

# Możliwość oceny liczby kawitacji w procesach kawitacji hydrodynamicznej z uwzględnieniem wpływu geometrii wzbudnika kawitacji

Klaudiusz Lenik\*, Janusz Ozonek\*\*

\*Wydział Podstaw Techniki, Politechnika Lubelska

\*\*Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

**Streszczenie:** W artykule omówiono problematykę określenia wielkości liczby kawitacji w strefie skawitowanej cieczy w funkcji ciśnienia zasilania oraz długości strefy kawitacji z uwzględnieniem wpływu kształtu wzbudnika kawitacji. Badania przeprowadzono na opisanym stanowisku doświadczalnym, z wykorzystaniem do rejestracji manometrami piezoelektrycznymi i wykonanymi torami pomiarowymi, współpracującymi z komputerowym systemem zbierania i przetwarzania danych. W pracy podano przykłady zmian ciśnienia i temperatury po stronie rozprężnej kawitatora, a także zmian ciśnienia w funkcji odległości od miejsca powstawania kawitacji. Omówiono także możliwości oceny pulsacji ciśnienia w funkcji odległości od wzbudnika. Opracowana metodyka badań umożliwia analizę wpływu konstrukcji wzbudnika kawitacji hydrodynamicznej na długość strefy skawitowanej cieczy oraz określenia lokalnych oscylacji ciśnienia kawitacji.

**Słowa kluczowe:** kawitacja hydrodynamiczna, liczba kawitacji, ciśnienie w strefie kawitacji

## 1. Wprowadzenie

Nazwa kawitacja – używana w fizyce i technice wywodzi się od łacińskiego słowa *cavitas* (pustka, jama). Pierwszą poprawną analizę tego zjawiska przedstawił w 1894 r. Osborne Reynolds. Mianem kawitacji określa się szczególne zjawisko, jakie pojawia się w cieczy pod wpływem zmieniającego się w czasie i przestrzeni pola jej ciśnienia. Zmiany te związane są z rozprężaniem się cieczy do poziomu ciśnienia krytycznego, przy którym w cieczy pojawiają się przestrzenie nasycone parą mokrą cieczy, a także gazami w niej rozpuszczonymi i następnie na gwałtownym sprężaniu do poziomu ciśnienia, przy którym mają miejsce implozje w przestrzeniach wypełnionych parą i gazami.

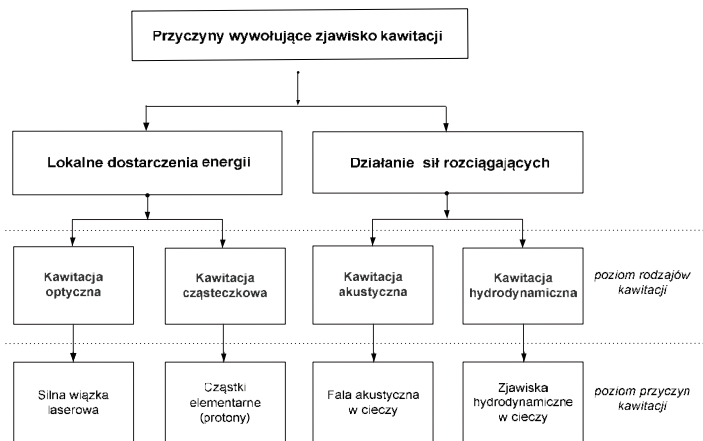
W gazach zjawiska kawitacji nie obserwuje się, co jest wynikiem przede wszystkim braku napięcia powierzchniowego (lub występowaniem innych cech gazowego stanu skupienia). Ciecze natomiast, nawet przy izotermicznym obniżaniu ciśnienia do poziomu ciśnienia nasycenia, przechodzą w stan pary, przy czym zjawisko to jest nieciągłe w przestrzeni cieczy, a para uwalniana jest w postaci kulistych bąbli z całej objętości.

Tak więc w skawitowanej cieczy tworzą się pęcherzyki lub tzw. kawerny kawitacyjne, wypełnione parami cieczy i rozpuszczonymi w niej gazami. W obszarach podwyższonego ciśnienia, powy-

żej wartości krytycznej, pęcherzyki gwałtownie implodują, co wywołuje w mikroobszarach implozyjnych uderzeniowy, gwałtowny wzrost ciśnienia. Stąd kawitacja narusza warunek ciągłości substancji w przestrzeni, gdyż tworzą się miejsca, wypełnione nie samą cieczą, lecz także parą mokrą i gazami w niej rozpuszczonymi. Jeżeli ciśnienie cieczy jest niższe od ciśnienia pary nasyconej, pęcherzyki zwiększają swoją objętość, co powoduje powstanie większych obszarów skawitowanej cieczy.

Przyczyny powstania zjawiska kawitacji mogą być różne (rys. 1), najczęściej jednak pojawiają się one w charakterystycznych procesach, jakim poddawane są ciecze, a mianowicie:

1. W procesach hydrodynamicznych – kawitacja powstaje w przepływającej cieczy podczas spadku ciśnienia statycznego, wywołanego warunkami przepływu lub oddziaływaniami zewnętrznymi. Często pojawia się w przewężeniach kanałów przepływowych oraz w miejscach zakrzywienia przepływów, a także wskutek ruchu ciał stałych w cieczach, np. śruby okrętowe. Tak więc kawitacja tego rodzaju pojawia się jako skutek lokalnego przewężenia linii prądu przemieszczającej się cieczy lub oderwania strug od powierzchni opływowych ciał.
2. W procesach z udziałem ultradźwięków – kawitację w tym przypadku wywołują pulsacje wewnątrz cieczy spowodowane rozpręszaniem się fal akustycznych, powstających pod wpływem uderzeń, drgań ścianek ograniczających ciecz lub drgań ciał zanurzonych w cieczy. Rozrywanie ciągłości cieczy i powstawanie pęcherzyków ka-



Rys. 1. Główne przyczyny wywołujące zjawisko kawitacji w cieczach

Fig. 1. The main causes of cavitation in liquids

witacyjnych następuje w czasie półokresów rozprężania, a ich zanikanie w czasie półokresów sprężania skawitowanego medium.

3. W procesach dostarczania znacznych porcji energii do niewielkich obszarów wewnątrz cieczy, np. poprzez wiązkę laserową lub strumień cząstek ciężkich, np. protonów. Sposoby te wywołują lokalne zwiększanie energii wewnętrznej cieczy aż do granicy, przy której ciecz przechodzi w stan pary lub gdy uwalniają się gazy w niej zawarte. Efektem tego jest powstanie pęcherzy pary i gazów podobnie jak w przypadku kawitacji hydrodynamicznej.

W przypadku kawitacji hydrodynamicznej oraz akustycznej pęcherzyki kawitacyjne pojawiają się w cieczy w rezultacie lokalnych rozerwń ciągłego ośrodka pod wpływem dużych sił rozciągających, które powstają w wyniku lokalnych nagłych obniżen ciśnienia, jakie mogą zachodzić albo w procesach hydrodynamicznych, lub też w polu ultradźwiękowym o dużym natężeniu (20 kHz – 1 MHz).

Pojawienie się kawitacji optycznej oraz cząsteczkowej jest konsekwencją lokalnego dostarczenia energii, którego źródłem może być np. silna wiązka laserowa, powodująca elektrostrykcję ośrodka i powstanie lokalnych ciśnien (Bagieński 1998). Ten sposób generowania kawitacji daje możliwość precyzyjnej kontroli parametrów zjawiska, takich jak rozmiar pęcherzyka oraz jego lokalizacja w cieczy. Ze względu na wysokie koszty eksploatacyjne procesu zarówno kawitacja optyczna, jak i cząsteczkowa nie znalazły zastosowania praktycznego na szerszą skalę, stanowią jedynie przedmiot badań laboratoryjnych (Litwinienko i in. 2005, Braeutigam i in. 2010, Franc i in. 2004).

## 2. Liczba kawitacji

Analizując zjawisko kawitacji, należy określić parametr lub liczbę kryterialną, pozwalającą na ilościową ocenę przepływu w dwu aspektach:

- parametr, który przyjmuje jednakową wartość przy dowolnych i podobnych dynamicznie warunkach kawitacji,
- parametr określający warunki przepływu bezkawitacyjnego oraz warunki powstawania, zanikania lub rozwoju poszczególnych stadiów kawitacji.

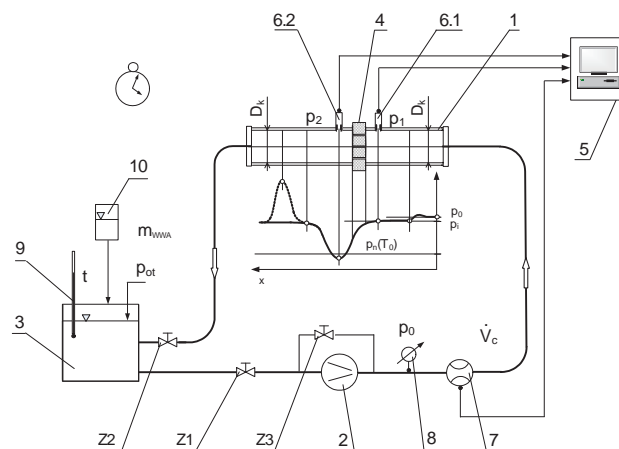
Jako parametr charakteryzujący zjawisko kawitacji można przyjąć współczynnik kawitacji  $K$ , zwany też liczbą kawitacji  $K$ :

$$K = \frac{(p_1 - p_n)}{\frac{\rho \cdot w_1^2}{2}} \quad (1)$$

gdzie:  $p_1$  – ciśnienie statyczne w przepływie niezakłóconym [Pa],  $p_n$  – prężność pary [Pa],  $\rho$  – gęstość cieczy [kg/m<sup>3</sup>],  $w_1$  – prędkość cieczy w przepływie niezakłóconym [m/s].

## 3. Stanowisko badawcze i wyniki przeprowadzonych badań

Schemat układu stanowiska wykorzystywanego do badań procesu kawitacji hydrodynamicznej w warunkach laboratoryjnych przedstawiono na rys. 2. Reaktor kawitacyjny (1), połączony jest przewodami cieczowymi ze zbiornikiem (3) i pompą wirową typu Wilo (2). W układzie przewodów



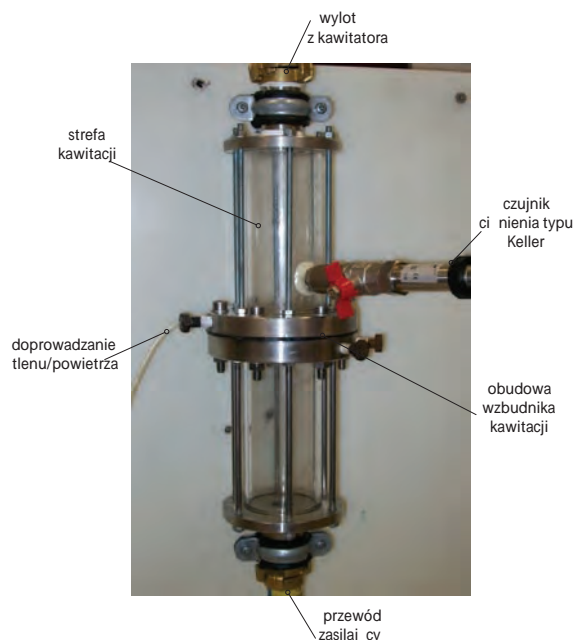
**Rys. 2.** Schemat stanowiska badawczo-pomiarowego procesu generowania kawitacji hydrodynamicznej: 1 – reaktor hydrokawitacyjny, 2 – pompa wirowa, 3 – zbiornik cyrkulacyjny, 4 – wymienne tarcze z otworkami (wzbudniki kawitacji), 5 – komputerowy system zbierania i przetwarzania danych pomiarowych, 6.1 i 6.2 – czujniki piezoelektryczne firmy Keller, 7 – przepływomierz elektromagnetyczny, Z1, Z2 – zawory odcinające, Z3 – zawór regulacyjny, 8 – manometr sprężynowy, 9 – termometr, 10 – dozownik badanej substancji

**Fig. 2.** Experimental setup for the generation of hydrodynamic cavitation: 1 – hydrodynamic reactor, 2 – centrifugal pump, 3 – circulation tank, 4 – interchangeable orifice plates with holes (cavitation inducers), 5 – measurement and acquisition system, 6.1 and 6.2 – Keller piezoelectric sensors, 7 – electromagnetic flow meter, Z1, Z2 – valves, Z3 – control valve, 8 – pressure gauge, 9 – thermocouple, 10 – test substance dispenser

zainstalowane są zawory: Z1 – zawór odcinający dopływ cieczy do kawitatora, Z2 – zawór odcinający odpływ roztworu badawczego z reaktora do zbiornika, Z3 – zawór regulacyjny. Stanowisko wyposażone jest w układ pomiarowy, w skład którego wchodzi: manometry piezoelektryczne PR-35X firmy Keller (6.1 oraz 6.2) o rozdzielczości 1 mbar, połączone torami pomiarowymi z komputerowym systemem zbierania i przetwarzania danych pomiarowych oraz przepływomierz elektromagnetyczny typ M1500AA firmy Badger Meter Inc. o rozdzielczości 0,05 dm<sup>3</sup>/min, połączony również torem pomiarowym z systemem komputerowym. Pomiar temperatury w trakcie procesu kawitacji były realizowane z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych typu PR-35X.

Modelowy roztwór związków poddawany procesowi kawitacji kierowany był za pomocą pompy (2) ze zbiornika (3) o pojemności 30 dm<sup>3</sup> do reaktora kawitacyjnego (1), a następnie był ponownie zawracany do zbiornika (3). Układ zasilania kawitatora cieczą o podwyższonym ciśnieniu wraz z układem pomiaru natężenia przepływu cieczy przepływomierzem elektromagnetycznym przedstawiono na rys. 3.

Dla analizy procesu kawitacji wykorzystano trzy różne geometrycznie wzbudniki kawitacji w postaci tarcz różniących się pomiędzy sobą liczbą, rozmieszczeniem oraz kształtem otworów, a mianowicie tarczę z jednym otworem walcowym położonym w osi tarczy o średnicy 3 mm (tarcza nr 1), tarczę z czterema otworami o przekroju prostokąta (1 mm × 5 mm), rozłożonymi równomiernie po obwodzie tarczy (tarcza nr 2) oraz tarczę z pięcioma otworami walcowymi o średnicy 1 mm każdy, rozłożonymi równomiernie po

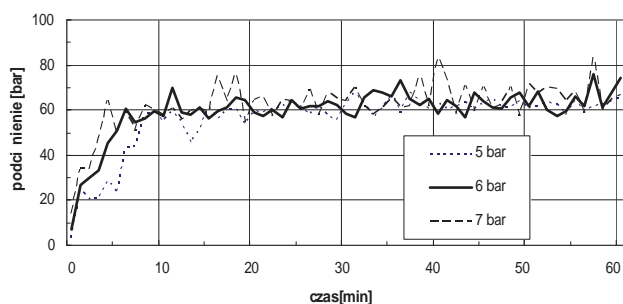


**Rys. 3.** Doświadczalny kawatator na stanowisku laboratoryjnym  
**Fig. 3.** Experimental cavitation reactor in the laboratory

obwodzie i w osi tarczy (tarcza nr 3). Uzyskane charakterystyczne dane zmian ciśnienia jako przykład oddziaływania określonej geometrii wzбудnika na intensywność prowadzonego procesu podano dla tarczy nr 3 ( $5 \times \phi 1$  mm).

### 3.1. Zmiany ciśnienia w strefie kawitacji

W trakcie badań procesu kawitacji rejestrowane były zmiany ciśnienia po stronie rozprężnej reaktora z wykorzystaniem manometru piezoelektrycznego typu PR-35X firmy Keller. Przykładowe zmiany ciśnienia w strefie kawitacji, w odległości 45 mm od wzбудnika kawitacji, w zależności od ciśnienia zasilania dla tarczy nr 3, przedstawiono na rys. 4.



**Rys. 4.** Zmiany ciśnienia w strefie kawitacji w trakcie trwania okresu kawitacji dla tarczy nr 3

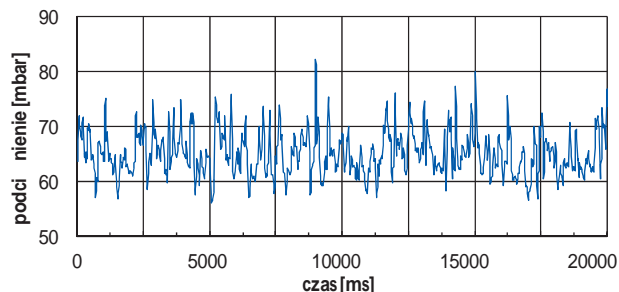
**Fig. 4.** Pressure changes during cavitation for orifice plate No. 3

W pierwszych 7–8 min następuje wzrost pulsacji a następnie stabilizacja i zanikają różnice dla badanych ciśnień zasilania. Wzrost pulsacji w pierwszym okresie procesu kawitacji spowodowany jest głównie tym, że czas cyrkulacji wynosi ok. 5 min i w tym czasie następuje dalsze rozpuszczanie cząsteczek gazu – zarodników kawitacji. Wzrost ciśnienia zasilania kawatatora wpływa na wzrost pulsacji ciśnienia w strefie kawitacji.

Zmiany pulsacji ciśnienia w obszarze kawitacji w krótkich interwałach czasu przedstawiono na rys. 5. Amplituda

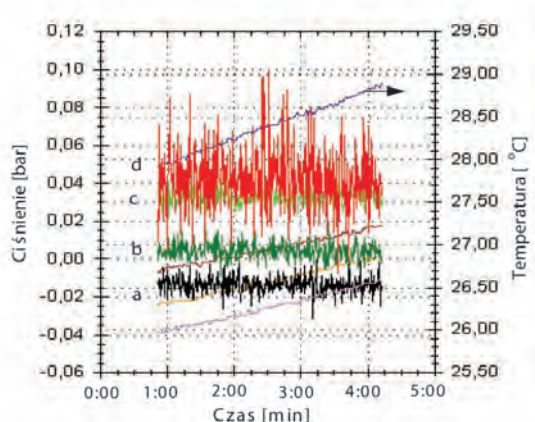
ciśnien zmienia się w granicach 0–15 %. Wpływa ona głównie na efekt i intensywność szumu kawitacyjnego.

Przykładowe zmiany ciśnienia i temperatury po stronie rozprężnej kawatatora w funkcji ciśnienia zasilania w odległości 40 cm od kryzy, w zależności od ciśnienia zasilającego kawatator przedstawiono na rys. 6.



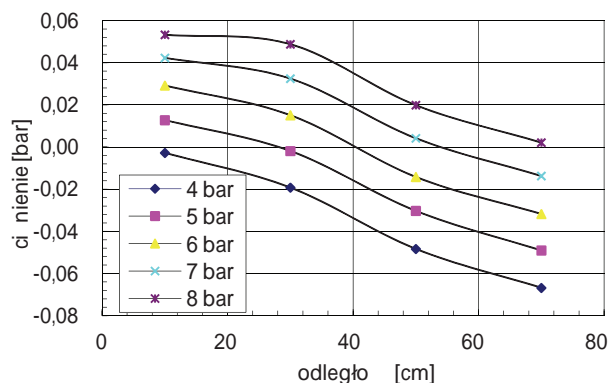
**Rys. 5.** Pulsacja ciśnienia w odległości ok. 45 mm od wzбудnika kawitacji

**Fig. 5.** A pressure trace at a distance of 45 mm from the cavitation inducer



**Rys. 6.** Zmiany ciśnienia w strefie kawitacji i temperatury skawitowanej cieczy przy ciśnieniu zasilania: a) 6 bar, b) 7 bar, c) 8 bar, d) 9 bar, tarcza nr 3

**Fig. 6.** Changes of pressure and temperature of the liquid in the cavitation zone at different pressure supply: a) 6 bar, b) 7 bar, c) 8 bar, d) 9 bar, plate No 3



**Rys. 7.** Zmiany ciśnienia po stronie rozprężnej kawatatora w funkcji odległości od kryzy kawitacyjnej dla tarczy nr 3 i ciśnienia zasilania

**Fig. 7.** Changes in pressure over distance from orifice plate number 3 along the expansion side of the cavitation reactor for various supply pressures, plate No 3

Dla określenia zasięgu oddziaływania strefy kawitacji, w trakcie badań wydłużono konstrukcyjnie część rozprężną reaktora hydrokawitacyjnego do 1 m. Na długości tej rozmieszczono piezoelektryczne czujniki ciśnienia typu Keller. Przykładowe zmiany ciśnienia po stronie rozprężnej kawitatora dla ciśnienia zasilającego  $p=7$  bar i tarczy nr 3 ( $5 \times \phi 1$  mm) przedstawiono na rys. 7.

#### 4. Zakończenie

Omówiony w pracy problem oceny zjawiska kawitacji związany jest z opisem zaprojektowanego stanowiska badawczego procesu kawitacji hydrodynamicznej. Umożliwia ono ocenę m.in. wpływu geometrii wzbudnika kawitacji na przebieg prowadzonego procesu. Problematyka dotyczy konstrukcji wzbudnika wykonanego w postaci tarcz różniących się pomiędzy sobą liczbą, rozmieszczeniem oraz kształtem otworów. Przykład podany w artykule dotyczy uzyskanych danych zmian ciśnienia w strefie rozprężnej reaktora kawitacyjnego dla racjonalnie dobranej konstrukcji wzbudnika, tj. tarczy z pięcioma otworami walcowymi o średnicy 1 mm każdy, rozłożonymi równomiernie po obwodzie i w osi tarczy. Uzyskane dane zmian ciśnienia pozwalają oceniać zachodzący proces kawitacji hydrodynamicznej poprzez określone zmiany wielkości charakterystycznej, jaką jest liczba kawitacji K.

#### Bibliografia

1. Arrojo S., Benito Y.: *A theoretical study of hydrodynamic cavitation*, "Ultrasonics Sonochemistry", 2008, 15, 203–211.
2. Bagiński J.: *Kawitacja w urządzeniach wodociągowych i ciepłowniczych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998, Poznań
3. Braeutigam P., Franke M., Wu Z.L., Ondruschka B.: *Role of different parameters in the optimization of hydrodynamic cavitation*, "Chem. Eng. Technol.", 2010, 33(6), 932–940.
4. Cai J., Huai X., Li X.: *Dynamic behaviors of cavitation bubble for the steady cavitating flow*, "Journal of Thermal Science", 18, 2009, 338–344.
5. Franc J.P., Michel J.M.: *Fundamentals of cavitation*, Kluwer Academic Publishers, 2004, Dordrecht.
6. Gogate P.R.: *Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review*, "Chemical Engineering and Processing", 47, 2008, 515–527.
7. Jyoti K., Pandit A.: *Effect of cavitation on chemical disinfection efficiency*, "Water Research", 38, 2004, 2249–2258.
8. Litwinienko A., Nekroz A., Łukasik K.: *Technologiczne zastosowanie kawitacji hydrodynamicznej – doświadczenia i perspektywy*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2005, Lublin.
9. Ozonok J., Odrzywolski A., Depta M., Kujawska J.: *Degradacja WWA w roztworze wodnym w warunkach kawitacji hydrodynamicznej*, Monografie Komitetu Inżynierii

- Środowiska Polskiej Akademii Nauk, 58, 2009, 167–175.
10. Sivakumar M., Pandit A.: *Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique*, "Ultrasonic Sonochemistry", 9, 2002, 123–131.
  11. Szulżyk-Cieplak J., Fijałkowski S., Ozonok J.: *Wykorzystanie zjawiska kawitacji hydrodynamicznej w technologii oczyszczania wody i ścieków*, Materiały II Kongresu Inżynierii Środowiska, tom 1, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 33, 2005, 279–282. ■

#### The evaluation of the cavitation number in hydrodynamic cavitation including the influence of the orifice plate geometry

**Abstract:** The paper presents the determination problem of cavitation number in cavitation zone in liquids as a function of supply pressure and of the length of the cavitation zone. The problem concerns the influence of the orifice plates geometry. The research is described on experimental setup developed with the use of piezoelectric manometers to record the tracks compatible with the computer measuring system of data collection and processing. The paper gives some examples of changes in downstream pressure as well as temperature and pressure changes as a function of distance from the source of cavitation. The possibility of evaluation of pulse pressure at specified distances from the orifice plate is discussed. The presented research methodology allows for the analysis of the effect of orifice plate geometry on the length of the cavitation zone as well as the determination of local pressure oscillations in cavitation zone.

**Keywords:** hydrodynamic cavitation, cavitation number, pressure in cavitation zone

#### prof. dr hab. inż. Klaudiusz Lenik

Ukończył studia na Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Obecnie pracuje na Wydziale Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej. Jest kierownikiem Katedry Podstaw Techniki. Specjalność – tribologia, organizacja i zarządzanie procesami wytwórczymi, technologia, eksploatacja, wspomaganie komputerowe, edukacja techniczno-informatyczna.

e-mail: wz.kpt@pollub.pl



#### dr hab. inż. Janusz Ozonok, prof. PL

Ukończył studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obecnie pracuje na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej w Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska. Specjalność – inżynieria chemiczna, inżynieria i ochrona środowiska, chemia plazmy niskotemperaturowej.

e-mail: j.ozonok@wis.pol.lublin.pl

