

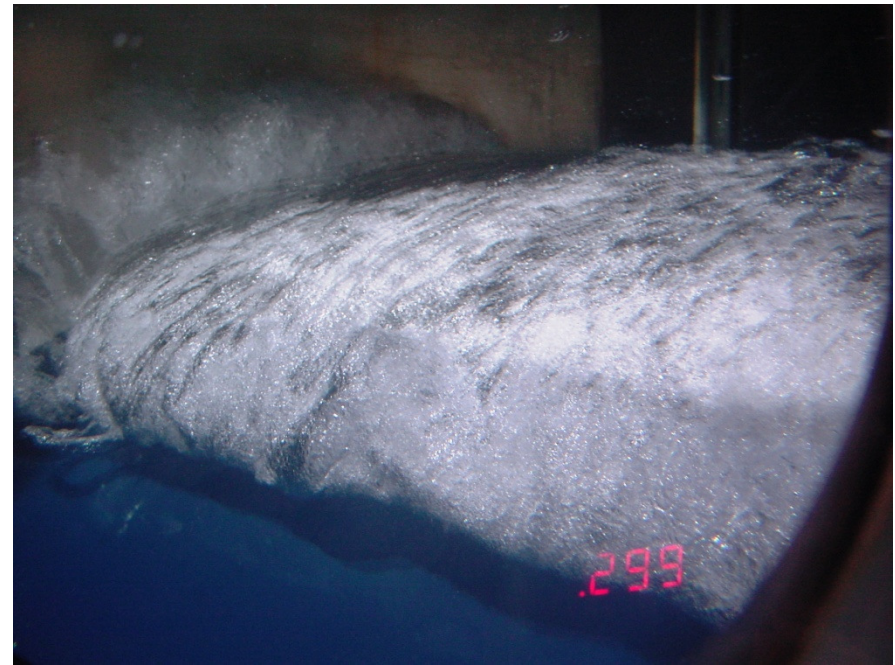
J. Szantyr - Wykład 22A – Podstawy teoretyczne kawitacji

Definicja kawitacji

Kawitacja jest to zjawisko powstawania, dynamicznego rozwoju i zaniku pęcherzy parowo-gazowych w cieczech, wywołane lokalnymi zmianami ciśnienia przy stałej temperaturze.

O przebiegu zjawiska decydują:

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



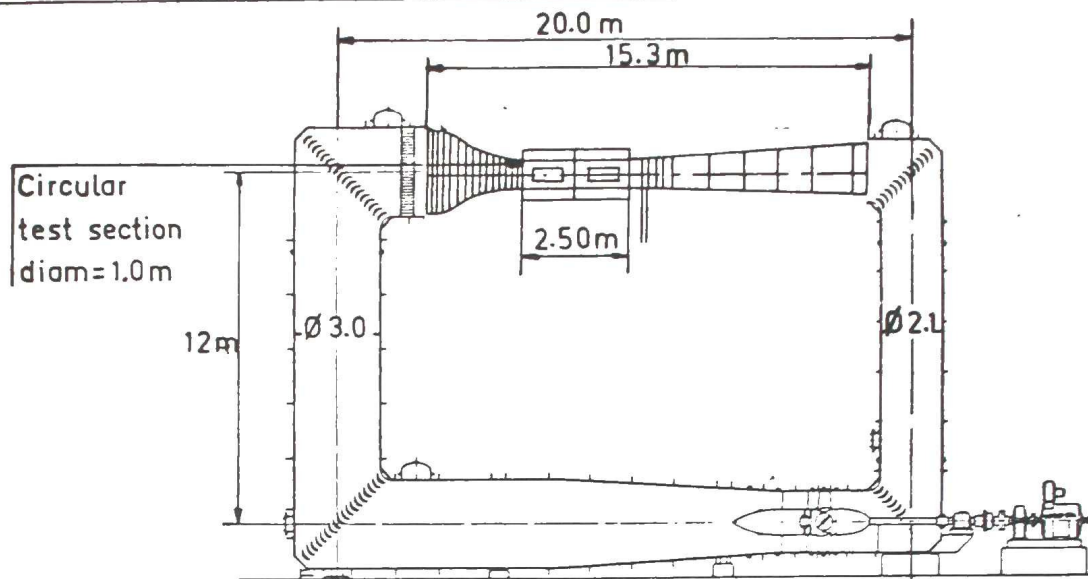
Występowanie kawitacji:

- **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.**

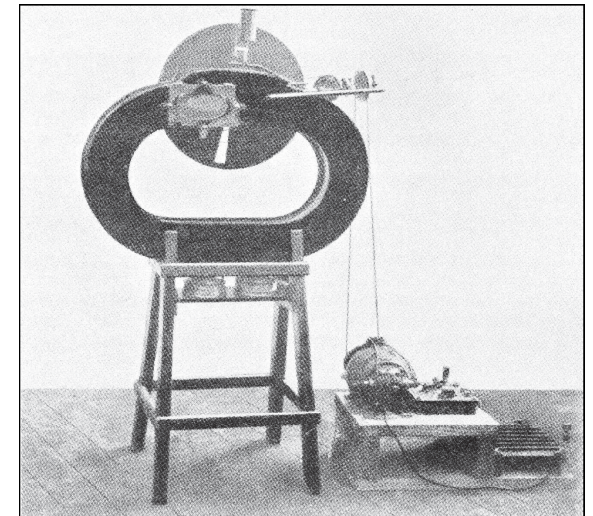
Do badań eksperymentalnych kawitacji służą tunele kawitacyjne. Są to zamknięte kanały wodne, w których można wywoływać przepływy o znacznej prędkości i obniżać ciśnienie statyczne przy pomocy pomp próżniowych. W przestrzeni pomiarowej tunelu można umieszczać rozmaite badane obiekty i systemy pomiarowe.

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

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: $\sigma > 0.1$



Pierwszy tunel kawitacyjny
zbudowany przez Parsonsa 1895



Charles Parsons
1854 - 1931

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

Im niższa liczba kawitacyjna, tym większe zagrożenie kawitacją i bardziej intensywne zjawiska kawitacyjne

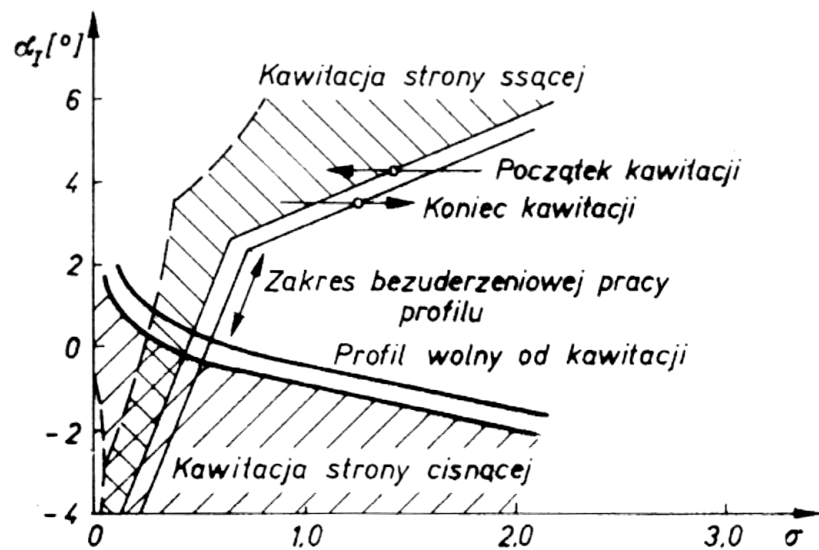
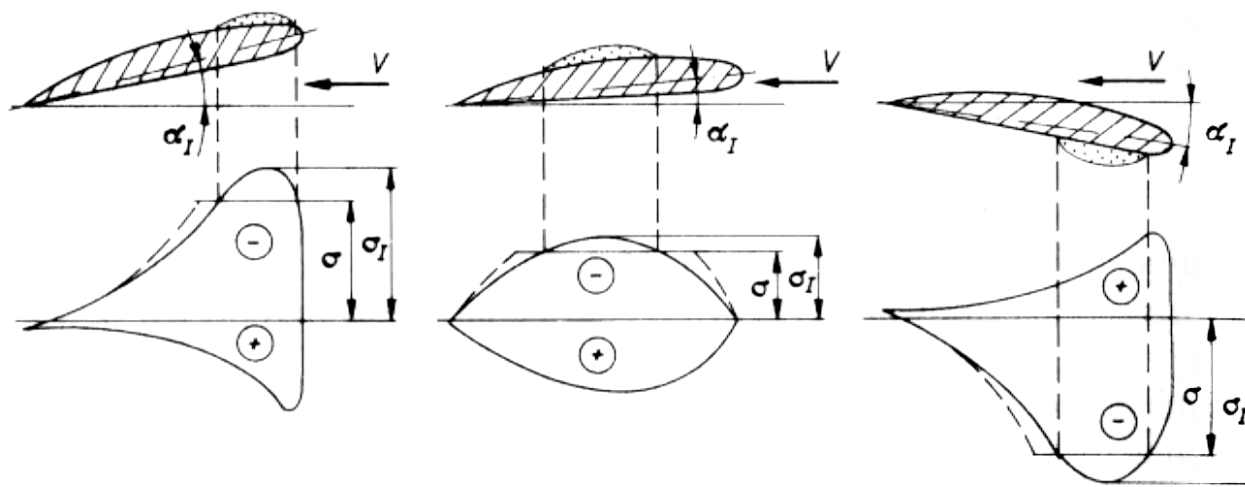
Uproszczony warunek zapoczątkowania kawitacji ma postać:

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

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

Rozwój kawitacji na płacie pionowym



Rozwój kawitacji na płacie poziomym



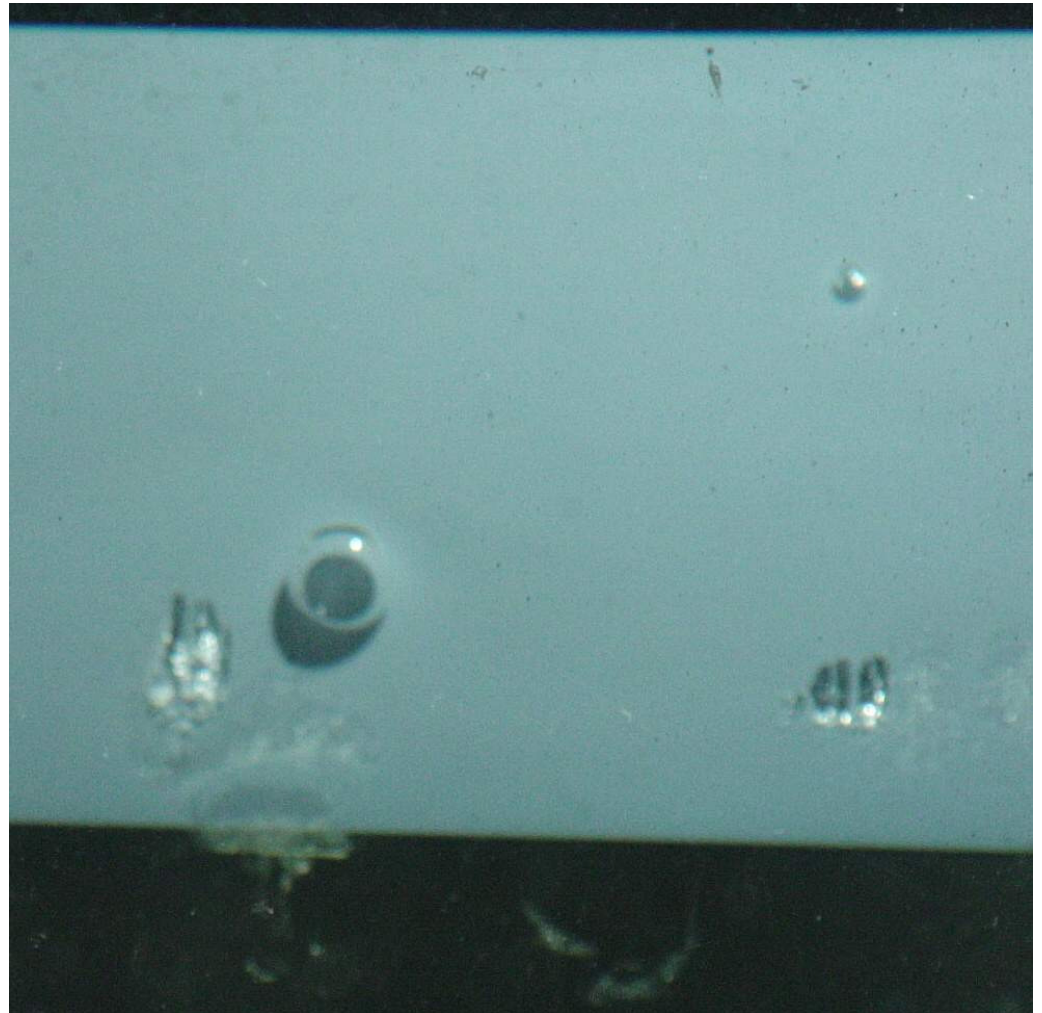
Zapoczątkowanie kawitacji

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

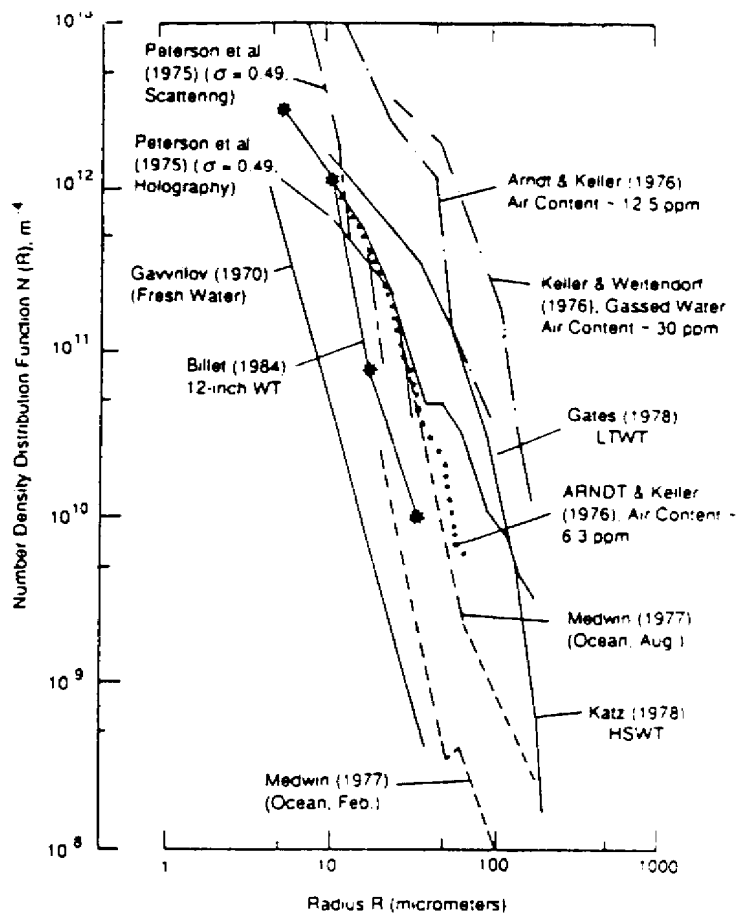
Warunek równowagi:

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

A – napięcie powierzchniowe

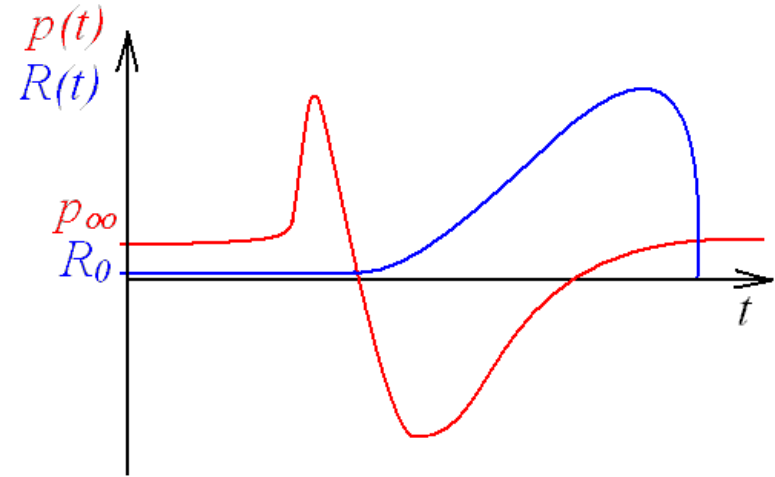
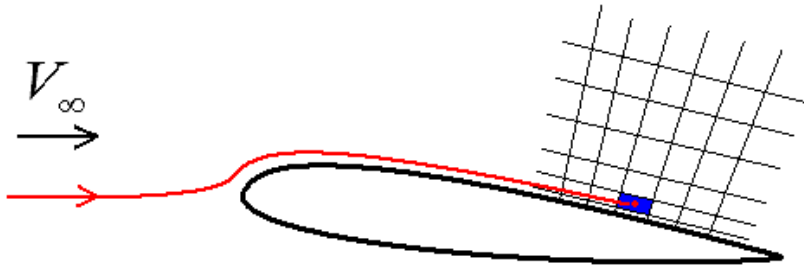


Rozkład mikropęcherzyków w wodzie



Gdyby ciecze występujące w przyrodzie i technice były idealnie jednorodne, tzn. nie zawierałyby mikropęcherzyków gazowych i wtrąceń ciał stałych, kavitacja w ogóle nie występowałaby w maszynach przepływowych ze względu na znaczną wytrzymałość jednorodnych cieczy na naprężenia rozciągające.

Historia rozwoju i zaniku pęcherzyka kawitacyjnego



Równanie Rayleigha-Plesseta

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

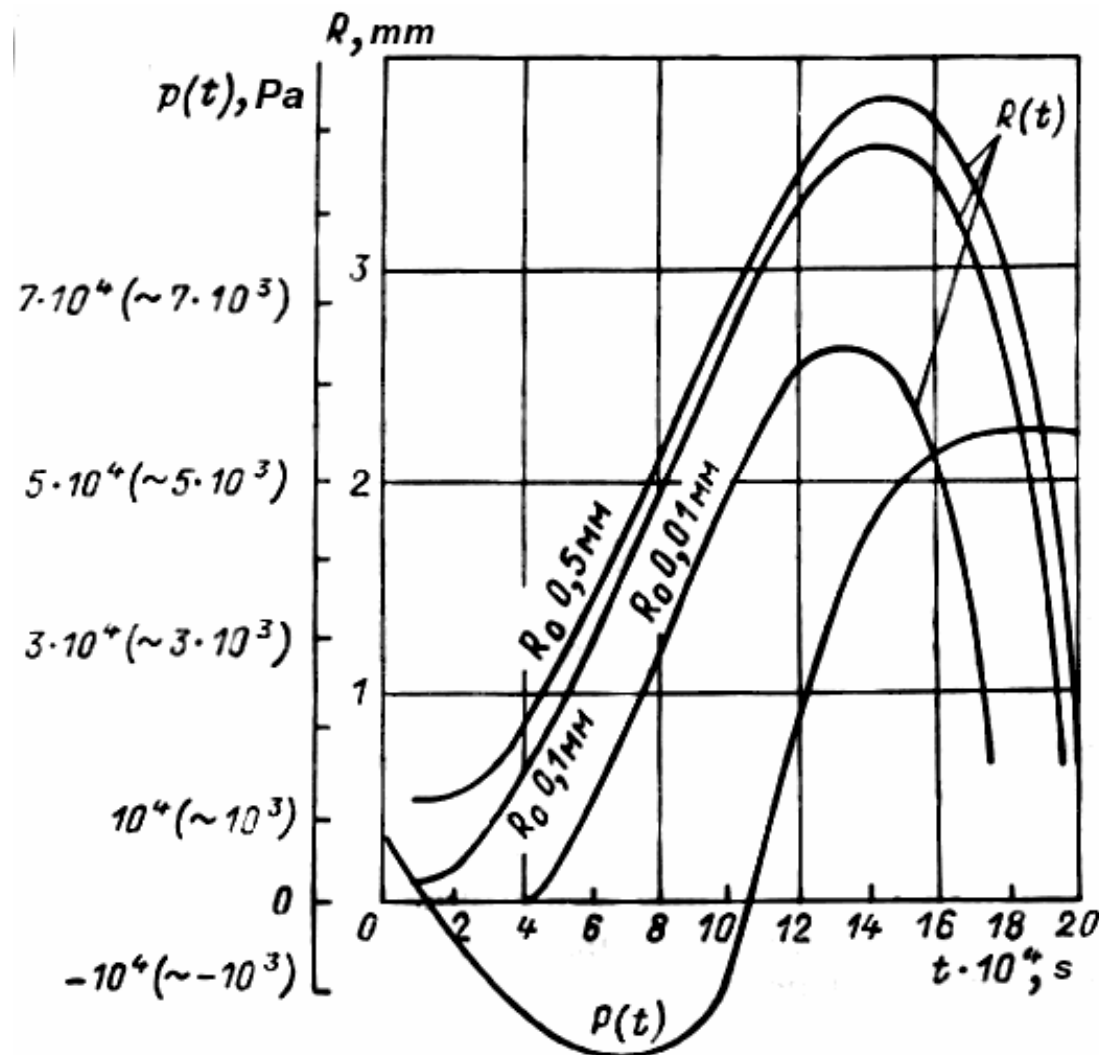
R – promień pęcherzyka

A – napięcie powierzchniowe cieczy

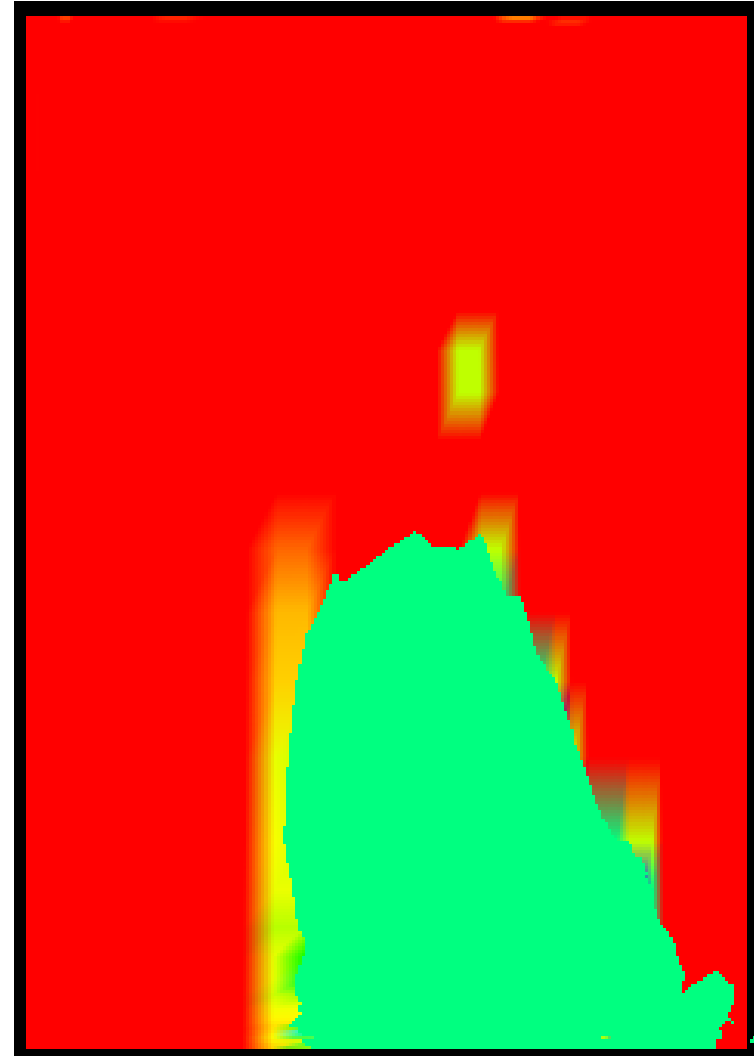
John Strutt
lord Rayleigh
1842 - 1919



Historia rozwoju i zaniku pęcherzyków kawitacyjnych o różnych promieniach początkowych

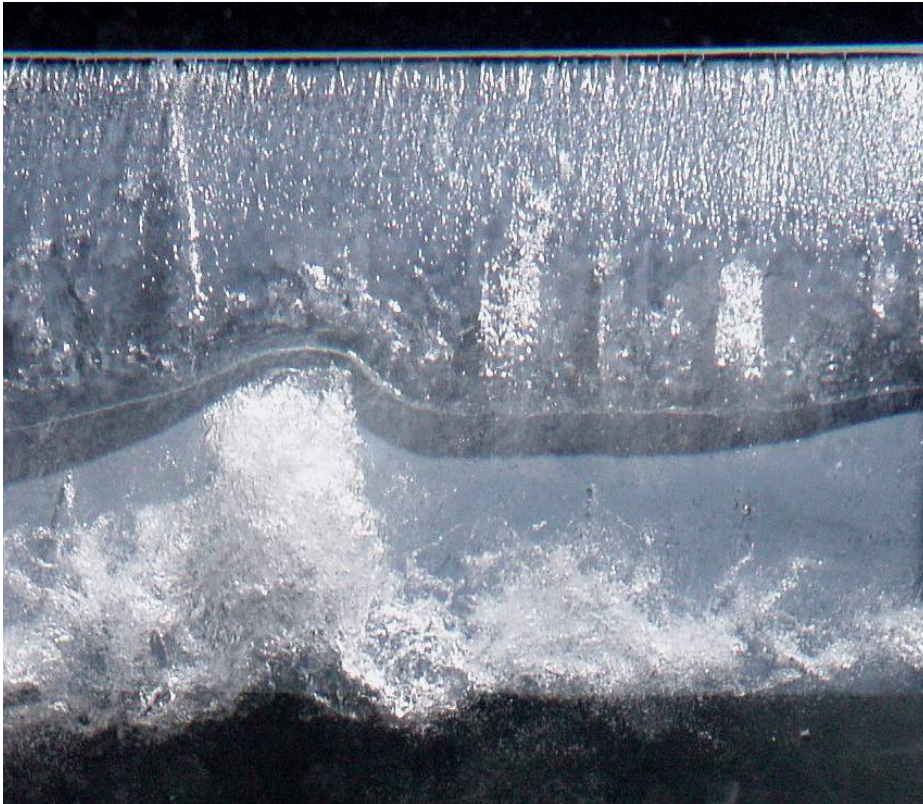


Porównanie obliczonego i zmierzonego zakresu kawitacji

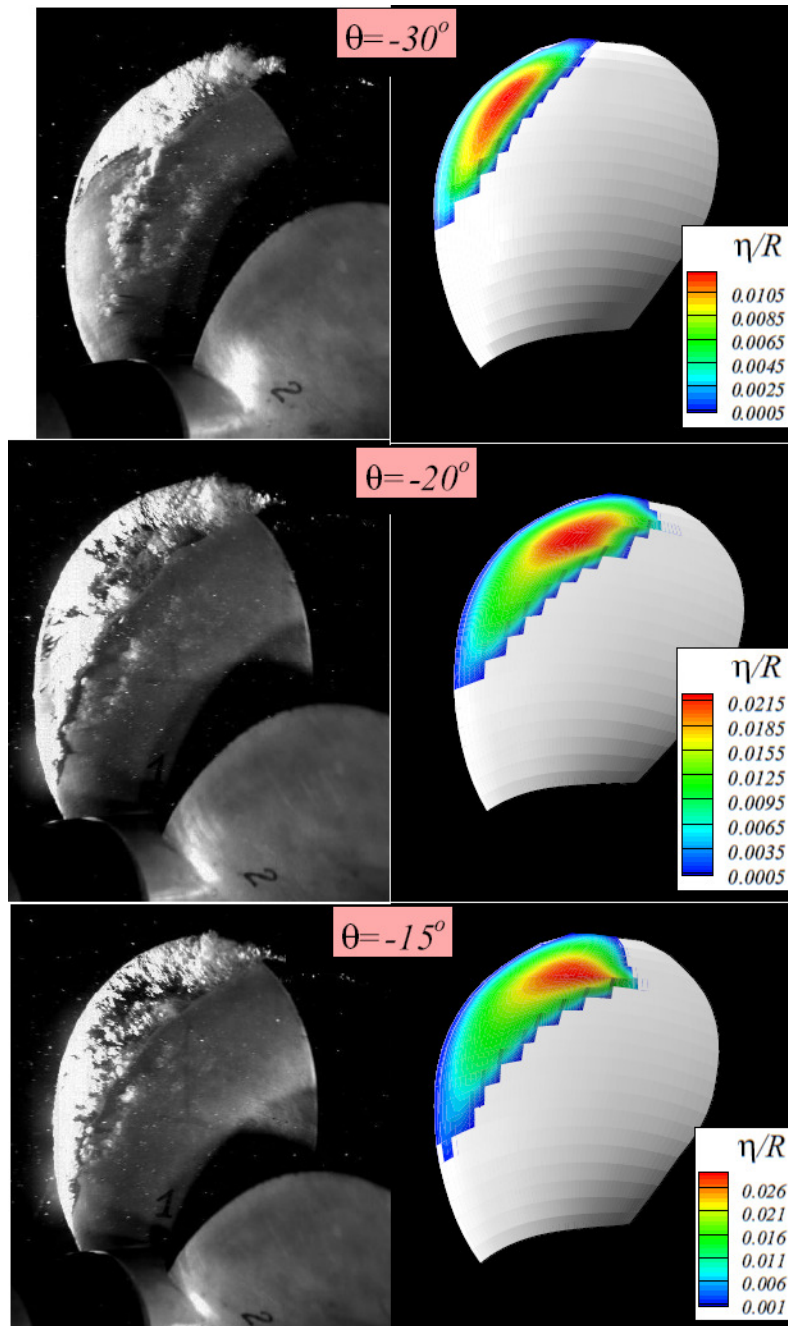


Formy kawitacji

Kawitacja laminarna



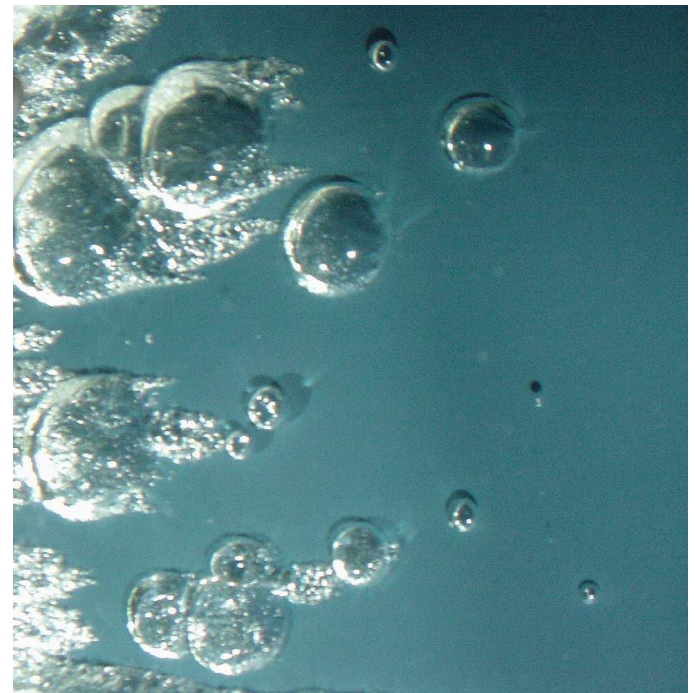
Powstanie kawitacji laminarnej wymaga dużych naprężeń rozciągających (czyli głębokiego obniżenia ciśnienia), działających dostatecznie długo, aby wywołać wzrost znacznej liczby pęcherzyków, które następnie tworzą duży pęcherz laminarny



Obliczeniowe wyznaczenie kawitacji laminarnej jest stosunkowo łatwe – obok przykład porównania obserwacji i obliczeń kawitacji laminarnej na skrzydle śruby okrętowej metodą elementów brzegowych

Formy kawitacji

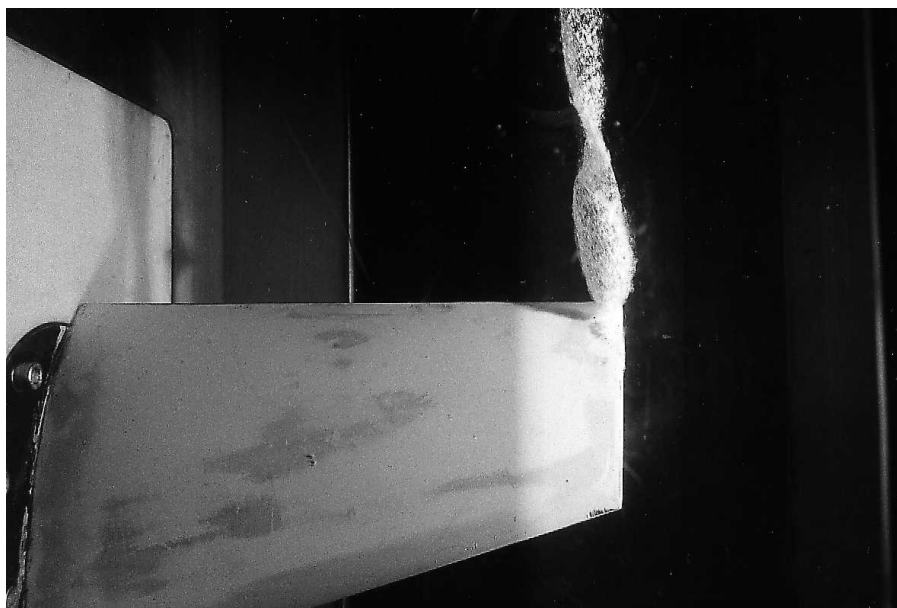
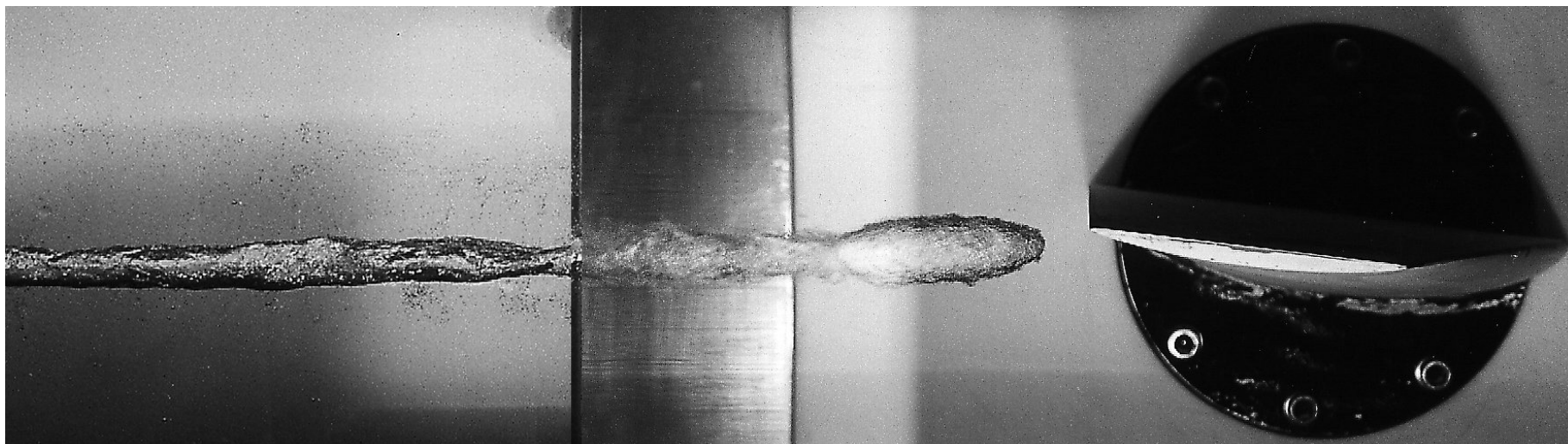
Kawitacja pęcherzykowa



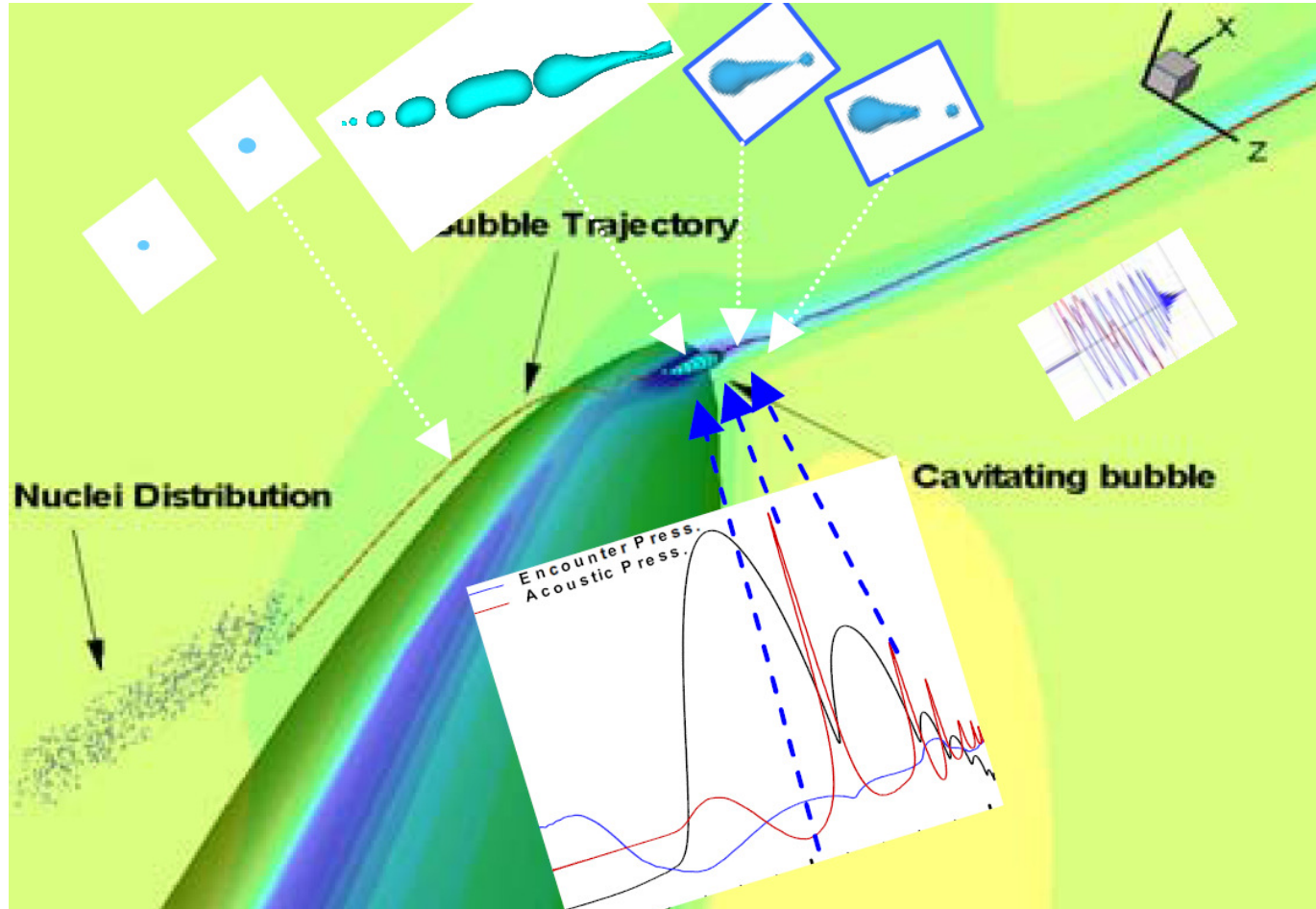
Kawitacja pęcherzykowa powstaje przy stosunkowo niskich naprężeniach rozciągających (czyli płytkich podciśnieniach), które powodują wzrost tylko względnie dużych mikropęcherzyków. Tych dużych mikropęcherzyków jest zbyt mało aby utworzyć duży pęcherz laminarny.

Formy kawitacji

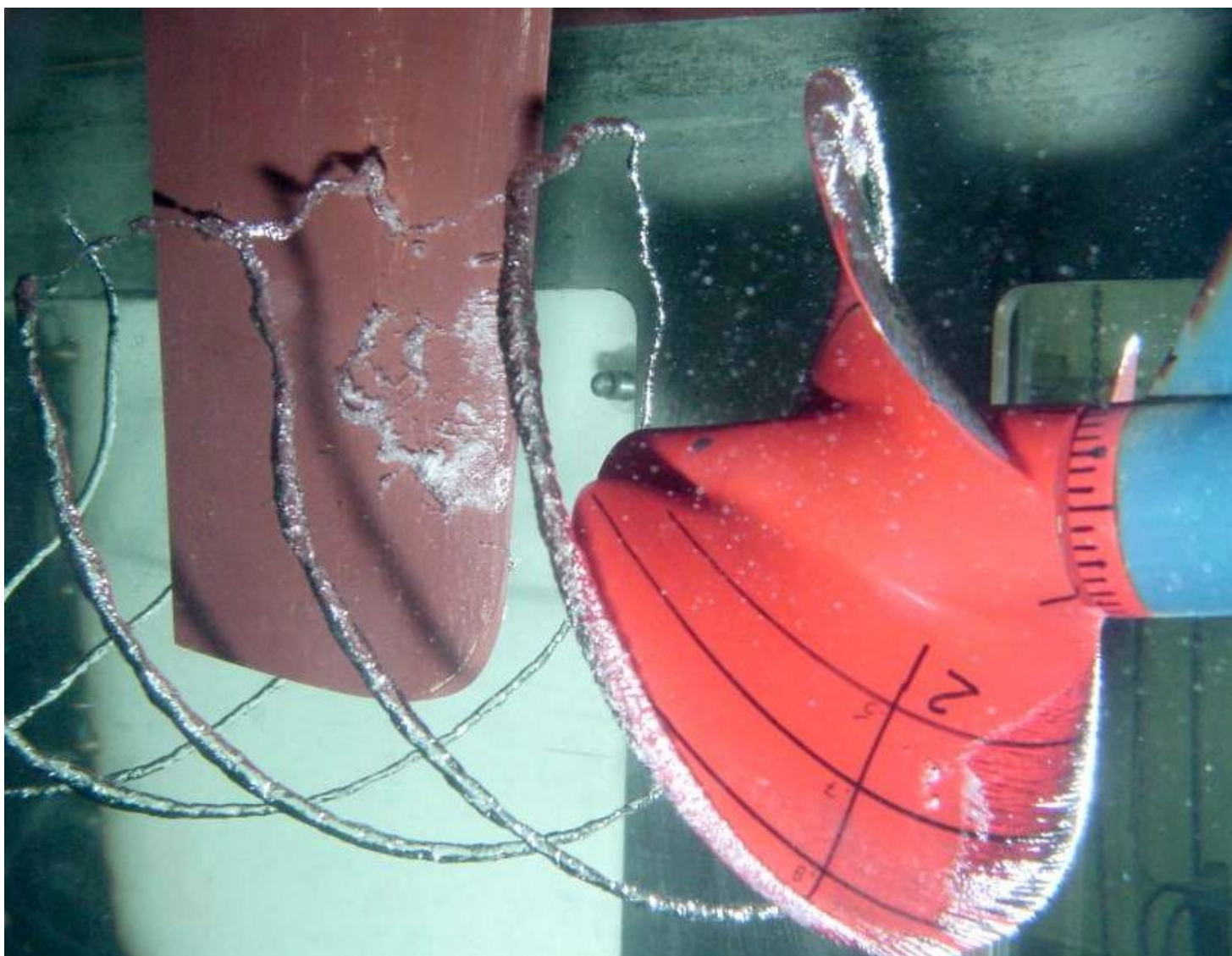
Kawitacja wirowa



Mechanizm powstawania kawitacji wirowej



Kawitacja wirowa powstaje, gdy mikropęcherzyki trafią w obszar silnie obniżonego ciśnienia w centrum wiru generowanego za wierzchołkiem płata nośnego. Pęcherzyki te doznają wzrostu i łączą się następnie w jeden długi wir – kawitujące jądro wiru wierzchołkowego.



Kawitujący wir wierzchołkowy zdeformowany przez oddziaływanie steru

Formy przejściowe kawitacji

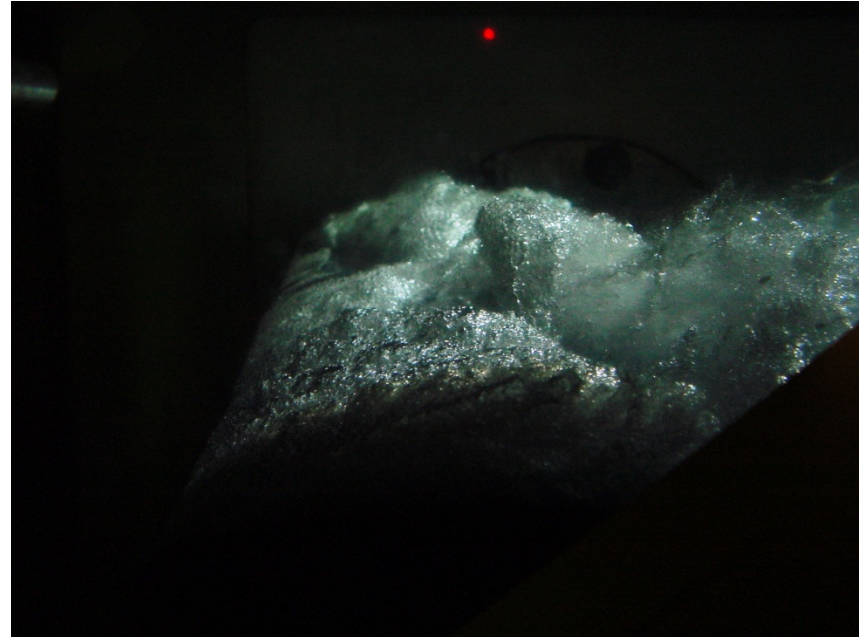
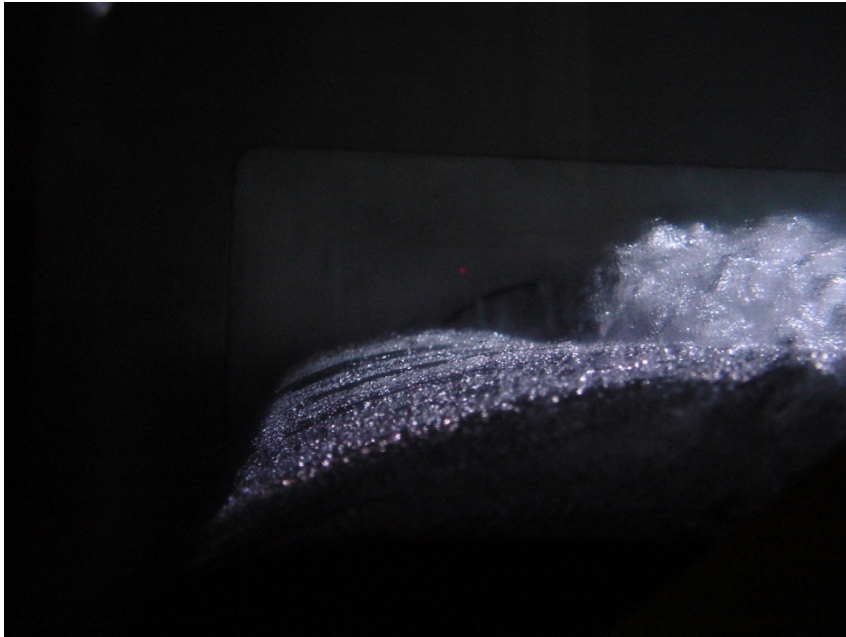
Kawitacja chmurzasta



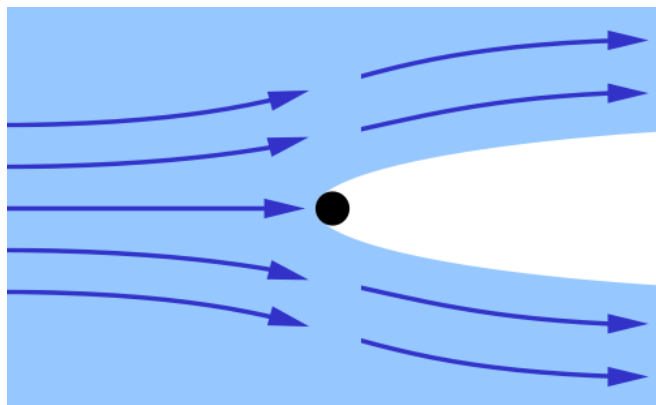
Niestacjonarny charakter kawitacji laminarnej powoduje odrywanie się tylnych części pęcherza laminarnego, które następnie pod wpływem rosnącego ciśnienia w cieczy tworzą chmury małych pęcherzyków o charakterze stochastycznym.



Różne obrazy kawitacji chmurzastej na płacie



Superkawitacja

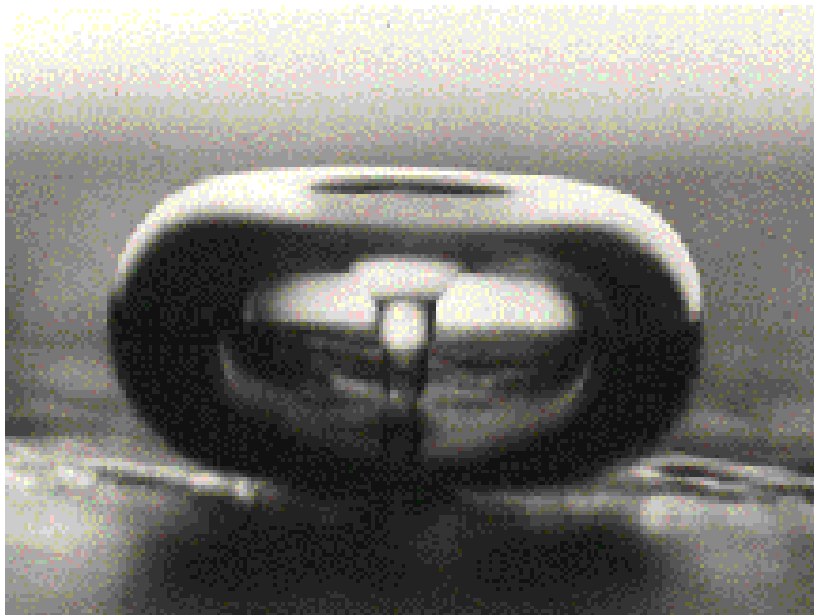
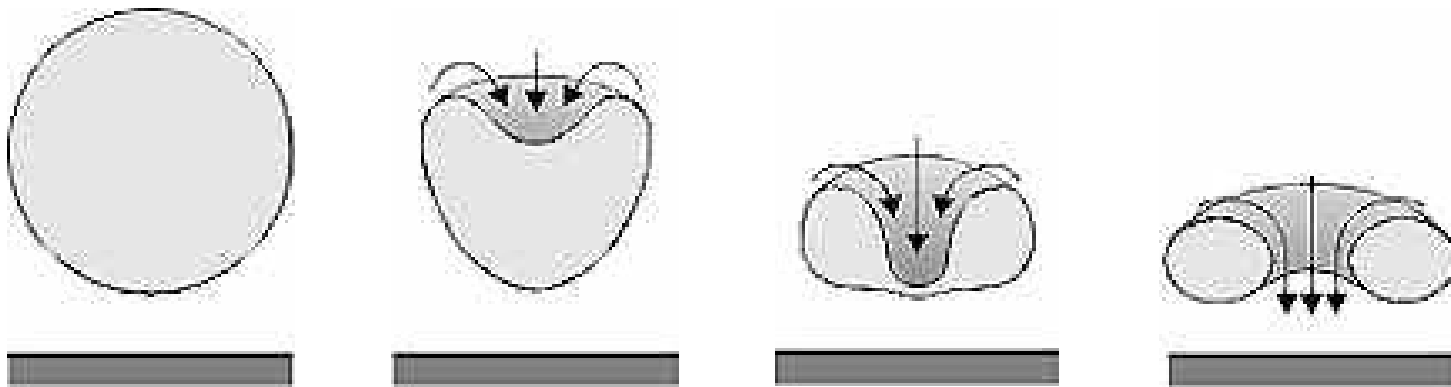


Superkawitacja występuje wtedy, gdy pęcherz kawitacyjny obejmuje cały opływany obiekt i rozciąga się daleko poza jego krawędź spływu. Tak opływany obiekt generuje mniejszą siłę nośną i niemal zerowy opór tarcia. Natomiast opór kształtu pozostaje bez zmian lub nawet rośnie. Strefa zaniku pęcherza kawitacyjnego, w której dochodzi do zjawisk wywołujących erozję kawitacyjną, znajduje się daleko za opływanym obiektem, bez kontaktu z jego powierzchnią. Na tam opływanym obiekcie erozja kawitacyjna praktycznie nie występuje. Z tego względu na bardzo szybkich okrętach instaluje się tzw. śruby superkawitacyjne.



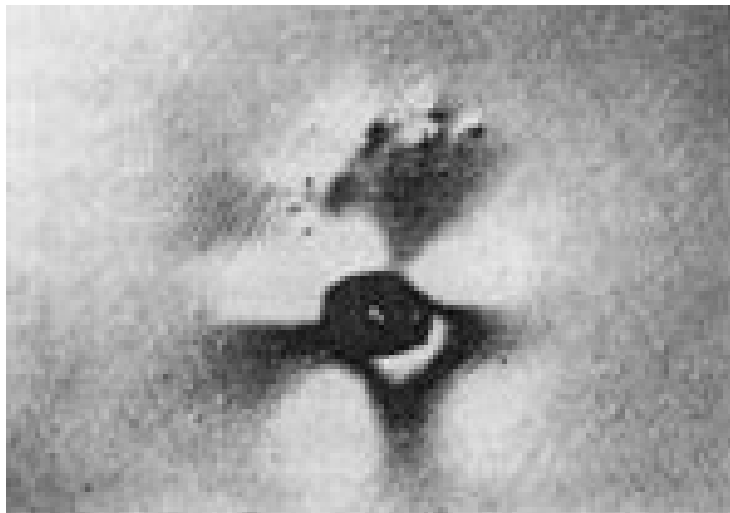
Faza zaniku kawitacji

Przebieg zaniku (implozji) pęcherzyka płynącego w pobliżu ściany w obszarze narastającego ciśnienia

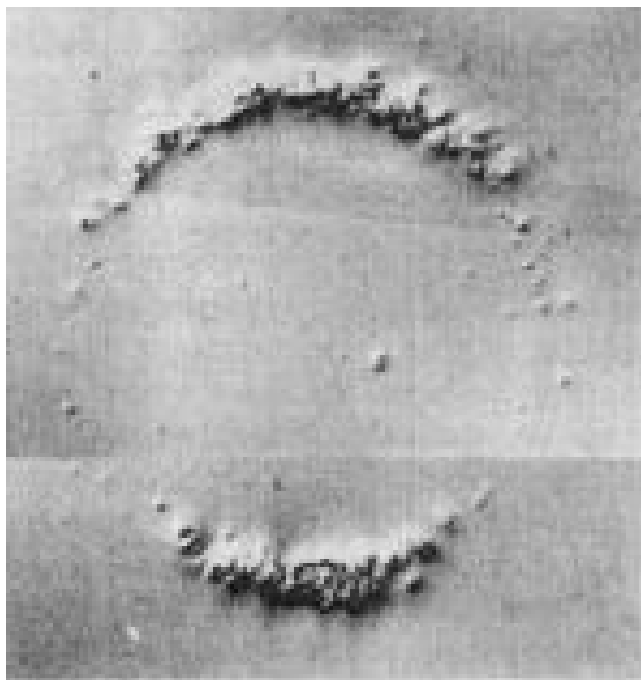


Silnie powiększona fotografia pęcherzyka w ostatniej fazie zaniku (średnica pęcherzyka ←około 1mm)

Implozja pęcherzyków w pobliżu ścianki może powodować erozję kawitacyjną powierzchni



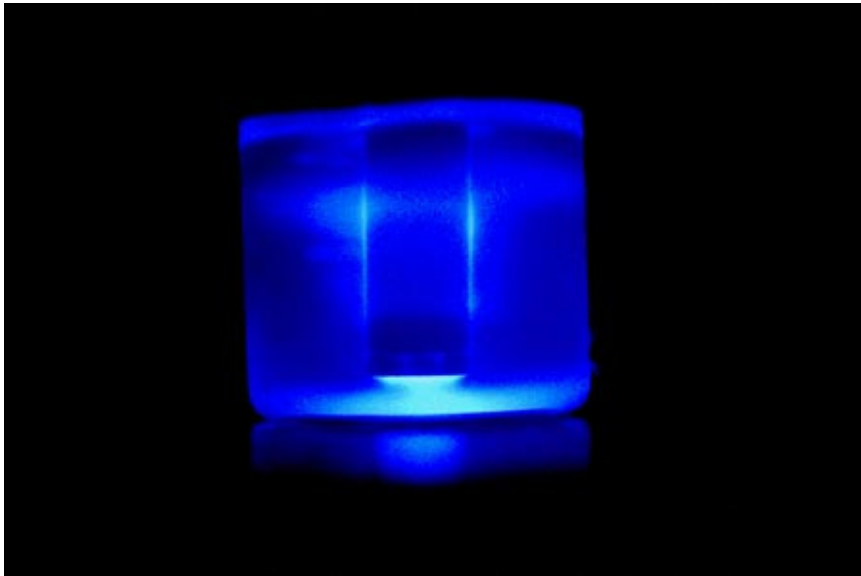
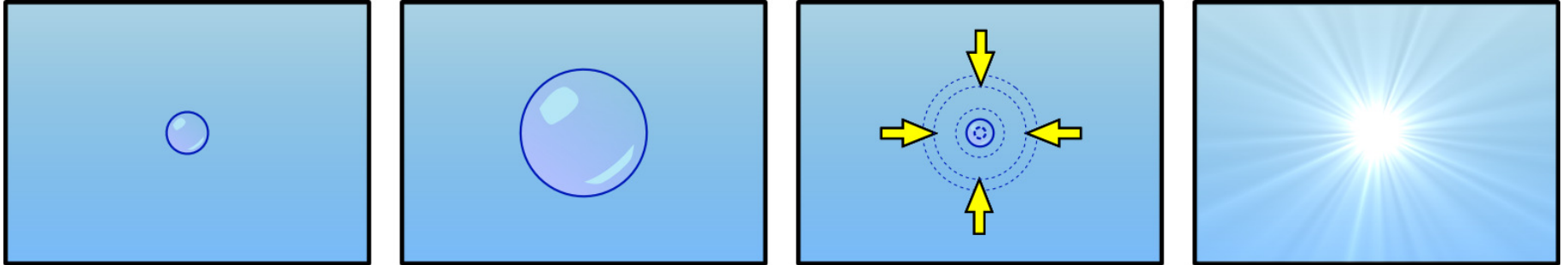
Jeżeli implozja pęcherzyka zachodzi bardzo blisko ścianki, to w powierzchnię uderza strumień cieczy przebijający pęcherzyk. Wywołuje on lokalnie bardzo wysokie ciśnienie (rzędu tysięcy barów) i pozostawia pojedynczy
←wżer erozyjny



Jeżeli implozja pęcherzyka zachodzi nieco dalej od ścianki, to energia strumienia cieczy przebijającego pęcherzyk zostaje szybko rozproszona i nie jest on w stanie uszkodzić powierzchni, natomiast toroidalny pęcherzyk rozpada się na pierścień mikropęcherzyków, które następnie implodują indywidualnie,
←zostawiając pierścieniowy ślad erozyjny

Sonoluminescencja

W końcowej fazie zaniku pęcherzyków kawitacyjnych dochodzi niekiedy do emisji światła. Zjawisko to nosi nazwę sonoluminescencji



Zjawisko wykryto w 1934 roku w Kolonii podczas badań nad sonarem. W fazie zaniku gaz wewnątrz pęcherzyka rozgrzewa się do wysokich temperatur tworząc plazmę emitującą błyski światła o energii 1 – 10 [mW] i czasie trwania 30 – 500 pikosekund. Wywołując ustalone oscylacje pęcherzyka przy pomocy pola akustycznego można uzyskać powtarzalne ← błyski.