



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

---

## Ćwiczenie L8

# **KAWITACJA**

---

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie wartości ciśnienia w przewężeniu w zależności od strumienia objętości wody oraz wartości ciśnienia krytycznego (kawitacji) i porównanie jego wartości z wartością z literatury.

## 2. Wstęp teoretyczny

Podstawowe pojęcia dotyczące badanego zjawiska.

**Kawitacja** – jest to zjawisko wywołane zmiennym polem ciśnienia w cieczy, polega na powstawaniu, wzroście i zaniku pęcherzyków lub innych obszarów zamkniętych (kawern), zawierających parę danej cieczy, rozpuszczone gazy lub mieszaninę parowo-gazową. Pęcherzyki gazowe lub parowo gazowe zwiększają swój promień w obszarze zmniejszonego ciśnienia (poniżej wartości ciśnienia krytycznego) a następnie, w obszarze ciśnienia większego od wartości krytycznej gwałtownie się zmniejszają (implodują).

**Ciśnienie krytyczne (kawitacji)** – ciśnienie, pod którym powstaje kawitacja. Zależy ono od wielu czynników między innymi: rodzaju i temperatury cieczy, zawartości rozpuszczonych gazów oraz cząstek stałych, stanu termodynamicznego cieczy określającego stopień nukleacji (liczby i rodzaju zarodków kawitacyjnych), stanu ruchu cieczy, sposobu wytwarzania kawitacji. Ciśnienie krytyczne zwykle jest bliskie ciśnieniu pary nasyconej danej cieczy, ale może być znacznie mniejsze np. w przypadku cieczy jednorodnej lub większe, np. w przypadku cieczy o dużej zawartości gazów.

**Zarodek kawitacyjny** – mikropęcherzyk gazu, pary lub mikroskopijna cząstka stała niezbędna do powstania kawitacji.

**Pęcherzyk kawitacyjny** – parowy, gazowy lub parowo-gazowy, powstaje z zarodka kawitacyjnego wskutek zmniejszenia ciśnienia cieczy do wartości krytycznej. W procesie kawitacji zmienia się jego wielkość i kształt.

**Pseudokawitacja** - jest procesem odgazowania cieczy. Pęcherzyki wówczas nie implodują – to nie jest kawitacja.

### Rodzaje kawitacji

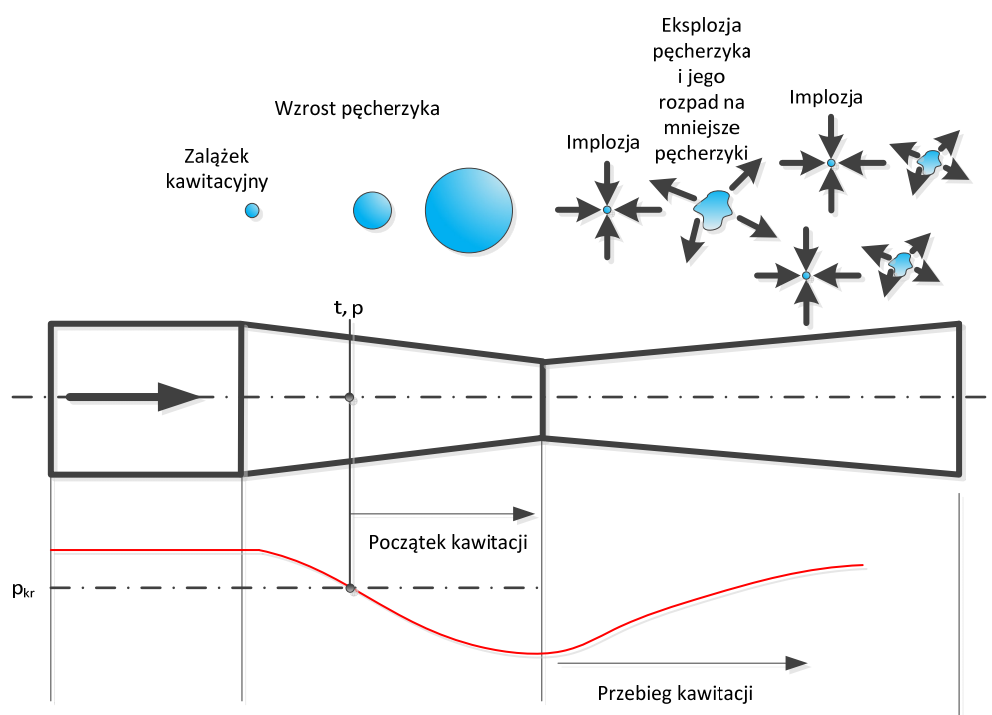
W zależności od tego, czym wypełniony jest pęcherzyk, rozróżniamy kawitację **parową**, **gazową** lub **parowo-gazową**. Kawitacja parowa występuje wówczas, gdy pęcherzyki rosną bardzo szybko i wypełniają się głównie parą danej cieczy. Kawitacja

gazowa powstaje w wyniku intensywnej dyfuzji gazu rozpuszczonego w cieczy do istniejących pęcherzyków gazowych. Kawitacja parowo-gazowa występuje wtedy, gdy pęcherzyki wypełniają się zarówno wskutek parowania cieczy, jak i dyfuzji gazów na granicy faz.

### Metody wytwarzania zjawiska kawitacji

Kawitacja może być wywoływana różnymi metodami (przepływem, drganiami materiału zanurzonego w cieczy, ultradźwiękami), a ze względu na sposób jej generowania dzielimy ją na kawitację **hydrodynamiczną** (przepływową) i kawitację **akustyczną** (wibracyjną).

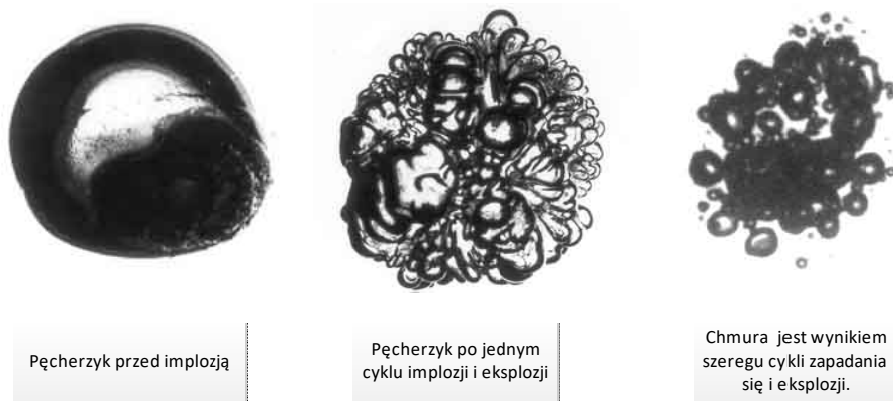
**Kawitacja hydrodynamiczna.** Mechanizm powstawania kawitacji hydrodynamicznej pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Powstawanie i zanik pęcherzyka kawitacyjnego w zwężce.

Zarodek kawitacyjny w postaci pęcherzyka gazu o wymiarze rzędu od  $10^{-6}$  mm do 0,1 mm w obszarze obniżonego ciśnienia (np. w konfuzorze) powiększa się na skutek dyfuzji do jego wnętrza gazów rozpuszczonych w cieczy. Gdy w dowolnym miejscu ciśnienie cieczy osiągnie wartość mniejszą lub równą ciśnieniu krytycznemu, następuje szybki jego wzrost – w wyniku parowania cieczy na jego powierzchni. Po przejściu pęcherzyka do obszaru zwiększającego się ciśnienia (np. w dyfuzorze) następuje kondensacja pary w jego wnętrzu, co prowadzi do jego implozji. W „puste miejsce” napływa ciecz z ogromną prędkością (nawet kilkuset metrów na sekundę), powodując

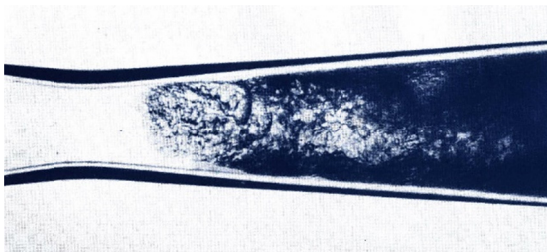
kompresję pozostałych gazów. Silnie sprężony gaz (nawet do ciśnienia kilkuset MPa), ulega ekspansji, powodując eksplozywny wzrost pęcherzyka. W pewnej fazie eksplozji, w wyniku bezwładności cieczy, następuje spadek ciśnienia i ponowne parowanie cieczy na powierzchni rosnącego pęcherzyka. Zjawisko to (wzrost i zapadanie się pęcherzyka) powtarza się wielokrotnie, nawet kilkaset razy. Widok pęcherzyka przed i po implozji pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Zdjęcie pęcherzyka kawitacyjnego przed i po implozji [CH.E. Brennen].

Należy nadmienić, że w przypadku kawitacji hydrodynamicznej mamy do czynienia nie z pojedynczym pęcherzykiem, a z obłokiem pęcherzyków kawitacyjnych. Powoduje to dodatkowe oddziaływania między nimi. Pęcherzyki implodują, następnie eksplodując mogą dzielić się na mniejsze, które znowu implodują i eksplodują.

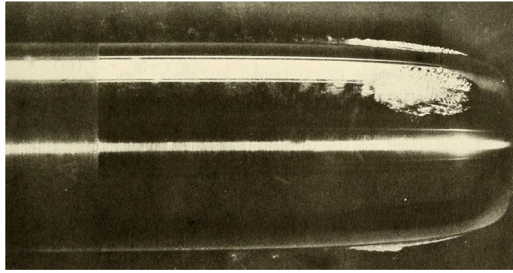
W odpowiednich warunkach (temperatury i ciśnienia) kawitacja hydrodynamiczna powstaje w zaworach, zwężkach (rys. 3), na łopatkach pomp i turbin wodnych oraz łopatkach śrub okrętowych (rys. 4). Kawitacja tego typu może także powstać przy opływie przeszkody (rys. 5).



Rys. 3. Kawitacja przy przepływie przez zwężkę.



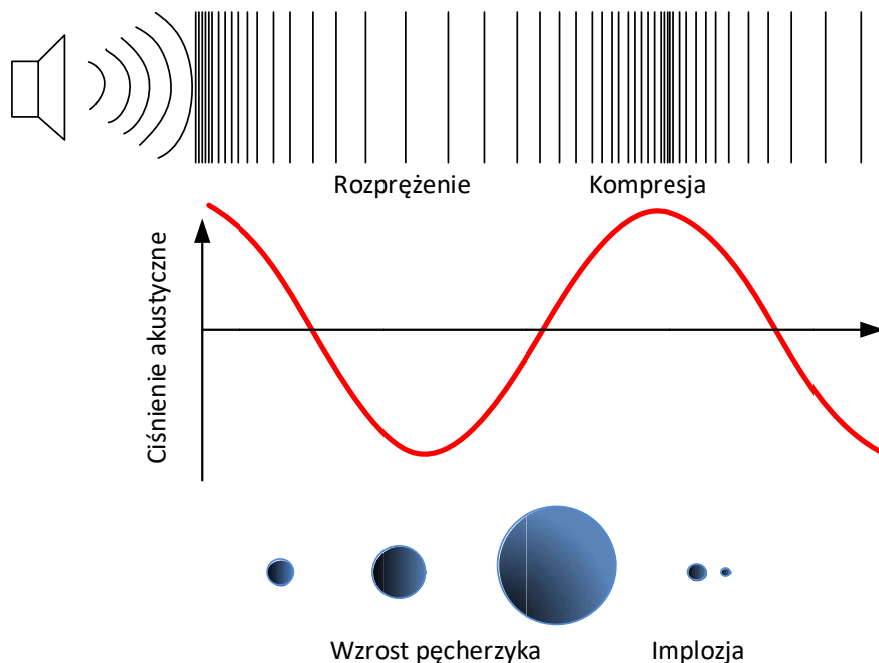
Rys. 4. Kawitacja na śrubie okrętowej. [<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation.jpg>]



Rys. 5. Kawitacja przy opływie przeszkody.

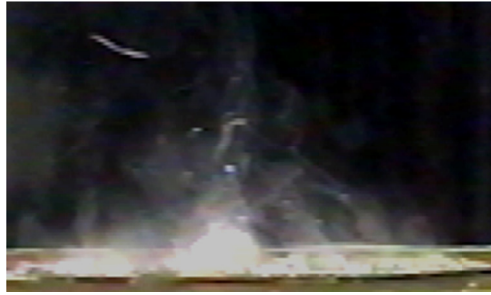
[<https://www.flickr.com/photos/internetarchivebookimages/20593360141>]

**Kawitacja wywołana falą akustyczną.** W przypadku kawitacji akustycznej mechanizm jej powstawania przebiega podobnie jak to opisano wyżej. Inne jest jednak źródło wywołujące zmienne pole ciśnienia. Źródłem tym jest fala akustyczna generowana o określonej częstotliwości i natężeniu. Powstawanie i zanik pęcherzyka kawitacyjnego w polu fali akustycznej pokazano na rys. 6. W wierzchołku fali mamy najwyższe ciśnienie, a w dolnej części najniższe. Zarodek kawitacyjny przemieszcza się wzdłuż fali. Przechodząc przez obszar niskiego ciśnienia (rozprężanie) następuje wzrost pęcherzyka i jeżeli w tym obszarze wejdzie w strefę poniżej ciśnienia krytycznego, to w obszarze wzrostu ciśnienia (kompresja) następuje jego implozja.



Rys. 6 Powstawanie i zanik pęcherzyka kawitacyjnego w polu fali akustycznej.

Zdjęcie kawitacji akustycznej wywołanej falą akustyczną pokazano na rys. 7. Nad przetwornikiem generującym falą akustyczną powstaje obłok kawitacyjny.



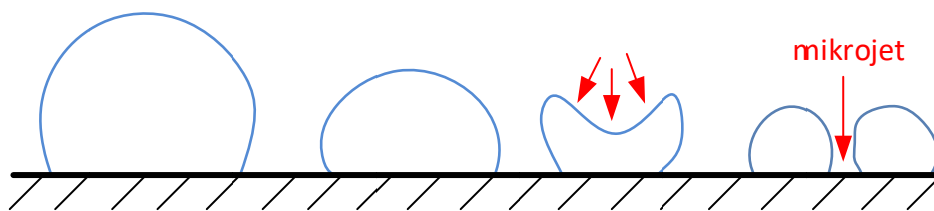
Rys. 7. Kawitacja wywołana falą akustyczną.

### Parametry implodującego pęcherzyka

Z badań doświadczalnych wynika, że niezależnie od tego, w jaki sposób powstaje kawitacja, w momencie implozji pojedynczego pęcherzyka lokalnie temperatura w jego wnętrzu wynosi od 1000 K do 12000 K, powstający impuls ciśnienia wynosi 100-5000 atm, a czas zapadania się pęcherzyka to  $10^{-6}$  sekundy. Po implozji pęcherzyk eksploduje uwalniając zgromadzoną w nim energię rozpadając się na mniejsze pęcherzyki, które mogą ponownie implodować. Zjawisku kawitacji towarzyszą charakterystyczne trzaski.

### Erozja kawitacyjna

Powstawanie i zanik pęcherzyka kawitacyjnego na ścianie (zwężki, rury, zaworu, łopatki pompy itp.) pokazano na rysunku 8. W implodującym pęcherzyku przy ścianie (w porównaniu do pęcherzyka przepływającego swobodnie w przewężeniu) pojawia się dodatkowo mikrojet (mikro-struga), której uderzenie skierowane jest do ścianki. Jest to główna przyczyna erozji kawitacyjnej



Rys. 8 Powstawanie i zanik pęcherzyka kawitacyjnego na ścianie.

### Skutki erozji kawitacyjnej

Kawitacja z punktu widzenia eksploatacji maszyn przepływowych, śrub okrętowych jest zjawiskiem negatywnym. Gdy urządzenie takie jak pompa czy turbina wodna pracuje w warunkach występowania kawitacji, wtedy pojawia się tak zwana **erozja kawitacyjna**. Implodujące pęcherzyki powodują ubytki masy na powierzchni łopatek

wirników pomp i turbin, co jest zjawiskiem niepożądanym. Przykładowe zdjęcia erozji kawitacyjnej przedstawiono rys. 9-11,



Rys. 9. Erozja na powierzchni elementu pompy  
[[https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Kavitation\\_at\\_pump\\_impeller.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Kavitation_at_pump_impeller.jpg)].



Rys. 10. Erozja na powierzchni elementu pompy  
[<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation.jpg>].



Rys. 11. Erozja na powierzchni śruby okrętowej  
[<https://www.nps.gov/safr/learn/historyculture/propsaquaticpark.htm>].

### 3. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składa się z następujących elementów:

- Zbiornika (1),
- pompy (2),

- zaworu regulacyjnego  $Z_R$  (3),
- zwężki (4),
- rotametrze R (5),
- manometru rtęciowego  $M_R$  (6),
- kamery (7),
- monitora (8),
- termometru (9).

#### 4. Procedura badawcza

1) Zapoznać się z budową stanowiska i sporządzić jego schemat, na którym należy zaznaczyć opisane w pkt. 3 elementy. Dodatkowo w tym ćwiczeniu należy sporządzić schemat manometru rtęciowego  $M_R$ , stosując oznaczenia z tabeli pomiarowej ( $H_w$  - wysokość słupa wody w cylindrze,  $h_w$  - wysokość słupa cieczy w rurce wewnętrznej,  $h_{Hg}$  - wysokość słupa rtęci w rurce wewnętrznej).

2) Na podstawie schematu manometru wyprowadzić wzór (X) na obliczenie ciśnienia w przewężeniu.

W celu wykonania pomiarów należy:

- 3) Sprawdzić czy zawór regulacyjny (3) jest zamknięty.
- 4) Włączyć pompę (2) i powoli otwierać zawór regulacyjny  $Z_R$  (3) aż do uzyskania na rotametrze R (5) wskazania  $320 \text{ dm}^3/\text{h}$ .
- 5) Odczytać wysokości słupów wody i rtęci w manometrze rtęciowym  $M_R$  (6).
- 6) Następne pomiary wysokości słupów wody i rtęci wykonać dla kolejnych wartości strumieni objętości  $q_v$  podanych w tabeli pomiarowej.
- 7) Podczas trwania pomiarów, obserwować na monitorze (8) zachowanie się cieczy w przewężeniu, określić moment, w którym zaczyna pojawiać się kawitacja oraz moment, w którym słyszalne staną się trzaski wywołane zjawiskiem kawitacji. Zapisać obserwacje w tabeli.
- 8) Wykonać pomiar temperatury wody dla strumienia, przy którym rozpocznie się kawitacja.

#### 5. Tabela wielkości mierzonych

Tabela wielkości pomiarowych do tego ćwiczenia zamieszczona jest na końcu instrukcji. Tabelę należy uzupełnić o jednostki wielkości mierzonych.

## 6. Opracowanie wyników pomiarów

Opracowanie wyników pomiarów należy wykonać zgodnie z poniższymi wytycznymi:

- 1) Na podstawie zmierzonych wielkości obliczyć ciśnienie w przewężeniu  $p$  wykorzystując wcześniej wyprowadzony wzór (X).
- 2) Wyniki obliczeń należy zamieścić w tabeli. Dodatkowo należy zaznaczyć wartość ciśnienia, pod którym rozpoczęła się kawitacja oraz punkt, w którym były słyszalne trzaski spowodowane kawitacją.
- 3) Sporządzić wykres zależności ciśnienia  $p$  panującego w przewężeniu w funkcji strumienia objętości wody  $p=f(q_v)$ . Na wykresie zaznaczyć punkty początku kawitacji oraz początku szumu kawitacyjnego.
- 4) Odczytać z tablic ciśnienie parowania (wrzenia) wody w temperaturze odczytanej podczas pomiarów, i nanieść tę wartość na wykres w postaci linii poziomej.
- 5) Odczytane z tablic ciśnienie parowania porównać z ciśnieniem parowania zmierzonym i wyjaśnić różnicę.

## 7. Pytania kontrolne

- 1) Co to jest kawitacja?
- 2) Co to jest ciśnienie krytyczne?
- 3) Co to jest załączek kawitacyjny?
- 5) Gdzie może wystąpić zjawisko kawitacji?
- 6) Co to jest pseudokawitacja?
- 7) Rodzaje pęcherzyków kawitacyjnych?
- 8) Co to jest erozja kawitacyjna?
- 9) W jakich warunkach pojawia się mikrostruga?
- 10) Wyjaśnić mechanizm powstawania i zaniku pęcherzyka kawitacyjnego.
- 11) Na czym polega różnica między kawitacją hydrodynamiczną a akustyczną?
- 12) Gdzie może powstać kawitacja hydrodynamiczna?
- 13) Wymień metody wytwarzania zjawiska kawitacji?
- 14) Jakie są rodzaje kawitacji.

Tabela pomiarowa do L8

Data wykonania pomiarów:.....

Lp.	$q_v$	$H_w$	$h_{hg}$	$h_w$	Lp.	$q_v$	$H_w$	$h_{hg}$	$h_w$
Jedn.					Jedn.				
1.	320				13.	800			
2.	360				14.	820			
3.	400				15.	840			
4.	440				16.	860			
5.	480				17.	880			
6.	520				18.	900			
7.	580				19.	920			
8.	640				20.	940			
9.	680				21.	960			
10.	740				22.	980			
11.	760				23.	1000			
12.	780								

Warunki pomiaru i wielkości stałe

Symbol	Jednostka	Wartość
$p_b$	kPa	
$t_w$	°C	

Sekcja nr

Lp.	Nazwisko	Imię	Nr albumu
1.			
2.			
3.			

Data, podpis prowadzącego