

# APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

## Przegląd metod wytwarzania kawitacji do degradacji zanieczyszczeń organicznych w środowisku wodnym

<sup>1</sup>MICHAŁ GAĞOL, <sup>2</sup>GRZEGORZ BOCZKAJ

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ CHEMICZNY, <sup>1</sup>KATEDRA TECHNOLOGII POLIMERÓW ORAZ  
<sup>2</sup>KATEDRA INŻYNIERII CHEMICZNEJ I PROCESOWEJ

**Słowa kluczowe:** kawitacja hydrodynamiczna, sono-kawitacja, oczyszczanie ścieków, degradacja zanieczyszczeń

### STRESZCZENIE:

Zjawisko kawitacji może być przydatne w oczyszczaniu ścieków przemysłowych. Energia uwalniana w strumieniu cieczy, w momencie wytworzenia kawitacji może być wykorzystana do efektywnej degradacji zanieczyszczeń organicznych w fazie wodnej. W niniejszej pracy dokonano przeglądu wybranych metod wytwarzania zjawiska kawitacji hydrodynamicznej, jak i sono-kawitacji. W przypadku kawitacji hydrodynamicznej najczęściej w celu zapoczątkowania zjawiska generowania pęcherzy gazowych wykorzystuje się przewężenia kanałowe oraz kryzy. Sono-kawitacja jest wytwarzana za pomocą wzbudników ultradźwiękowych. Najwyższą efektywność utleniania związków organicznych osiąga się, stosując sono-kawitację (od 30 do 60% redukcji ładunku zanieczyszczeń).

### A review of methods for formation of cavitation phenomena for degradation of pollutants in wastewater

**Keywords:** hydrodynamic cavitation, sono-cavitation, wastewater treatment, degradation of pollutants

### ABSTRACT:

Cavitation can be used as a useful method for a pre-treatment of industrial wastewater. The energy supplied to the stream at the time of cavitation occurrence can be used for an effective degradation of organic pollutants in the aqueous phase. This paper presents a state of the art of methods of producing hydrodynamic and sono-cavitation. In the case of hydrodynamic cavitation most frequently to initiate the phenomenon of the cavities generation a Venturi tube or orifice are used. Sono-cavitation is produced by means of the ultrasonic transducers. The highest efficiency of oxidation of organic compounds is achieved using a sono-cavitation (30 to 60% reduction of pollutant).

## 1. WSTĘP

Kawitacja to gwałtowne przejście fizyczne ze stanu ciekłego do stanu gazowego na skutek zmniejszenia ciśnienia, co związane jest z pojawieniem się w cieczy tzw. pęcherzy kawitacyjnych o ogromnej sile implozji (zjawisko powstawania pęcherzy kawitacyjnych w strumieniu przepływającej cieczy przedstawiono na Rysunku 1). Głównymi czynnikami wpływającymi na ich powstawanie są: temperatura strumienia i ciśnienie w układzie. Zjawisko kawitacji najczęściej opisywane jest poprzez tzw. liczbę kawitacyjną. Liczba kawitacyjna opisuje intensywność zjawiska kawitacji i jest wyrażona poprzez następującą zależność matematyczną:

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{(1/2)\rho v_o^2}, \quad (1)$$

gdzie  $P_2$  to ciśnienie na odcinku o przepływie niezaburzonym za elementem wywołującym kawitację,  $P_v$  to prężność pary cieczy, natomiast  $v_o$  i  $\rho$  odnosi się do liniowej prędkości przepływu i gęstości przepływającej cieczy.

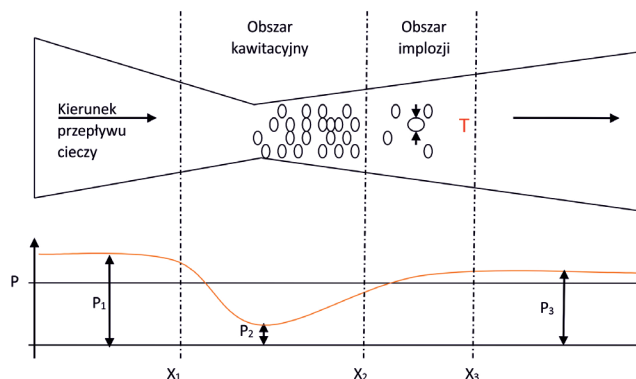
Zjawisko kawitacji występuje w układzie, kiedy liczba kawitacyjna osiąga wartość w zakresie 0-1 [1-5]. W takiej sytuacji możliwe jest osiągnięcie optymalnych warunków oczyszczania [6-10]. Również kiedy wartość ta jest większa od 1, a w oczyszczanym medium znajdują się rozpuszczone gazy bądź cząstki stałe, które umożliwiają zapoczątkowanie procesu kawitacji, może dochodzić do wygenerowania pęcherzy gazowych. Wytworzone pęcherze zbijają się w tzw. chmurę kawitacyjną. Jak wynika z równania 1, liczba kawitacyjna związana jest ściśle z ciśnieniem panującym w układzie. Wraz ze spadkiem lokalnego ciśnienia statycznego w strudze przepływającej cieczy, obniża się również jej temperatura wrzenia (na skutek niższej wartości prędkości pary wymaganej do osiągnięcia wrzenia, odpowiadającej ciśnieniu w układzie), co powoduje wzmożone parowanie i pojawianie się pęcherzy gazowych. Podczas ponownego wzrostu ciśnienia pęcherze „zapadają się” (implodują), generując przy tym ogromną falę uderzeniową o wielkiej sile destrukcyjnej. W czasie nanosekundowej implozji temperatura wewnątrz zapadającego się pęcherzyka może osiągnąć nawet 5000 K, a ciśnienie około 1000 MPa [11-12]. Efekt ten jest często wykorzystywany w technologiach oczyszczania ścieków, ponieważ dodatkowo wspomaga proces degrada-

cji zanieczyszczeń. Umożliwia rozpad cząsteczek wody na rodniki o wysokim potencjale utleniającym, m.in.  $H\cdot$ ,  $HO\cdot$ ,  $HO_2\cdot$ , które reagują z większością zanieczyszczeń organicznych [13].

Kawitacja może być wytworzona zarówno w cieczach będących w ruchu, jak i w stanie spoczynku. Powstaje w pobliżu ścian oraz w pobliżu ciała zanurzonego w cieczy w określonych warunkach. Przykładem może być wprowadzanie do cieczy cząstek stałych. Poprzez ultradźwięki wprowadza się je w wibracje. Wokół wibrujących cząstek ma miejsce obniżenie ciśnienia, co zapoczątkowuje proces generowania pęcherzy gazowych.

Obecnie zjawisko kawitacji stosuje się w wielu branżach technologicznych, w tym m.in. przy [2]:

- produkcji emulsji,
  - oczyszczaniu różnego rodzaju powierzchni,
  - urządzeniach grzewczych o wysokiej sprawności,
  - pompach tłoczących lepkie płyny,
  - zabiegach kosmetycznych, sonicznych szczoteczkach do zębów
- czy też w procesach wspomagających oczyszczanie ścieków.



**Rysunek 1** Schemat powstawania pęcherzy gazowych podczas zjawiska kawitacji hydrodynamicznej z zastosowaniem zwężki Venturiego.

$P_1 / P_3$  – ciśnienie statyczne na wejściu/wyjściu do przewężenia,  $P_2$  – ciśnienie statyczne w przewężeniu,  $P$  – prężność pary nasyconej płynu

**Figure 1** Scheme of formation the cavities using a Venturi tube.

$P_1 / P_3$  – static pressure before/after throat,  $P_2$  – static pressure in throat,  $P$  – vapour pressure of liquid

Ze względu na warunki powstawania i rozwoju pęcherzyków kawitacyjnych, kawitację podzielono na [2]:

- kawitację hydrodynamiczną (przepływową, strumieniową) – spowodowaną spadkiem ciśnienia statycznego cieczy poniżej wartości ciśnienia krytycznego na skutek zmiany warunków ze-

wewnętrznych lub nagłego wzrostu prędkości przepływu,

- parową – powstającą przy ciśnieniu krytycznym; intensywne parowanie cieczy w danej temperaturze powoduje powstawanie niestabilnych pęcherzy wypełnionych głównie parami danej cieczy,
- gazową – spowodowaną dyfuzją gazu do istniejących już w cieczy pęcherzyków gazowych,
- oraz wibracyjną, tzw. sono-kawitację – spowodowaną rozprzestrzenianiem się w cieczy fali akustycznej powodującej spadek ciśnienia i wytworzenie pęcherzy.

W technologii oczyszczania ścieków wykorzystuje się głównie kawitację hydrodynamiczną oraz sono-kawitację.

## **2. KONSTRUKCJE TECHNOLOGICZNE STOSOWANE DO WYWOŁANIA ZJAWISKA KAWITACJI HYDRODYNAMICZNEJ**

Efektywność degradacji zanieczyszczeń z wykorzystaniem zjawiska kawitacji hydrodynamicznej zależy od czterech głównych parametrów [14]:

- ciśnienia na wejściu do elementu konstrukcyjnego, wywołującego wzrost energii kinetycznej przepływającego medium (zwiększenie liniowej prędkości przepływu),
- właściwości fizykochemicznych tłoczonego medium oraz początkowego promienia pęcherza gazowego inicjującego proces kawitacji,
- wymiarów geometrycznych konstrukcji odpowiedzialnej za wywołanie zjawiska kawitacji, a w szczególności stosunku średnic przewężenia i części odprowadzającej
- oraz procentowego odsetka przestrzeni otwartej w przewężeniu (w stosunku do powierzchni zamkniętej), przez którą tłoczy się ciecz.

Konstrukcja przewężenia ma wpływ na zmianę warunków ciśnieniowych podczas przepływu oczyszczanego medium. Umożliwia uzyskanie optymalnego rozkładu ciśnień przed i za elementem kawitacyjnym odpowiedzialnym za wytworzenie w ścieku aktywnej chmury kawitacyjnej (ilość pęcherzy gazowych w określonej objętości przewodu gwarantująca ich swobodną implozję), w której dochodzi do degradacji zanieczyszczenia. Jeśli konstrukcja umożliwia spadek i utrzymanie ciśnienia tłoczenia cieczy w okolicy punktu krytycznego, opisującego prężność pary tłoczonego medium, wówczas możliwe jest wytworzenie chmury pęcherzy kawitacyjnych. Po przejściu cieczy przez strefę kawitacyjną następuje gwałtowny

wzrost ciśnienia, co prowadzi do implozji pęcherzy, powodującej lokalny przyrost ciśnienia i temperatury. Wpływa to pozytywnie na zwiększenie efektywności degradacji zanieczyszczeń.

Na etapie projektowania nowych instalacji kawitacyjnych zwraca się na to szczególną uwagę poprzez zmiany ich geometrii, w tym m.in. średnicy wlotu i wylotu przewężenia, kąta ustawienia przewężenia oraz warunków przepływu cieczy, m.in. stopnia powstających zawirowań i turbulencji. Najczęściej przewężenia kanałowe stanowią różnego rodzaju konstrukcje zwężek Venturiego [15], zaworów dławiących [3] oraz kryz [4] z odpowiednią średnicą otworów, przez które przepływa tłoczone medium. Coraz częściej spotyka się również reaktory hydrokawitacyjno-dynamiczne [5-6], które poprzez ruchy mechaniczne rotorów obniżają ciśnienie oczyszczanej cieczy poniżej wartości odpowiadającej jej prężności pary. Dobór odpowiedniej konstrukcji pozwala osiągnąć efektywność generowania pęcherzy zbliżoną do wyników uzyskiwanych przy zastosowaniu sono-kawitacji [7]. Sono-kawitacja umożliwia osiągnięcie wyższej efektywności degradacji zanieczyszczeń aniżeli hydrokawitacja. Jednakże ze względu na wysokie koszty prowadzenia procesu, związane z dużym zużyciem energii przez reaktory sono-kawitacyjne, poszukuje się konstrukcji przewężeń kanałowych, które pod względem uzyskiwanych efektywności oczyszczania są zbliżone do stosowanych obecnie reaktorów ultradźwiękowych. Umożliwi to redukcję zanieczyszczeń przy niższych nakładach inwestycyjnych i kosztach eksploatacyjnych [3].

### **2.1 Statyczne reaktory hydrokawitacyjne – zwężki Venturiego**

Zwężki Venturiego to przewężenia kanałowe zawdzięczające swoją nazwę włoskiemu fizykowi, Giovanniemu Venturiemu, który w XVIII w. opisał bardzo interesujące zjawisko fizyczne. Zaobserwował on, że ciecz płynąca w zamkniętej instalacji przyspiesza lub zwalnia w zależności od zmiany średnicy przekroju przewodu. W miejscu przewężenia prędkość cieczy wzrasta, natomiast ciśnienie statyczne obniża się. Efekt ten doskonale opisuje prawo zachowania energii opisane przez Bernoulliego. Obecnie najprostsza postać tego prawa, odnosząca się do cieczy idealnej poruszającej się w warunkach ustalonych, mówi o tym, że energia  $E$  cząstek płynu poruszających się w strudze jest stała:

$$E = \text{const dla strug cieczy.} \quad (2)$$

Energia ta opisana jest następującą zależnością:

$$E = \frac{v^2 \rho}{2} + p + hg\rho = \text{const}, \quad (3)$$

gdzie  $v$  – to prędkość przepływu cieczy w rozpatrywanym miejscu,  $p$  – jej ciśnienie,  $\rho$  – gęstość,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $h$  – wysokość w układzie odniesienia uwzględniająca energię potencjalną,  $\rho$  – gęstość cieczy.

Stosując prawo Bernoulliego do określenia zachowania cieczy przepływającej przez przewężenie kanałowe (Rys. 2), można posłużyć się następującą zależnością:

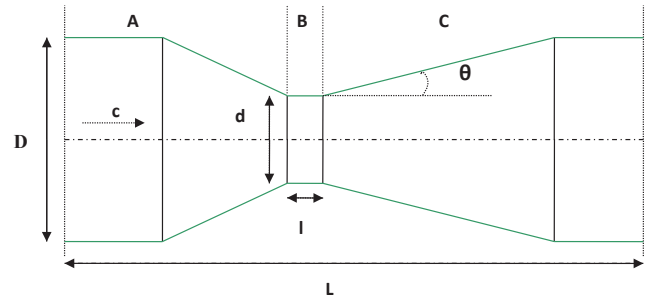
$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + g \sum h_{i, \text{str}}. \quad (4)$$

Zależność ta opisuje energię płynu jako sumę energii: kolejno kinetycznej i potencjalnej, oraz ciśnienia statycznego ( $p_1$  i  $p_2$ ) w analizowanych przekrojach oraz  $\sum h_{i, \text{str}}$  jako energii traconej przez strumień w wyniku oporów przepływu, która jest zamieniana na energię ciepłą w momencie przejścia cieczy przez przewężenie. Kiedy wysokość przewodu po obydwu stronach zwężki jest taka sama, wówczas można pominąć wartość energii potencjalnej tłoczonego płynu i skrócić zależność do następującej postaci (równanie 5), otrzymując tym samym wzór z dokładnym wyjaśnieniem zjawiska wzrostu prędkości przepływu cieczy w przewężeniu, przy jednoczesnym spadku ciśnienia.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \sum h_{i, \text{str}} \quad (5)$$

W instalacjach hydrokawitacyjnych podczas wzrostu prędkości przepływu cieczy w przewężeniu dochodzi do wytworzenia skrajnego podciśnienia. Wówczas, nawet przy niskiej temperaturze, możliwe jest przejście cieczy w stan gazowy i wytworzenie pęcherzy kawitacyjnych. Jednakże odpowiednia konstrukcja i geometria przewężenia umożliwia prowadzenie procesu w dostatecznie kontrolowany sposób. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest wykorzystanie energii implodujących pęcherzy gazowych do degradacji zanieczyszczeń chemicznych i mikrobiologicznych występujących w środowisku wodnym.

Klasyczna zwężka Venturiego to element dławiący składający się ze zbieżnego wlotu zwanego konfuzorem, części walcowej zwanej gardzielą oraz części rozbieżnej zwanej dyfuzorem (Rys. 2).



**Rysunek 2** Schematyczny rysunek zwężki Venturiego:

- A – konfuzor; B – gardziel; C – dyfuzor;
- D – średnica zwężki; d – średnica gardzieli;
- L – długość zwężki; l – długość gardzieli;
- $\theta$  – kąt wyprowadzenia dyfuzora względem gardzieli,
- c – kierunek przepływu tłoczonego medium

**Figure 2** Scheme of Venturi tube:

- A – convergent section; B – throat; C – divergent section;
- D – diameter; d – diameter of throat; L – length;
- l – length of throat;  $\theta$  – half angle of divergent section,
- c – flow direction

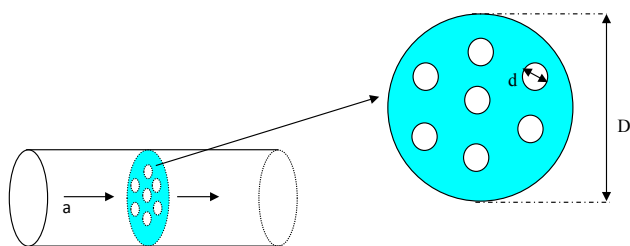
W przypadku zastosowania zwężki Venturiego do wywołania zjawiska kawitacji w celu redukcji zanieczyszczeń organicznych bardzo duży wpływ na przebieg całego procesu oczyszczania ma jej geometria [8-10, 16-18]. Podczas projektowania zwężki zwraca się szczególną uwagę m.in. na średnicę i długość gardzieli czy też kąt wyprowadzenia dyfuzora. Prawidłowe dobranie wymiarów zwężki umożliwi osiągnięcie bardzo efektywnego procesu degradacji – maksymalizacji strefy kawitacji w zwężce oraz ograniczenia spadku ciśnienia na tym elemencie.

Zapoczątkowanie zjawiska kawitacji następuje, kiedy geometria zwężki umożliwia osiągnięcie stosunku ciśnienia wyjścia do wejścia na poziomie 0,8 (wskaźnik ciśnienia krytycznego dla warunków kawitacyjnych). Poniżej tej wartości liniowa prędkość przepływu tłoczonego medium jest stała i niezależna od ciśnienia na wyjściu (ciśnienia w dyfuzorze). Wówczas mówi się o tak zwanym przepływie kawitacyjnym o charakterze turbulentnym. Pęcherzyki gazowe pojawiają się w przestrzeni gardzieli zwężki, a implodują w dyfuzorze. W tych warunkach efektywność generowania rodników hydroksylowych jest najwyższa. Wraz ze wzrostem ciśnienia w dyfuzorze kierunek implozji pęcherzyków przesuwana się w kierunku

gardzieli. Przestrzeń implozji staje się coraz bardziej zawężona. Przy dalszym wzroście ciśnienia w dyfuzorze, a tym samym po przekroczeniu krytycznego wskaźnika ciśnienia 0,8, następuje całkowite zatrzymanie zjawiska kawitacji. Optymalny stosunek średnicy gardzieli do jej długości oraz kąt wyprowadzenia dyfuzora, gwarantujący wysoką efektywność zjawiska kawitacji w utlenianiu zanieczyszczeń organicznych, to kolejno 1:1 oraz  $7^\circ$  [19].

## 2.2 Statyczne reaktory hydrokawitacyjne – kryzy (*ang. orifice*)

Kryzy to kolejne elementy konstrukcyjne, które mogą służyć do dławienia przepływu tłoczonego medium w celu zapoczątkowania zjawiska kawitacji. W odróżnieniu od zwężek Venturiego, które w pewnym odcinku przewodu zmniejszają jego średnicę do odpowiedniej wielkości, kryzy stanowią pewnego rodzaju przeszkodę, blokując przepływ tłoczonej cieczy. Ciecz w pewnym odcinku przewodu może przedostać się dalej tylko za pomocą specjalnie wydzielonych otworów, które charakteryzują się odpowiednią powierzchnią otwartą. Mając na uwadze dane literaturowe, można stwierdzić, że powierzchnia otwarta kryzy to najczęściej 40-60 mm<sup>2</sup> przy całkowitym polu powierzchni kryzy wynoszącym 300-500 mm<sup>2</sup> [20-24]. Odpowiednia liczba i sposób rozmieszczenia otworów w kryzie wpływają na efektywność prowadzonego procesu kawitacji. Przykład kryzy stosowanej do zapoczątkowania zjawiska kawitacji hydrodynamicznej przedstawiono na Rysunku 3.



**Rysunek 3** Przykład kryzy stosowanej do zapoczątkowania zjawiska kawitacji hydrodynamicznej:  
 a – kierunek przepływu tłoczonego medium;  
 D – średnica wewnętrzna kryzy i przewodu;  
 d – średnica wewnętrzna otworu kryzy

**Figure 3** Orifice used to initiate hydrodynamic cavitation:  
 a – flow direction; D – diameter of orifice plate;  
 d – circular hole diameter

Jedną z istotnych wad przewężeń kanałowych stosowanych w celu zapoczątkowania zjawiska hydrokawitacji jest wysoki spadek ciśnienia (opór lokalny) na elemencie konstrukcyjnym. W przypadku kawitacji hydrodynamicznej strata ciśnienia na przewężeniu może sięgać nawet 73% [14]. Uzyskanie wysokiej wydajności kawitacyjnej związane jest głównie z szybkim powrotem ciśnienia cieczy do stanu początkowego, co przekłada się również na większą energię implozji pęcherzyków gazowych. Utrzymanie odpowiedniej wydajności kawitacyjnej w przypadku zastosowania kryzy możliwe jest na dwa sposoby. Pierwszy polega na zwiększeniu ciśnienia tłoczenia oczyszczanego medium, co wiąże się z zastosowaniem drogich, wysokowydajnych pomp oraz konstrukcji zdolnej wytrzymać wysokie ciśnienie. Drugi sposób to projekt geometrii kryzy pozwalający zmniejszyć straty ciśnienia, a tym samym zwiększyć efektywność odzysku ciśnienia początkowego za przewężeniem. Skutkuje to zwiększeniem ilości zdarzeń kawitacyjnych (liczba implodujących pęcherzy gazowych) i poprawą stopnia degradacji zanieczyszczeń organicznych.

Zapewnienie odpowiednich warunków kawitacyjnych przy zastosowaniu kryzy związane jest głównie z zaprojektowaniem odpowiedniej powierzchni otwartej, przez którą będzie przedostawać się tłoczona ciecz, jak również sposobu jej zagospodarowania poprzez rozmieszczenie i odpowiednio dobrane średnice otworów w niej występujących. Przykładem może być konstrukcja przedstawiona w pracy Parsa, który zastosował kryzy o tej samej powierzchni otwartej (50,2 mm<sup>2</sup> w stosunku do całkowitego pola pow. kryzy wynoszącego 6218 mm<sup>2</sup>), lecz różnym rozmieszczeniu otworów (16 otworów o średnicy 2 mm oraz 64 otwory o średnicy 1 mm) do utlenienia Rodaminy B znajdującej się w fazie wodnej [21]. Najlepszy wynik utlenienia Rodaminy B (65,6%) uzyskano dla kryzy o mniejszej liczbie otworów z większą średnicą. W drugim przypadku utleniania efektywność degradacji wyniosła 47,5%. Średnica otworów wpływa przede wszystkim na liczbę powstających pęcherzy gazowych. Wraz z jej wzrostem zwiększa się liczba kawitacyjna. Wykazano, że w warunkach przepływu turbulentnego zależy ona wyłącznie od stosunku średnicy otworów kryzy do średnicy przewodu [25].

### 3. DYNAMICZNE REAKTORY HYDROKAWITACYJNE

Kawitacja hydrodynamiczna może być również generowana za pomocą specjalnie skonstruowanych urządzeń rotacyjnych, takich jak np. wysokociśnieniowe i szybkoobrotowe homogenizatory [7] oraz reaktory kawitacyjne [5-6, 24, 26-28]. W tego typu urządzeniach rozpoczęcie procesu generowania pęcherzy kawitacyjnych możliwe jest dzięki szybkim obrotom rotacyjnym (2200-8000 obr/min) rotora oraz jego konstrukcji geometrycznej, najczęściej o kształcie cylindrycznym z zamocowanymi na powierzchni łopatkami lub wgłębieniami. W porównaniu do konwencjonalnych metod oczyszczania kawitacyjnego, w których stosuje się zwężki, kryzy czy też ultradźwięki, homogenizatory i reaktory kawitacyjne charakteryzują się niską skutecznością kontroli przebiegu procesu kawitacji. Ponadto, urządzenia tego typu charakteryzują się wysokim zużyciem energii elektrycznej [7], co w przełożeniu na oczyszczanie wielu tysięcy metrów sześciennych ścieków generuje olbrzymie koszty eksploatacyjne. Dlatego też, prowadzenie procesu redukcji zanieczyszczeń organicznych w skali przemysłowej przy użyciu tego typu urządzeń jest nieopłacalne ekonomicznie i mało popularne [26].

Homogenizatory oraz reaktory kawitacyjne znalazły zastosowanie głównie przy dezintegracji osadu czynnego [5], w procesach dezynfekcyjnych [7] oraz obniżaniu ładunku zanieczyszczeń ścieków poprodukcyjnych [29]. Efektywność procesu kawitacyjnego w tego typu urządzeniach zależy przede wszystkim od szybkości obrotu rotora, jego geometrii, czasu trwania procesu oraz generowanego lokalnego spadku ciśnienia [29]. W trakcie ruchu obrotowego rotora cząsteczki cieczy znajdujące się najbliżej jego powierzchni osiągają bardzo wysoką prędkość obrotową. Kiedy za sprawą siły odśrodkowej wypadają z przestrzeni otworów czy też przestrzeni okołopatkowej do obszaru o zdecydowanie łagodniejszym charakterze przepływu, przy powierzchni rotora dochodzi do wytworzenia skrajnie wysokiego podciśnienia. Podciśnienie wytworzone dookoła powierzchni rotora umożliwia rozpoczęcie procesu generowania pęcherzy gazowych i ich późniejszą implozję, gwarantującą odpowiednie warunki do degradacji różnego rodzaju zanieczyszczeń [29].

### 4. REAKTORY SONO-KAWITACYJNE

Reaktory sono-kawitacyjne do rozpoczęcia procesu generowania pęcherzyków kawitacyjnych wykorzystują energię ultradźwięków. Ultradźwięki są źródłem energii, która umożliwia zapoczątkowanie procesu wzrostu pęcherzyka, a następnie jego implozję, której towarzyszy lokalny wzrost ciśnienia i temperatury roztworu. Dodatkowo, generowanie fali akustycznej w roztworze powoduje powstawanie lokalnych ruchów turbulentnych oraz mikrocyrkulacji płynu, tzw. „strumieni akustycznych”, które dodatkowo wspomagają procesy fizyko-chemiczne zachodzące w roztworze, ograniczając znacząco opory wymiany masy (przenikania zanieczyszczeń z fazy wodnej do obszaru bąbli kawitacyjnych) [26]. Zjawiska te przyczyniają się do wzrostu efektywności generowania rodników hydroksylowych oraz transportu cząsteczek cieczy i zanieczyszczeń w niej występujących w okolice implodujących pęcherzyków, co powoduje wysoki stopień utlenienia zanieczyszczeń organicznych.

Reaktory sono-kawitacyjne znalazły szerokie zastosowanie m.in.: w syntezie chemicznej, biotechnologii, oczyszczaniu strumieni odpadowych (m.in. ścieków poprodukcyjnych), degradacji materiałów polimerowych czy też w przemyśle petrochemicznym [30]. W przypadku oczyszczania strumieni odpadowych reaktory sono-kawitacyjne gwarantują obecnie jeden z najwyższych stopni redukcji zanieczyszczeń [27, 31]. Efektywność procesu w dużej mierze zależy od liczby i typu zastosowanych przetworników, częstotliwości pracy wzbudników (najczęściej 20-520 kHz), natężenia prądu (do 70 A) czy też umiejscowienia przetworników w reaktorze [11-12, 25-26]. Umożliwia to uzyskanie stopnia dużej liczby zdarzeń kawitacyjnych generowanych w całej objętości. Najczęściej stosowane są dwa typy reaktorów sono-kawitacyjnych, które różnią się rodzajem i umiejscowieniem przetwornika. Pierwszy typ to reaktor z zanurzoną głowicą (wzbudnikiem) ultradźwiękowym (ang. *Ultrasonic Horn*) [32]. Posiada on cylindryczną sondę umieszczoną bezpośrednio w roztworze. Sonda – najczęściej wykonana z metalu przewodzącego, np. tytanu – poprzez drgania spowodowane przepływającym prądem wysyła do roztworu falę akustyczną. Kiedy skupi się energię fali na małej powierzchni sondy, w roztworze dochodzi do wytworzenia zjawiska sono-kawitacji poprzez lokalne wzrosty/spadki ciśnienia i tempe-

ratury roztworu. Drugim typem reaktora sono-kawitacyjnego jest tzw. „łaźnia ultradźwiękowa”. W tym przypadku przetworniki umieszczone są pod zbiornikiem z roztworem, a energia akustyczna dociera pośrednio do medium poprzez ścianki zbiornika [33]. Szczegółowe badania na temat reaktorów sono-kawitacyjnych przedstawiono w pracy Csoka [34]. Wykazano, że pole powierzchni sondy generującej falę akustyczną ma wpływ na efektywność pracy przetwornika. Im przetwornik znajduje się bliżej roztworu, tym efektywność jego pracy jest większa. Dlatego też najlepszy rozkład aktywności kawitacyjnej w objętości roztworu uzyskuje się dla reaktorów z horyzontalną

sondą zanurzoną bezpośrednio w roztworze, która ma największą powierzchnię drgań i generuje najbardziej intensywną falę akustyczną. Liczba i umiejscowienie przetworników w reaktorach sono-kawitacyjnych powinna być dobierana przede wszystkim w odniesieniu do średnicy reaktora oraz wysokości słupa cieczy w nim się znajdującej. Najczęściej badania prowadzi się przy dostarczaniu do roztworu mocy na poziomie 0,03-200 W/l [3, 27, 30]. Wówczas możliwe jest osiągnięcie maksymalnej wydajności kawitacyjnej rozdysponowanej w całej objętości cieczy, co znacząco wpływa na zwiększenie efektywności procesu utleniania zanieczyszczeń organicznych [30].

**Tabela 1** Przykłady metod degradacji zanieczyszczeń w środowisku wodnym wykorzystujących zjawisko kawitacji  
**Table 1** Review of the cavitation-treatment methods

Zanieczyszczenie	Rodzaj kawitacji – szczegóły metody	Optymalne warunki utleniania	Efektywność utleniania	Literatura
1,4-dioksan, 1 mM	<b>Sono-kawitacja –</b> wzbudnik	pH= 7,5; T= 25°C; t= 120 min, V= 0,5 L; wzbudnik: 358 kHz, 128 W, gęstość prądu 5,1 Wcm <sup>-2</sup>	Stopień degradacji zanieczyszczenia 95%	[13]
Pestycyd: Metomyl, 25 ppm	<b>Kawitacja hydrodynamiczna –</b> zwężka (dł. 105 mm): gardziel – φ2 mm, konfuzor i dyfuzor – φ17 mm, kąt wyprowadzenia dyfuzora/konfuzora – 22,61°/6,4°	pH= 2,5; T= 20°C; t= 120 min; P <sub>1</sub> = 5 bar; L <sub>k</sub> = 0,18, V <sub>1</sub> = 5L; Metomyl:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1:30; Metomyl:FeSO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1:1:30; O <sub>3</sub> podawanie 2 gh <sup>-1</sup>	Obniżenie wskaźnika OWO: KH 5,45%	[15]
Dezynfekcja wody o zanieczyszczeniu mikro-biologicznym, 4000-7000 k.b/L	<b>Kawitacja hydrodynamiczna –</b> zawór kulowy  <b>Sono-kawitacja –</b> wzbudnik  <b>Homogenizator szybkoobrotowy –</b> 8000 obr/s; V= 1L  <b>Homogenizator wysokociśnieniowy –</b> 345 bar; V= 1L	Kawitacja hydrodynamiczna: t= 20 min; V= 75 L; P <sub>1</sub> = 3,44 bar  Sono-kawitacja – wzbudnik 22 kHz, 240 W; t= 20 min; V= 50 mL	Obniżenie zawartości bakterii: KH 31% Sono-kaw 85% H. szybkoobrotowy 95% H. wysokociśnieniowy 87%	[10]
Insektycyd organofosforowy: paration metylowy, 20 ppm	<b>Sono-kawitacja -</b> wzbudnik	pH= 2,5; T= 30°C; t= 60 min, V= 3,2 L; wzbudnik: 20 kHz, 270 W; paration:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1:10  paration:CCL <sub>4</sub> 1:25; FeSO <sub>4</sub> :H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 3:1; paration:TiO <sub>2</sub> 1:1	Obniżenie zawartości zanieczyszczenia: Sono.k 10,2%	[27]
Rodamina B, 5 mg/L	<b>Kawitacja hydrodynamiczna –</b> kryza, o grubości 1 mm, z 32 otworami φ 1 mm, o łącznej powierzchni otwartej 25,1 mm <sup>2</sup> i obwodzie otworów 100,5 mm	pH= 3; T= 25°C; t= 120 min; P <sub>1</sub> = 5,8 bar; L <sub>k</sub> = 0,27, V= 30 L; H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 0,28 mgL <sup>-1</sup> ; Fe <sup>2+</sup> 9,0 mgL <sup>-1</sup>	Obniżenie zawartości zanieczyszczenia o 71% (po 600 cyklach przejścia roztworu przez kryzę)	[21]

## 5. STATYCZNE I DYNAMICZNE REAKTORY HYDROKAWITACYJNE ORAZ SONO-KAWITACYJNE W PROCESACH OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW

Reaktory sono-kawitacyjne gwarantują obecnie największy stopień redukcji zanieczyszczeń organicznych znajdujących się w fazie wodnej w stosunkowo krótkim czasie (0,5 – 2 h) spośród dostępnych reaktorów „kawitacyjnych”. Najczęściej stosowane moce wzbudzenia przy utlenianiu zanieczyszczeń organicznych mieszczą się w przedziale od 40 do nawet 750 W przy częstotliwości wzbudzenia 20-520 kHz, co gwarantuje utlenienie zanieczyszczeń organicznych na poziomie 30-60% [1, 7, 11-13, 26-27, 29-30, 37-38]. Jednakże, ze względu na bardzo wysokie koszty zużycia energii w tego typu procesach, zwiększających koszt oczyszczania niemal 3-krotnie, w porównaniu do procesu kawitacji hydrodynamicznej, procesy tego typu znajdują zastosowanie najczęściej w oczyszczaniu ścieków w skali laboratoryjnej (oczyszczanie roztworów do 500 mL) [30]. Przy oczyszczaniu znacznie większych ilości ścieków najlepszym rozwiązaniem pozostaje zjawisko kawitacji hydrodynamicznej wywołane za pomo-

cą kryzy lub zwężki. Oczyszczane objętości ścieków osiągają nawet 150 L, gwarantując efektywność utlenienia zanieczyszczeń organicznych na poziomie 10-37% [35]. Najczęściej czas potrzebny do osiągnięcia efektywności powyżej 20% wynosi ponad 3 h ciągłego prowadzenia procesu [2-8, 14-15]. Oznacza to wielokrotną cyrkulację oczyszczanego strumienia przez element kawitacyjny. Należy zaznaczyć, że obecnie zjawisko kawitacji stosowane do oczyszczania ścieków z zanieczyszczeń organicznych wspomaga się dodatkowymi zaawansowanymi metodami utleniania takimi jak: proces Fentona [2], naświetlanie ścieku lampami UV [36] czy też dodatkiem silnych utleniaczy, m.in. nadtlenu wodoru albo ozonu [1]. Umożliwia to przeprowadzenie utlenienia zanieczyszczeń na bardzo wysokim poziomie efektywności 70-100% w znacznie krótszym czasie (1 – 2 h).

### Podziękowania

Praca naukowa finansowana w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „luventus Plus” w latach 2015-2017, nr projektu 0040/IP2/2015/73.

## LITERATURA

- [1] Wu C. D., Zhang Z. L., Wu Y., Wang L., Chen L. J., Effects of operating parameters and additives on degradation of phenol in water by the combination of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and hydrodynamic cavitation, *Desalin. Water Treat.*, 53, (2015), 462-468.
- [2] Raut-Jadhav S., Kumar Saharan V., Pinjari D., Sonawane S., Saini D., Pandit A., Synergetic effect of combination of AOP's (hydrodynamic cavitation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) on the degradation of neonicotinoid class of insecticide, *J. Hazard. Mater.*, 261, (2013), 139-147.
- [3] Moholkar V. S., Senthilkumar P., Pandit A. B., Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects, *Ultrason. Sonochem.*, 6, (1999), 53-65.
- [4] Badve M. P., Bhagat M. N., Pandit A. B., Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation, *Sep. Purif. Technol.*, 151, (2015), 31-38.
- [5] Petkovšek M., Mlakar M., Levstek M., Strazar M., Širok B., Dular M., A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration, *Ultrason. Sonochem.*, 26, (2015), 408-414.
- [6] Petkovšek M., Zupanc M., Dular M., Kosjek T., Heath E., Kompare B., Širok B., Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment, *Sep. Purif. Technol.*, 118, (2013), 415-423.



- [7] Jyoti K. K., Pandit A. B., Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation, *Biochem. Eng. J.*, 7, (2001), 201-212.
- [8] Ashrafizadeh S. M., Ghassemi H., Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis, *Flow Meas. Instrum.*, 42, (2015), 6-15.
- [9] Xiong Y., Peng F., Optimization of cavitation venturi tube design for pico and nano bubbles generation, *Int. J. Mining Sci. Tech.*, 25, (2015), 523-529.
- [10] Ghassemi H., Fasih H. F., Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter, *Flow Meas. Instrum.*, 22, (2011), 406-412.
- [11] Song Y. L., Li J. T., Degradation of C.I. Direct Black 168 from aqueous solution by fly ash/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> combining ultrasound, *Ultrason. Sonochem.*, 16, (2009), 440-444.
- [12] Doktycz S. J., Suslick K. S., Interparticle collisions driven by ultrasound, *Sonochemistry, Sci.* 247, (1990), 1067-1069.
- [13] Beckett M. A., Hua I., Elucidation of the 1,4-Dioxane Decomposition Pathway at Discrete Ultrasonic Frequencies, *Environ. Sci. Technol.*, 34, (2000), 3944-3953.
- [14] Gogate P. R., Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes, *Adv. Env. Res.*, 6, (2002), 335-358.
- [15] Raut-Jadhav S., Saini D., Sonawane S., Pandit A., Effect of process intensifying parameters on the hydrodynamic cavitation based degradation of commercial pesticide (methomyl) in the aqueous solution, *Ultrason. Sonochem.*, 28, (2016), 283-293.
- [16] Jain T., Carpenter J., Saharan V. K., CFD analysis and optimization of circular and slit venturi for cavitation activity, *J. Mater. Sci. Mech. Eng.*, 1, (2014), 28-33.
- [17] Bashir T. A., Soni A. G., Mahulkar A. V., Pandit A. B., The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity, *Can. J. Chem. Eng.*, 89, (2011), 1366-1375.
- [18] Ulas A., Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi, *Flow Meas. Instrum.*, 17, (2006), 94-97.
- [19] Jain T., Carpenter J., Saharan V. K., CFD analysis and optimization of circular and slit venturi for cavitation activity, *J. Mater. Sci. Mech. Eng.*, 1, (2014), 28-33.
- [20] Materiały konferencyjne: Sivakumar M., Pandit A. B., Hydrodynamic Cavitation assisted Degradation of Rhodamine B: A Technologically viable Wastewater Treatment technique, International conference on Science and Technology under Chemical Society of Canada, October 12-13, 2000, New Delhi, India.
- [21] Parsa J. B., Zonouzian S. A. E., Optimization of a heterogeneous catalytic hydrodynamic cavitation reactor performance in decolorization of Rhodamine B: Application of scrap iron sheets, *Ultrason. Sonochem.*, 20, (2013), 1442-1449.
- [22] Bagal M. V., Gogate P. R., Degradation of 2,4-dinitrophenol using a combination of hydrodynamic cavitation, chemical and advanced oxidation processes, *Ultrason. Sonochem.*, 20, (2013), 1226-1235.
- [23] Jung K., Hwang M., Yun Y., Cha M., Ahn K., Development of a novel electric field-assisted modified hydrodynamic cavitation system for disintegration of waste activated sludge, *Ultrason. Sonochem.*, 21, (2014), 1635-1640.
- [24] Badve M., Gogate P., Pandit A., Csoka L., Hydrodynamic cavitation as a novel approach for wastewater treatment in wood finishing industry, *Sep. Purif. Technol.*, 106, (2013), 15-21.
- [25] Yan Y., Thorpe R. B., Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice, *Int. J. Multiphase Flow*, 16, (1990), 1023-1045.
- [26] Gogate P. R., Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: a critical review, *Chem. Eng. Process.*, 47, (2008), 515-527.
- [27] Shriwas A. K., Gogate P. R., Ultrasonic degradation of methyl Parathion in aqueous solutions: intensification using additives and scale up aspects, *Sep. Purif. Technol.*, 79, (2011), 1-7.
- [28] Badve M. P., Alpar T., Pandit A. B., Gogate P. R., Csoka L., Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies, *Ultrason. Sonochem.*, 22, (2015), 272-277.

- [29] Petkovšek M., Mlakar M., Levstek M., Strazar M., Širok B., Dular M., A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration, *Ultrason. Sonochem.*, 26, (2015), 408-414.
- [30] Asgharzadehahmadi S., Raman A. A. A., Parthasarathy R., Sajjadi B., Sonochemical reactors: Review on features, advantages and limitations, *Renew. Sustain. Energy. Rev.*, 63, (2016), 302-314.
- [31] Neppolian B., Jung H., Choi H., Lee J. H., Kang J.-W., Sonolytic degradation of methyl tert-butyl ether: the role of coupled fenton process and persulphate ion, *Water Res.*, 36, (2002), 4699-4708.
- [32] Liu D., Vorobiev E., Savoie R., Lanoisellé J. L., Comparative study of ultrasound-assisted and conventional stirred dead-end microfiltration of grape pomace extracts, *Ultrason. Sonochem.*, 20, (2013), 708-714.
- [33] Lee I., Han J., The effects of waste-activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production, *Ultrason. Sonochem.*, 20, (2013), 1450-1455.
- [34] Csoka L., Katekhaye S. N., Gogate P. R., Comparison of cavitation activity in different configurations of sonochemical reactors using model reaction supported with theoretical simulations, *Chem. Eng. J.*, 178, (2011), 384-390.
- [35] Angaji M. T., Ghiaee R., Decontamination of unsymmetrical dimethylhydrazine waste water by hydrodynamic cavitation-induced advanced Fenton process, *Ultrason. Sonochem.*, 23, (2015), 257-265.
- [36] Grcic I., Obradovic M., Vujevic D., Koprivanac N., Sono-Fenton oxidation of formic acid/formate ions in an aqueous solution: from an experimental design to the mechanistic modeling, *Chem. Eng. J.*, 164, (2010), 196-207.
- [37] Patil P. N., Bote S. D., Gogate P. R., Degradation of imidacloprid using combined advanced oxidation processes based on hydrodynamic cavitation, *Ultrason. Sonochem.*, 21, (2014), 1770-1777.
- [38] Zupanc M., Kosjek T., Petkovšek M., Dular M., Kompore B., Širok B., Strazar M., Heath E., Shear-induced hydrodynamic cavitation as a tool for pharmaceutical micropollutants removal from urban wastewater, *Ultrason. Sonochem.*, 21, (2014), 1213-1221.