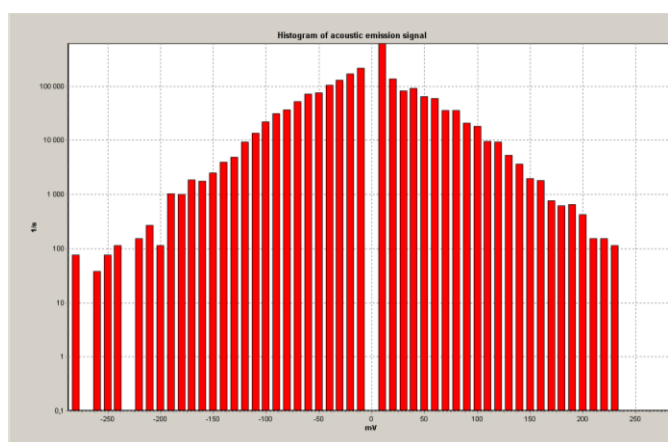
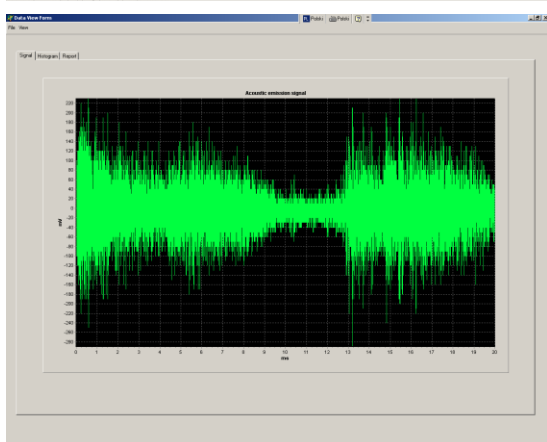


$H = 5,56 \text{ m}$

$H_s = -2,84 \text{ m}$

$\sigma = 2,28$

$\eta = 79,7 \%$



$H = 6,61 \text{ m}$

$H_s = -1,86 \text{ m}$

$\sigma = 1,77$

$\eta = 57,9 \%$

Emisja akustyczna

Badania odporności kawitacyjnej materiałów na stanowisku z wirującą tarczą



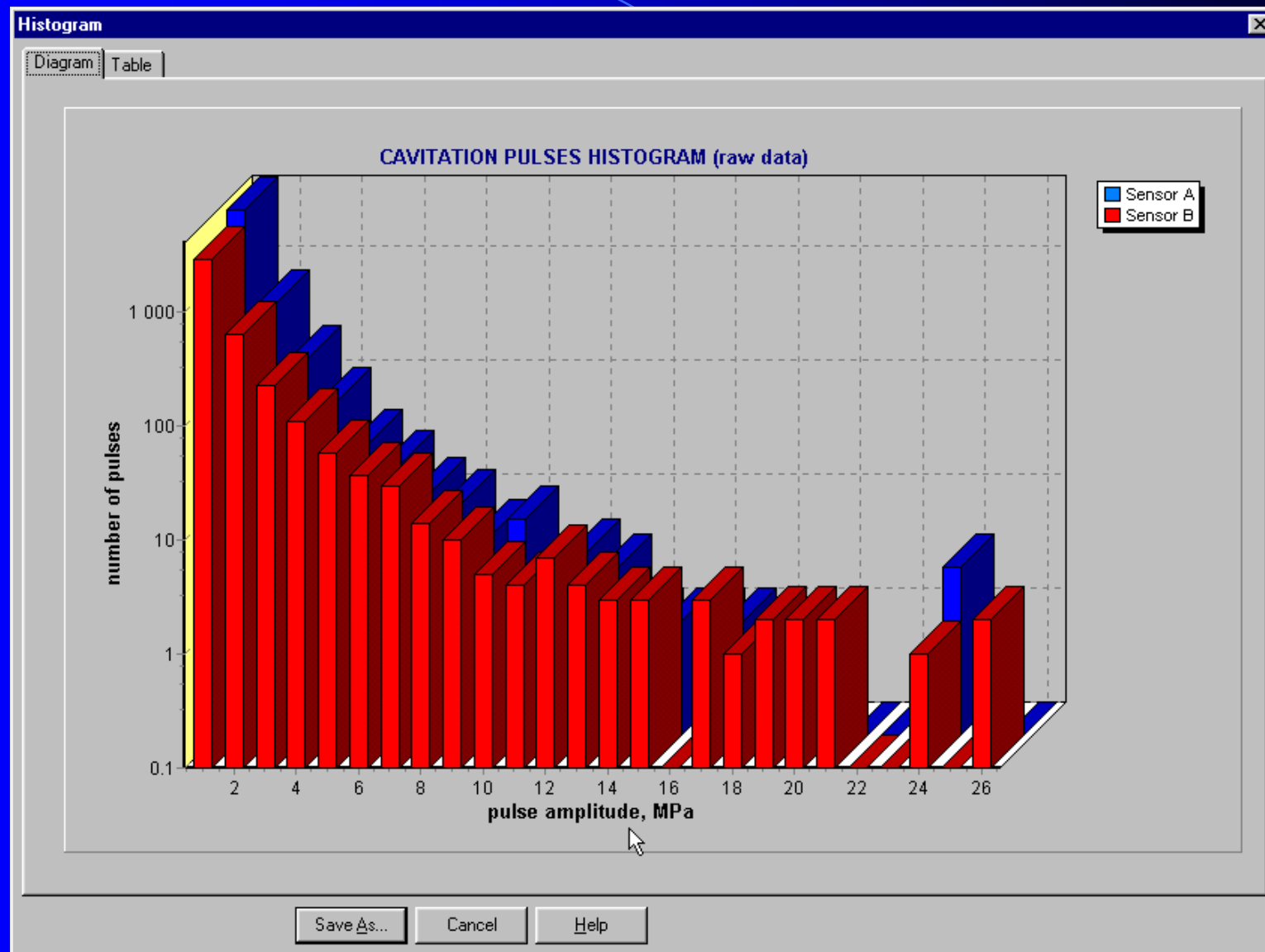


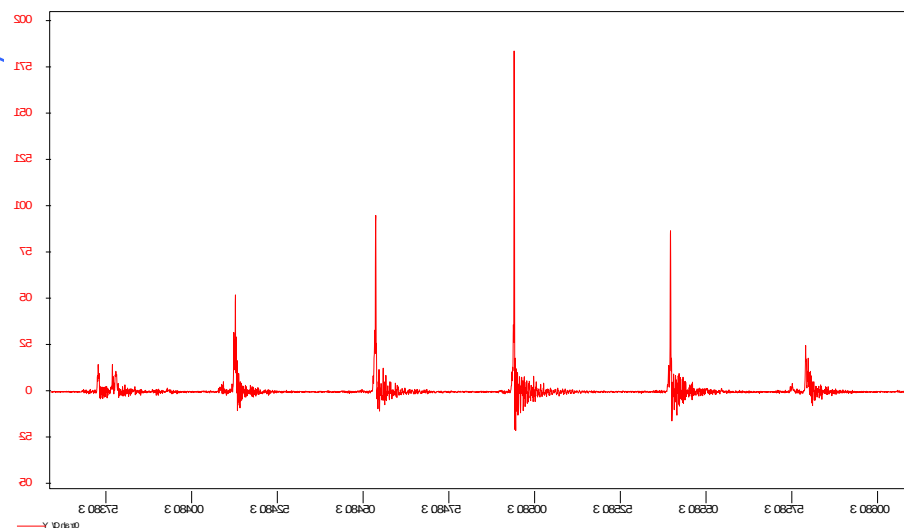
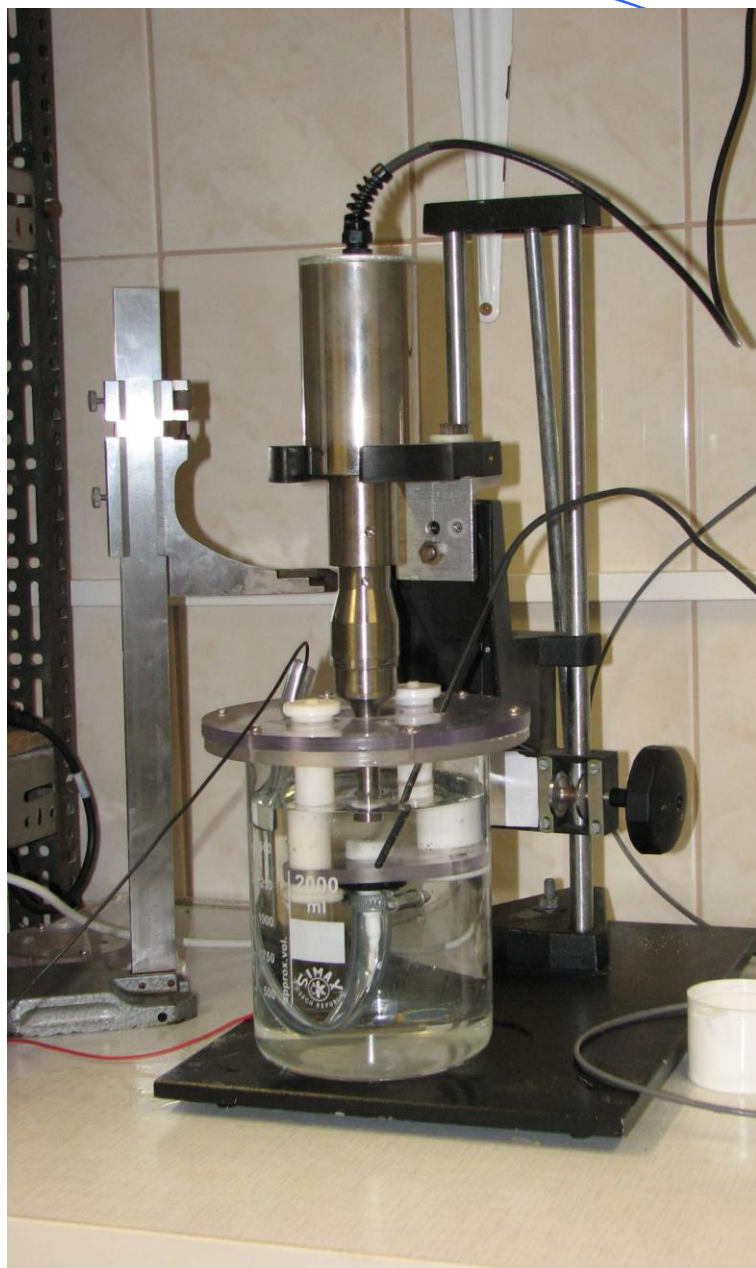
Tunel z szczelinowym generatorem kawitacji
Badania związku erozji z rozkładem impulsów kawitacyjnych

Tunel z szczelinowym generatorem kawitacji zarejestrowane impulsy kawitacyjne

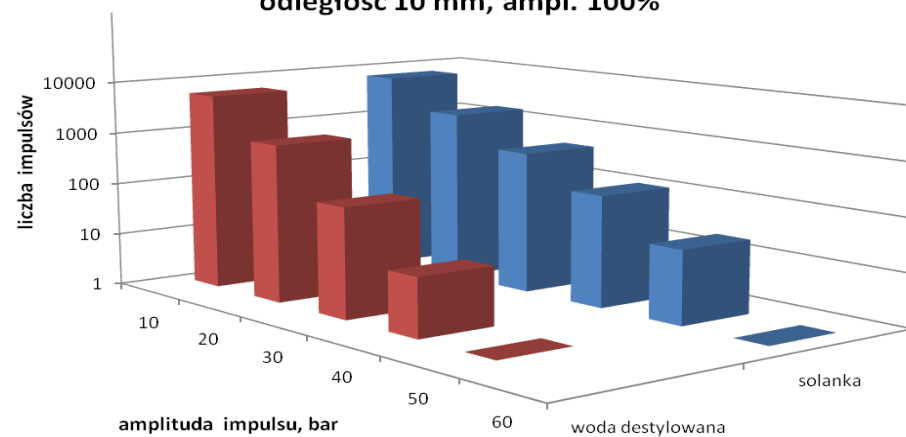


Tunel z szczelinowym generatorem kawitacji histogramy impulsów kawitacyjnych





odległość 10 mm, ampl. 100%



**Badania na stanowisku wibracyjnym
(AM Szczecin) - przykładowe wyniki**

Zakończenie

- Mimo olbrzymiego postępu dotyczącego wiedzy o kawitacji, pozostaje ona wciąż zjawiskiem intrygującym dla badacza i wymagającym należytej uwagi ze strony konstruktora i użytkownika maszyn hydraulicznych
- Kawitacja jest obecna nie tylko w maszynach i urządzeniach hydraulicznych, ale także w wielu organizmach żywych.
- Ostatnio odkryta możliwość wykorzystania zjawiska do produkcji energii cieplnej stawia kolejne intrygujące pytania dotyczące jej niektórych mechanizmów

Dziękuję za uwagę