



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ HYDRODYNAMICKÉ KAVITACE PRO ČIŠTĚNÍ
VODY**

UTILIZATION OF HYDRODYNAMIC CAVITATION FOR WATER TREATMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Balko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Marek Balko**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití hydrodynamické kavitace pro čištění vody

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydrodynamická kavitace (tj. nejprve vznik a poté kolaps bublinek páry vznikajících při velmi nízkém tlaku v kapalině) dokáže poškozovat buňky živých organismů nebo ovlivňovat chemické reakce. Toho lze využít např. při desinfekci vody od patologických mikroorganismů nebo při odstraňování chemikálií z odpadních vod (např. reziduí léčiv).

Cíle bakalářské práce:

Cílem je výzkum zařízení pro čištění vody od biologického nebo chemického znečištění s využitím hydrodynamické kavitace.

Parciální cíle: rešerše v dané oblasti, návrh a provedení experimentu v kombinaci hydrodynamické kavitace s tzv. advanced oxidation process (např. příměs ozonu nebo peroxidu vodíku).

Seznam doporučené literatury:

GAGOL, Michal, Andrzej PRZYJAZNY a Grzegorz BOCZKAJ. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review. Chemical Engineering Journal. 2018, (338), 599-627.

GOGATE, P.R. a P.N. PATIL. Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes. Ultrasonic Sonochemistry. 2015, 25, 60-69.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje zkoumání vlastností kavitace s důrazem na kavitaci hydrodynamickou a jejímu využití pro odstraňování nežádoucích a špatně odbouratelných chemických sloučenin z vody. Díky vysokým teplotám a tlakům přítomným u zániku kavitačních bublin dochází k rozkladu vody na vysoce reaktivní hydroxylové radikály, které jsou schopny rozložit i špatně odbouratelné sloučeniny. Tento jev může být nadále posílen využitím pokročilých oxidačních procesů, v anglické literatuře nazývaných advanced oxidation process – AOP. Experimentální část práce je zaměřena na zkoumání schopnosti hydrodynamické kavitace odbourávat konkrétní chemickou látku z vody – estrogen.

Abstract

This bachelor thesis deals with the observation of features of cavitation with emphasis on the hydrodynamical cavitation and its use for eliminating unwanted and badly degradable compounds from water. Thanks to high temperature and pressures that are present at a collapse of cavitation bubbles the water decomposes into highly reactive hydroxyl radicals which are able to decompose even. This effect can furthermore be strengthened by the use of advanced oxidation processes – AOP. The experimental part of thesis is dedicated to examining a ability of hydrodynamical cavitation degrade particular chemical substance from water, namely estrogen.

Klíčová slova

kavitace, hydrodynamická kavitace, čištění vody, estrogen

Key words

cavitation, hydrodynamic cavitation, water cleaning, estrogen

Bibliografická citace

BALKO, Marek. *Využití hydrodynamické kavitace pro čištění vody*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117997>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci na téma „Využití hydrodynamické kavitace pro čištění vody“ jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených na konci práce.

V Brně dne

.....

Marek Balko

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost a cenné rady v průběhu psaní této práce. Dále děkuji doc. Mgr. Pavlu Šťahelovi, Ph.D. z Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity za poskytnutí laboratoře pro provedení měření a Ing. Elišce Maršákové, PhD. z Botanického ústavu Akademie věd ČR za pomoc při vyhodnocování odebraných vzorků z měření.

Obsah

1. Úvod.....	14
2. Kavitace	15
2.1. Podstata kavitačního jevu [2]	15
2.2. Kavitační jádro, kavitační bublina [2].....	15
2.3. Kritický poloměr, kritický tlak [2]	16
2.3.1. Heterogenní nukleace [1].....	17
2.4. Vývoj kavitace [2]	18
2.5. Kavitační oblast [2]	18
2.6. Typy kavitace [2]	18
2.6.1. Typy kavitace podle stupně vyvinutí.....	18
2.6.1.1. Plně vyvinutá kavitace	18
2.6.1.2. Částečně vyvinutá kavitace.....	19
2.6.1.3. Superkavitace	19
2.6.2. Typy kavitace podle její podstaty	20
2.6.2.1. Hydrodynamická kavitace.....	20
2.6.2.1.1. Vířová kavitace	20
2.6.2.2. Pseudokavitace.....	20
2.6.2.3. Plynová kavitace	21
2.6.2.4. Akustická kavitace	21
2.6.2.5. Vibrační kavitace	21
2.7. Kavitační parametr [2], [5].....	21
2.7.1. Kavitační parametr počátku kavitace σ_{vi}	22
2.8. Rayleigh-Plessetova rovnice [5].....	22
2.8.1. Počáteční a okrajové podmínky.....	23
2.8.2. Odvození Rayleigh-Plessetovi rovnice.....	23
2.8.3. Rayleigh-Plessetova rovnice – energetická bilance.....	24
2.9. Zánik kavitační bubliny [1]	24
2.9.1. Kavitační eroze [2]	27
2.9.2. Tepelné děje při zániku kavitační bubliny [1]	27
2.9.3. Sonoluminescence [1].....	28
2.10. Další faktory ovlivňující kavitaci [2].....	28

3. Využití kavitace pro čištění vody.....	29
3.1. Problematika čištění vody	29
3.2. Možné způsoby čištění vody	29
3.2.1. Pokročilé oxidační procesy.....	29
3.2.1.1. Peroxid vodíku – H ₂ O ₂	29
3.2.1.2. Ozon – O ₃	30
3.2.2. Hydrodynamická kavitace	30
3.2.2.1. Způsoby iniciace hydrodynamické kavitace [8]	31
3.2.3. Akustická kavitace.....	32
3.2.3.1. Způsoby iniciace akustické kavitace [8]	33
3.3. Hybridní způsoby čištění vody.....	33
3.3.1. Peroxone [8, 10]	33
3.3.2. Hydrodynamicko-akustická kavitace [13].....	33
3.3.3. Kavitace + pokročilé oxidační procesy [10].....	34
3.4. Možnosti použití hybridních metod pro čištění vody [8, 10]	34
4. Odbourávání estrogenu z vody pomocí hydrodynamické kavitace	36
4.1. Příprava experimentu	36
4.2. Průběh experimentu.....	37
4.3. Analýza měřených vzorků.....	38
4.4. Výsledky měření	39
4.5. Zhodnocení výsledků měření	40
5. Závěr	41
6. Použité zdroje.....	42

1. Úvod

Hydrodynamická kavitace je většinou považována za nežádoucí jev, protože kvůli ní dochází k rychlému opotřebení materiálu na důležitých mechanických součástech hydraulických strojů, které může vést až k odlomení součásti a zničení celého mechanismu. Tuto práci však budeme věnovat snaze využít vlastnosti kavitace pro užitečné účely – konkrétně pro odstranění nežádoucích a špatně rozložitelných chemických sloučenin z vody, což vede k jejímu čištění.

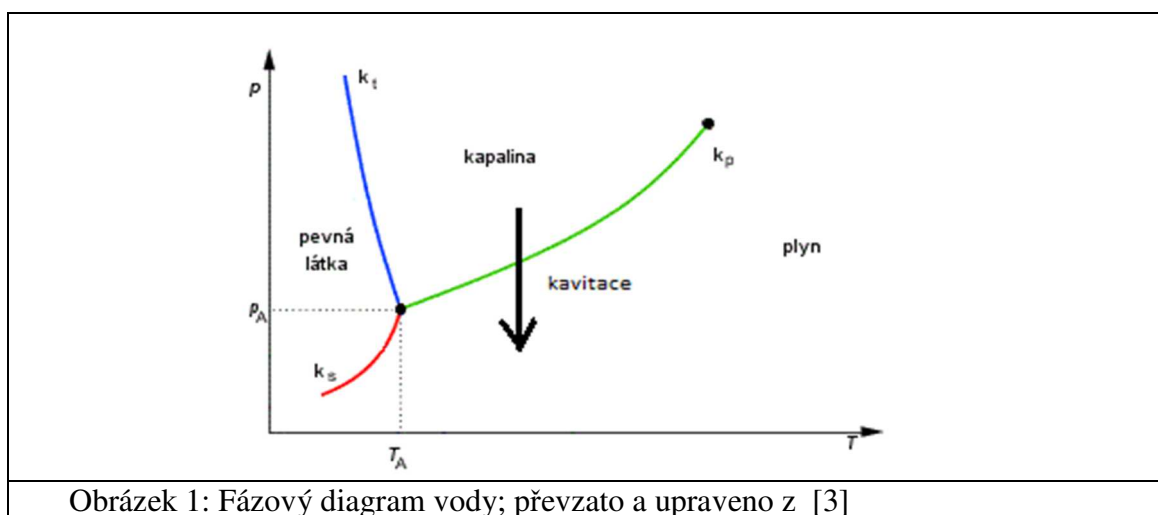
První část práce má rešeršní charakter. Je věnována především fyzikální podstatě kavitace, principu jejího vzniku a jejímu popisu pomocí Rayleigh-Plessetovy rovnice. Dále zde bude popsáno rozdělení různých typů kavitace v závislosti na odlišných způsobech jejího vyvolání.

Druhá část práce je věnována různým možnostem využití kavitace pro čištění vody, porovnání jednotlivých metod, použití hybridních kavitačních metod, pokročilým oxidačním procesům a jejich kombinaci s kavitací hydrodynamickou i akustickou.

V závěrečné kapitole práce je popsáno provedení praktického experimentu, jehož cílem bylo prokázat schopnost hydrodynamické kavitace odbourávat z vody špatně odstranitelné látky. Tento pokus byl konkrétně zaměřen na rozklad chemické látky estrogeneru.

2. Kavítace

Kavítace je fyzikální děj spojený s přeměnou kapalného skupenství na plynné. Z fázového diagramu vody můžeme vidět, že přechodu z kapaliny na plyn můžeme docílit dvěma způsoby. Zaprvé zvýšením teploty – dodáním dostatečného tepla do systému, nebo zadruhé snížením tlaku při konstantní teplotě. Děj zvýšení teploty kapaliny na teplotu potřebnou ke změně skupenství v celém objemu kapaliny nazýváme varem. Pokud přeměny skupenství dosáhneme snížením tlaku pod kritickou hodnotu, děj nazveme kavítací. [1]



2.1. Podstata kavitačního jevu [2]

Kavítace v kapalině představuje narušení její spojitosti vznikem, postupným vývojem a zánikem kavitačních dutin – bublin.

Vznik kavítace je podmíněn dosažením určitého stavu v kapalině v daném místě. Tento stav je určen především tlakem a teplotou kapaliny. Při poklesu tlaku v daném místě na hodnotu nazývanou kavitační tlak a při dané teplotě kapaliny začíná docházet k porušení spojitosti kapaliny. Vzniká první pozorovatelná kavitační bublina. Pokud hodnota tlaku kapaliny zůstává stejná nebo nadále klesá, kavitační bublina se bude dále zvětšovat.

Kavitační bubliny mohou vznikat i v proudící kapalině, kde se přemísťují z oblastí kavitačního tlaku do míst s vyšším tlakem. Při tomto přemístění se bublina prudce zmenšuje až dochází k jejímu zániku – kavitační bublina imploduje. V případě, kdy tyto bubliny dlouhodobě zanikají v blízkosti obtékané stěny nebo na stěně samotné, dochází k poškození materiálu stěny působením kavítace. Tento jev se nazývá kavitační eroze.

2.2. Kavitační jádro, kavitační bublina [2]

V místech s porušenou soudržností kapaliny vznikají kavitační bubliny. Pro narušení této soudržnosti je nezbytné překonat kohezní síly molekul, které se projevují pevností kapaliny v tahu. Molekuly musí být na některých místech odtrženy od sebe. Kapaliny můžeme rozlišovat podle jejich čistoty, která má přímý vliv na jejich pevnost. Například absolutně čistá voda dosahuje tahové pevnosti 1 013 MPa. Skutečná kapalina však vždy obsahuje různé příměsi.

Těmi mohou být například pevné částičky nebo bubliny nerozpuštěných plynů. Proto je pevnost skutečné kapaliny vždy nižší než pevnost absolutně čisté kapaliny.

Největší vliv na snížení pevnosti kapaliny mají především volné nerozpuštěné plyny. Tyto plyny tvoří kavitační jádra. Mez pevnosti kapalin není snižována mechanickými částičkami, které jsou dobře smáčivé kapalinou, pokud fázové rozhraní mezi kapalinou a pevnou částičkou je schopné přenášet napětí větší než kohezní síla.

Kavitační jádra tvořená volnými nerozpuštěnými plyny můžeme nalézt v mikroskopických trhlinách na povrchu obtékaných stěn nebo také na mikroskopických částičkách obsažených v kapalině.

Jako kavitační jádro mohou fungovat i bubliny plynů, které mohou v kapalině existovat i za normálních podmínek. Tyto bubliny nedifundují do kapaliny ani se nevznosí k hladině.

2.3. Kritický poloměr, kritický tlak [2]

Snižováním tlaku v kapalině p_K ovlivňujeme velikost poloměru kavitační bubliny r_B . S klesajícím tlakem se poloměr bubliny pozvolna zvětšuje až do momentu, kdy tlak v kapalině dosáhne kritické hodnoty p_{kr} . Tento tlak odpovídá napětí par p_w . Poloměr kavitační bubliny při tomto tlaku rovněž dosahuje kritické velikosti r_{kr} . Další snižování tlaku vede k explozivnímu zvětšování bubliny.

Ze vztahu závislosti rovnovážného tlaku v kapalině na poloměru bubliny

$$p_K = p_w + \left(p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B}$$

můžeme určit kritický poloměr bubliny p_{kr} , kdy tato bublina začne expanzivně růst, pomocí extrémní funkce za podmínky:

$$\frac{\partial p_K}{\partial r_{B0}} = 0$$

Vztah potom přejde do tvaru pro kritický poloměr

$$r_{kr} = r_{B0} \left(\frac{3r_{B0}}{2\sigma} p_{v0} \right)^{1/2}$$

Kde

$$p_{v0} = p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}}$$

Dosazením vztahu pro kritický poloměr do vztahu původní závislosti můžeme získat vztah pro kritický tlak v okolní kapalině.

$$p_{kr} = p_w - \frac{2}{3} \frac{2\sigma}{r_{B0}} \left(\frac{2\sigma}{3r_{B0}} \frac{1}{p_{v0}} \right)^{\frac{1}{2}} = p_w - \frac{2}{3} \frac{2\sigma}{r_{kr}}$$

Vztah pro kritický poloměr pak můžeme vyjádřit i v závislosti na kritickém tlaku.

$$r_{kr} = \frac{4\sigma}{3(p_w - p_{kr})}$$

Díky těmto vztahům můžeme říci, že hodnota kritického tlaku je tím nižší, čím menší je počáteční poloměr kavitačního jádra r_{B0} . Tomuto tlaku odpovídá kavitační tlak, který určuje vznik kavitace. Ze vztahu pro kritický poloměr také vyplývá, že poloměr p_{kr} je úměrný počátečnímu poloměru bubliny r_{B0} .

2.3.1. Heterogenní nukleace [1]

Heterogenní nukleace nastává na rozhraní mezi kapalinou a obtékanou stěnou. Jako nukleační jádra zde mohou figurovat nerovnosti povrchu stěny a mikroskopické trhliny ve stěně. Rozhraní mezi kapalinou, stěnou a kavitační bublinou má přímý vliv na povrchové napětí bubliny. Proto do vztahu pro rovnováhu tlaků v bublině přidáme funkci úhlu θ svíraného mezi pevnou stěnou a kavitační bublinou. Vztah poté přejde do tvaru:

$$p_B = p_K + \frac{2\sigma \sin \theta}{r_B}$$

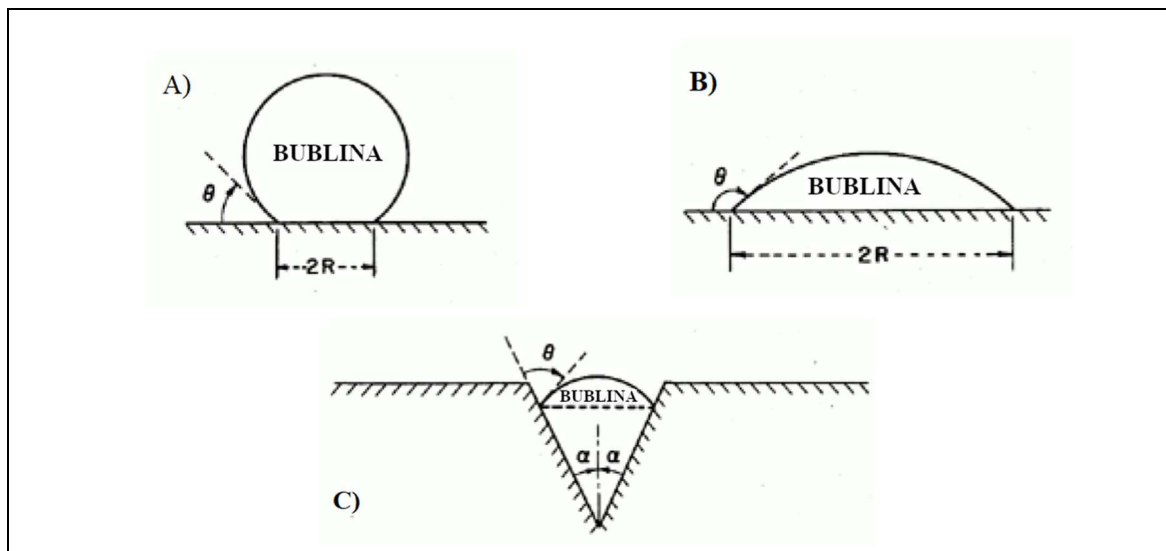
Vezmeme v potaz tři případy rozhraní kapaliny, stěny a bubliny.

V případě A máme povrch stěny z hydrofilního materiálu. Úhel θ mezi pevnou stěnou a kavitační bublinou se pohybuje v rozmezí $0 < \theta < \pi/2$. Pro úhly θ blízké $\pi/2$ můžeme tento případ nukleace považovat za homogenní, neboť rozměrově jsou srovnatelné.

V případě B je povrch stěny vyroben z materiálu hydrofobního. Úhel θ mezi stěnou a bublinou leží v rozmezí $\pi/2 < \theta < \pi$. Přítomnost hydrofobního materiálu má podstatný vliv na snížení povrchového napětí kavitační bubliny.

Ve třetím případě C vezmeme v potaz lokální geometrii stěny. Jako kavitační jádro zde slouží kuželovitá dutina v povrchu pevného materiálu, kde polovinu vrcholového úhlu označíme jako α . Lze zde dosáhnout nulového povrchového napětí bubliny pro případ, kdy úhel $\theta = \alpha + \pi/2$. Dále pokud bude úhel $\theta > \alpha + \pi/2$, kavitační bublina bude růst tak, aby zaplnila prostor dutiny s tlakem vyšším, než je tlak par. V případě, kdy průměr dutiny leží v řádu $10^{-5}m$, potřebné napětí pro expanzi bubliny mimo pevnou obálku kuželové trhliny do objemu kapaliny bude pouze desetina tlaku atmosféry.

Specifická místa na povrchu s optimální geometrií umožňující růst kavitačních bublin do makroskopických rozměrů nazýváme nukleačními oblastmi.



Obrázek 3: Různé typy heterogenní nukleace

A – stěna z hydrofilního materiálu ($\theta < \pi/2$);

B – stěna z hydrofobního materiálu ($\theta > \pi/2$)

C – kuželová dutina ve stěně; převzato a upraveno z [1]

2.4. Vývoj kavitace [2]

Kavitační jádra o různých počátečních velikostech jsou v kapalině obsažena ve velkém množství. Pokud dosáhneme určitého kavitačního tlaku – kritického tlaku – kavitační jádra o stejné velikosti budou explozivně růst současně. Pro nárůst jádra do kritické velikosti je potřeba, aby kavitační jádro zůstalo v oblasti kavitačního tlaku po určitou dobu. Tato doba se řádově pohybuje od desítek mikrosekund po stovky milisekund. Mohou tedy nastávat případy, kdy jádra proběhnou oblastí s kavitačním tlakem rychleji než stačí dorůst do kritické velikosti. U těchto kavitačních jader nedojde k explozivnímu růstu.

Při obtékání stěny kapalinou vzniká kavitace asi uprostřed mezní vrstvy, a to za vyššího tlaku, než je tlak sytých par. Toto je zaprvé vysvětleno tím, že kavitační jádra sídlí na povrchu obtékaného tělesa, dále pak přítomností vírů v turbulentní vrstvě. Tyto víry do sebe vtahují kavitační jádra a kvůli nižšímu tlaku uvnitř víru dochází ke vzniku kavitační bubliny. Okamžik, kdy kavitační jádro dosáhne kritické velikosti a začne explozivně růst jako kavitační bublina, je nazýván počátek kavitace.

2.5. Kavitační oblast [2]

Kavitační oblastí v kapalině nazýváme shluk kavitačních bublin. Tato oblast je ohraničena buď kompletně kapalinou, nebo kapalinou a pevnou stěnou.

Podle charakteristického tvaru nebo místa výskytu můžeme rozlišit několik různých typů kavitačních oblastí:

- Kapsovitá kavitační oblast – vytváří se za obtékanými tělesy
- Plošná kavitační oblast – je přimknutá k povrchu obtékaného tělesa nebo stěny
- Vlákňová kavitační oblast – je tvořena vlákny kavitačních bublin, typicky za vrtulovým kolem
- Spárová kavitační oblast – vzniká na výstupu ze spár hydraulických strojů

Dále můžeme rozlišit kavitační oblasti podle chování, a to na přemísťující se oblast a na oblast připojenou, nepřemísťující se.

- Přemísťující oblast se pohybuje ve směru proudu. V této oblasti se nachází jen malý počet kavitačních bublin, které se na své dráze vyvíjejí a zanikají.
- Připojená oblast se nepřemísťuje, ačkoliv uvnitř oblasti dochází k cyklickým jevům. Oblast roste, zpětně se naplňuje kapalinou v proti směru proudu, a nakonec dochází k utržení oblasti a jejímu odplavení. Tyto dílčí procesy se neustále opakují.

2.6. Typy kavitace [2]

Můžeme rozlišovat několik základních typů kavitace buď na základě stupně vyvinutí, nebo podle podstaty vzniku a chování kavitace.

2.6.1. Typy kavitace podle stupně vyvinutí

2.6.1.1. Plně vyvinutá kavitace

Za plně vyvinutou kavitaci považujeme tu, při které dostatečně velký počet kavitačních jader dosáhne stádia explozivního růstu a tím pádem vytvoří kavitační oblast takových rozměrů,

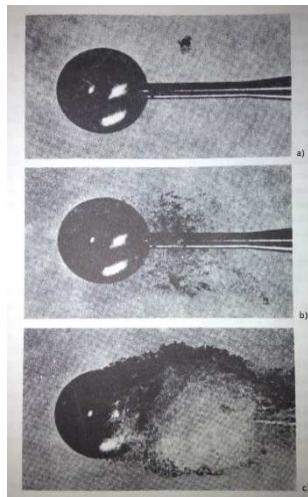
že ovlivňuje proudové poměry v hydraulickém stroji či zařízení. Kvůli tomu jsou pak ovlivněny též energetické parametry systému jako průtok nebo účinnost.

2.6.1.2. Částečně vyvinutá kavitace

Pokud stupeň vývoje kavitace leží někde mezi počátkem kavitace a plně vyvinutou kavitací, hovoříme o kavitaci částečně vyvinuté. Kavitační oblast v tomto případě neovlivňuje proudové poměry v hydraulickém systému, nebo je ovlivňuje jen zanedbatelně. [2]

2.6.1.3. Superkavitace

V případě dostatečně velkého snížení tlaku dochází k expanzi velkého množství kavitačních jader a následného růstu kavitačních bublin. Tím dochází ke zvětšování kavitační oblasti. Pokud kavitační oblast naroste do té míry, že k jejímu uzavření dojde až za obtékaným tělesem, mluvíme o superkavitaci. [1]



Obrázek 4: Obtékání koule kapalinou při rychlosti $v = 6,3 \text{ m.s}^{-1}$
a – počátek kavitace; *b* – částečně vyvinutá kavitace; *c* – plně vyvinutá kavitace [2]



Obrázek 5: Superkavitace u koule obtékané kapalinou [4]

2.6.2. Typy kavitace podle její podstaty

2.6.2.1. Hydrodynamická kavitace

Za nejčastější příčinu vzniku kavitace v hydraulických strojích je považován dynamický pokles tlaku při průtoku kapaliny kanály nebo při obtékání různých profilů. Kavitace vzniklá tímto způsobem je označována jako hydrodynamická.

Při ustáleném proudění je tlak závislý na rozložení rychlosti. Aplikací Bernoulliho rovnice pro dokonalou kapalinu v horizontálně se zužujícím kanále můžeme získat hodnotu nejnižšího tlaku, která se bude nacházet v místech nejmenšího průřezu, a tedy i největší rychlosti kapaliny. Tlak v tomto místě bude roven:

$$p_2 = p_1 - \rho \frac{v_2^2 - v_1^2}{2}$$

K hydrodynamické kavitaci tedy dochází v případě, kdy tlak vlivem zužujícího se profilu a zvětšující se rychlosti klesne pod hodnotu kavitačního tlaku $p_2 \leq p_{kav}$.

2.6.2.1.1. Vírová kavitace

Vírová kavitace je speciálním případem kavitace hydrodynamické. Tato kavitace vzniká v jádře víru vyskytujícího se v kapalině. Je důsledkem snížení tlaku ve víru oproti tlaku v okolní kapalině. Nalézá se za obtékanými tělesy, profily a nerovnostmi, nebo za generátory víru a oběžnými koly hydraulických strojů při podmínce $p_{kav} > p_{vír}$, kde

$$p_{vír} = p_K - \rho \frac{v_{vír}^2}{2}$$
$$v_{vír} = \frac{rv}{r_{vír}}$$

Kde p_K je tlak v okolní kapalině, v rychlost na okraji víru na poloměru r a $v_{vír}$ rychlost v jádře víru na poloměru $r_{vír}$.

Během obtékání výstupků na povrchu tělesa nebo kvůli nerovnosti proudu kapaliny se při určitém Reynoldsově čísle za výstupkem na obtékaném tělese vytváří vír, který se při následném zvýšení Reynoldsova čísla odtrhuje a je unášen proudem pryč. Množství vznikajících vírů za čas je charakterizováno Strouhalovým číslem

$$Sr = \frac{f \cdot h}{v}$$

Kde f je frekvence vzniku vírů, h výška výstupku a v rychlost volného proudu. Přibližně můžeme brát Strouhalovo číslo jako $Sr=0,2$.

2.6.2.2. Pseudokavitace

V případě bublin v kapalině s vysokým obsahem vzduchu a velkým počátečním poloměrem $r_{B0} > 0,001 \text{ mm}$ dochází během snižování tlaku k plynulému nárůstu velikosti bubliny, aniž by došlo k vypařování kapaliny. Tlak kapaliny je větší než tlak par, $p_K > p_w$. Tento děj se řídí již dříve zmíněným vztahem

$$p_K = p_w + \left(p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B}$$

V tomto případě je ve vztahu $p_w = 0$. Takovýto jev nazýváme pseudokavitace. Zmíněný typ kavitace může ovlivnit proudové podmínky v hydraulických systémech nebo zkreslit výsledky kavitačních zkoušek. Při pseudokavitaci prakticky nedochází k poškozování obtékaných povrchů, protože implozní rychlost bubliny je zpomalena vysokým obsahem plynu v bublině. [2]

2.6.2.3. Plynová kavitace

K plynové kavitaci může docházet u kapaliny v nasyceném stavu. Tento děj je pak pravděpodobnější u kapaliny s většími kavitačními jádry. Pokud u nasycené kapaliny dojde ke snížení tlaku, stává se kapalinou přesycenou plynem. Tento plyn se vylučuje a prochází do bubliny. Díky tomu se bublina zvětšuje na novou, větší, rovnovážnou velikost. Uvolněný vzduch se k rozhraní bubliny dostává pomocí difuze z okolní kapaliny. Jelikož je difuze pomalý děj, tak i plynová kavitace je dějem pomalým.

2.6.2.4. Akustická kavitace

Akustická kavitace je záměrně vyvolanou kavitací. Tento typ kavitace je vyvolán v klidné, neproudící kapalině, a to díky zavedení vysokofrekvenční tlakové vlny s velkou amplitudou. Takto vyvolané tlakové vlny rozkmitávají kapalinu a v rámci změn amplitud těchto vln vznikají a zanikají kavitační bubliny. Akustická kavitace je často používáno pro laboratorní zkoušky kavitační odolnosti materiálu proti opotřebení.

K vyvolání akustické kavitace je zapotřebí zvukových frekvencí mezi 16 Hz a 16,5 kHz, nebo ultrazvukových frekvencí v rozpětí od 16,5 kHz až do několika MHz. Nejčastěji se však využívá frekvence 20 kHz. Pro vznik kavitace je nutné dosáhnout určité minimální hodnoty amplitudy nazývané kavitační práh. Hodnota kavitačního prahu závisí na vlastnostech dané kapaliny.

2.6.2.5. Vibrační kavitace

V neproudící kapalině může též dojít k vyvolání kavitace v důsledku kmitání pevných povrchů stěn ponořených do kapaliny, které svým kmitavým pohybem vybudí tlakové vlny. Při kmitavém pohybu povrchu dochází během vzdalování stěn k poklesu tlaku, který může klesnout až pod tlak kavitační a tím zde vznikají kavitační bubliny. Tyto bubliny pak zanikají při vratném pohybu stěn. Hodnota poklesu tlaku v kapalině je závislá na zrychlení povrch stěn. Takto vzniklou kavitaci označujeme jako kavitaci vibrační, která na rozdíl od kavitace akustické, není záměrně vyvolaná.

2.7. Kavitační parametr [2], [5]

Kavitační parametr nebo též kavitační číslo σ_v je bezrozměrná hodnota sloužící ke kvantitativnímu popsání kavitace a má tedy podobný význam jako čísla podobnostní.

Pokud zvolíme tlak p_r jako referenční tlak ve snadno měřitelném místě v blízkosti kavitační oblasti, $p_w(T)$ je tlak vodních par při teplotě T a Δp je tlakový spád charakteristický pro daný systém, pak můžeme definovat kavitační parametr σ_v jako:

$$\sigma_v = \frac{p_r - p_w(T)}{\Delta p}$$

2.7.1. Kavitační parametr počátku kavitace σ_{vi}

Číslo σ_{vi} je hodnota kavitačního parametru odpovídající počátku kavitace v jakémkoliv bodě systému. Pro bezkavitační proudění je nutné splnit následující podmínku:

$$\sigma_v > \sigma_{vi}$$

Hodnota kavitačního parametru počátku kavitace je obecně závislá na mnoha faktorech typických pro mechaniku tekutin jako jsou například geometrie kanálu, viskozita kapaliny, gravitační zrychlení, povrchové napětí, drsnost stěn, obsah plynu v kapalině, termodynamické parametry.

Obecně platí, že čím nižší je hodnota parametru σ_{vi} daného systému, tím lepší jsou jeho průtokové vlastnosti. Se snižujícím se parametrem σ_v pod hodnotu σ_{vi} dochází ke stále většímu rozvíjení kavitace.

Hodnotu parametru σ_{vi} můžeme vyjádřit pomocí následujícího vztahu.

$$\sigma_{vi} = -C_{p,min}$$

Kde $C_{p,min}$ je koeficient minimálního tlaku, který je běžně záporný. Za předpokladu, že kavitace vzniká přímo v bodě nejnižšího tlaku a že prahová hodnota tlaku je stejná jako tlak nasycených par, můžeme určit vztah pro výpočet koeficientu minimálního tlaku $C_{p,min}$ jako:

$$C_{p,min} = \frac{p_{min} - p_r}{\Delta p}$$

2.8. Rayleigh-Plessetova rovnice [5]

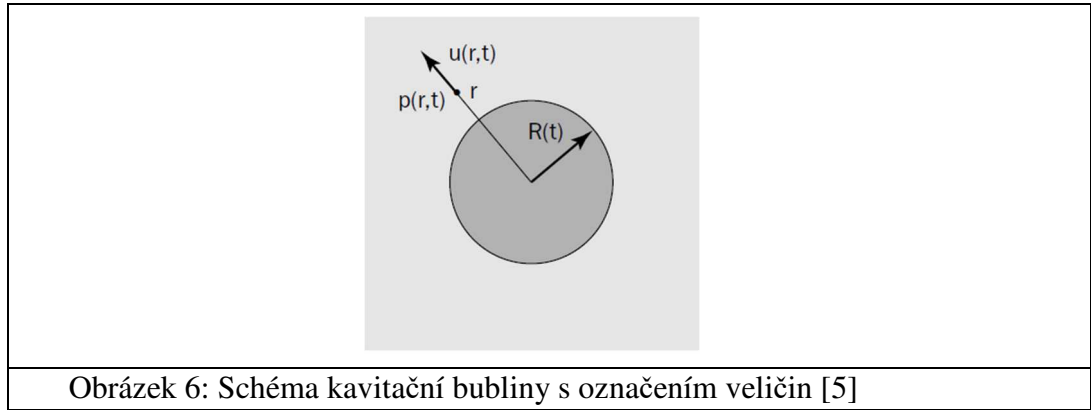
Rayleigh-Plessetova rovnice slouží k popisu dynamického chování kavitační bubliny, popisuje vývoj poloměru bubliny a tlakového pole v kapalině, jestliže je daná hodnota nominálního tlaku v kapalině $p_\infty(t)$. Rovnice má následující tvar:

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = p_w - p_\infty(t) + p_{v0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R}$$

Kde γ je poměr tepelné kapacity plynu za konstantního tlaku c_p a za konstantního objemu c_v , σ povrchové napětí a μ kinematičká viskozita. V případě teoretického předpokladu neviskózní kapaliny poslední člen pravé strany rovnice odpadá. Takto upravená rovnice je potom známá jako Rayleighova rovnice.

Pro odvození rovnice bylo použito několik základních předpokladů:

- Bereme v úvahu nestlačitelnou kapalinu, která je zároveň newtonovská.
- Zanedbáváme gravitační zrychlení.
- Obsah vzduchu v bublině je konstantní.
- Nedochozí k tepelné výměně mezi bublinou a jejím okolím. Tento adiabatický předpoklad je platný především u větších bublin.
- Bublina je naplněna parami, jejichž parciální tlak je stejný jako tlak nasycených vodních par.



Obrázek 6: Schéma kavitační bubliny s označením veličin [5]

2.8.1. Počáteční a okrajové podmínky

Díky zanedbání hmotnostního toku skrze povrch bubliny můžeme říct, že rychlost kapaliny u povrchu bubliny $u(R,t)$ je rovna rychlosti povrchu bubliny $\dot{R}=dR/dt$.

V případě viskózní kapaliny o kinematické viskozitě μ vyjádříme normálové napětí na povrchu bubliny jako:

$$t_{rr}(R, t) = -p(R, t) + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R}$$

Rovnovážná normálová síla je pak dána pomocí vztahu:

$$-t_{rr} = p_w + p_v(t) - \frac{2\sigma}{R}$$

Za platnosti adiabatického předpokladu je okamžitý parciální tlak plynu v bublině $p_v(t)$ svázán s počátečním parciálním tlakem plynu p_{v0} pomocí následujícího vztahu:

$$p_v(t) = p_{v0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma}$$

Následně pak můžeme vyjádřit tlak na povrchu kavitační bubliny, který je dán pomocí rovnice:

$$p(R, t) = p_w + p_{v0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R}$$

Dále pak předpokládáme, že ve velké vzdálenosti od bubliny je kapalina v klidu $u(\infty, t) \rightarrow 0$ a tlak $p_\infty(t)$ je znám. Pro počáteční podmínky a bublinu v klidu $\dot{R}(0)=0$ se následně rovnice zjednoduší do tohoto tvaru:

$$p_{\infty 0} = p_{v0} + p_w - \frac{2\sigma}{R_0}$$

2.8.2. Odvození Rayleigh-Plessetovy rovnice

Z rovnice zákona zachování hmotnosti pro nestlačitelnou kapalinu $\text{div } \vec{V}=0$ dostaneme:

$$u(r, t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2}$$

Rovnice zachování hybnosti pro viskózní i neviskózní kapalinu bude mít následující tvar:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

Spojením těchto dvou rovnic dostaneme tento výraz:

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}$$

Pokud tento výraz zintegrujeme podle r , přejde do následujícího tvaru:

$$\frac{p(r, t) - p_\infty(t)}{\rho} = \ddot{R} \frac{R^2}{r} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right]$$

Tato rovnice je ekvivalentem Bernoulliho rovnice pro neustálené proudění neviskózní kapaliny. Nyní rovnici vyšetříme v místě povrchu kavitační bubliny $r=R$ a tím získáme tuto podobu výrazu:

$$\frac{p(R, t) - p_\infty(t)}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2$$

Nyní spojením této rovnice a dříve zmíněné rovnice pro tlak na povrchu bubliny

$$p(R, t) = p_w + p_{v0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R}$$

s přihlédnutím k tomu, že

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{2\dot{R}}{R}$$

získáme konečnou podobu Rayleigh-Plessetovy rovnice, která popisuje dynamické chování kavitační bubliny v kapalině:

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = p_w - p_\infty(t) + p_{v0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R}$$

2.8.3. Rayleigh-Plessetova rovnice – energetická bilance

Rayleigh-Plessetovu rovnici můžeme vyjádřit i za pomoci energií. Takto upravená rovnice má následující tvar:

$$\frac{d}{dt} (2\pi\rho\dot{R}^2R^3) = \left[p_w + p_{v0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_\infty(t) \right] 4\pi R^2\dot{R} - 8\pi\sigma R\dot{R} + 16\pi\mu R\dot{R}^2$$

Levá strana této rovnice reprezentuje kinetickou energii. První člen pravé strany vyjadřuje energii od tlakových sil v bublině a kapalině. Energie spojená s povrchovým napětím bubliny je vyjádřena v druhém členu pravé strany rovnice. Poslední člen udává disipaci energie z důvodu viskózní kapaliny.

2.9. Zánik kavitační bubliny [1]

Poté, co dojde k nárůstu kavitační bubliny v místě s nízkým tlakem, je dále unášena proudem do míst s tlakem vyšším. Tento tlak působící na povrch bubliny ji začne stlačovat a zmenšovat tím její velikost. Samotný děj stlačení kavitační bubliny probíhá velmi rychle, a to v řádu μs . Doba trvání kolapsu bubliny může být vypočítána z následujícího vztahu:

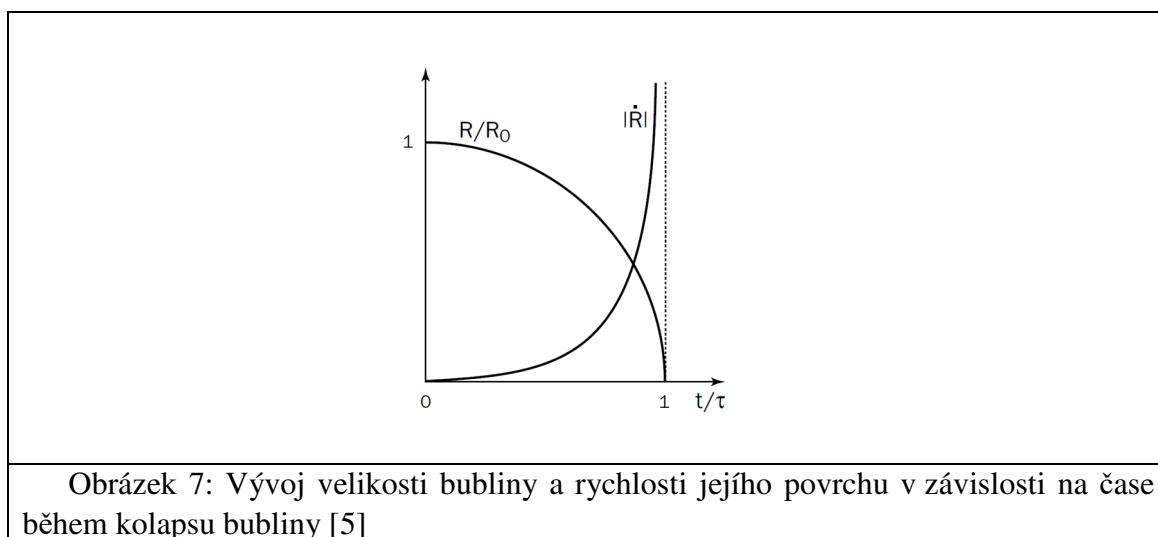
$$\tau \cong 0,915R_0 \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty - p_w}}$$

Podle [5] jsou výsledky z tohoto vztahu ve velmi dobré shodě s výsledky získanými experimentálním měřením pro bubliny s počátečním poloměrem od jednoho mikrometru po jeden metr.

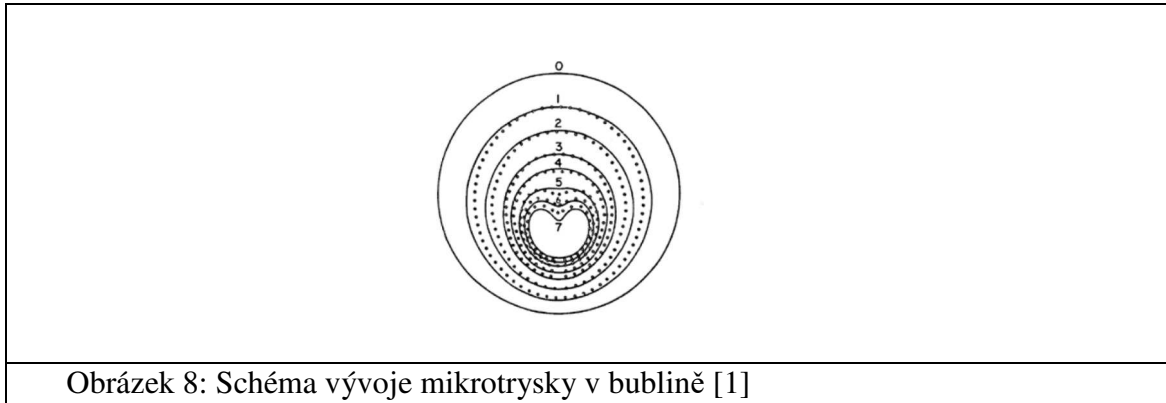
Díky velmi krátké době kolapsu bubliny je jasné, že se poloměr kavitační bubliny musí zmenšovat velkou rychlostí. Velikost rychlosti na rozhraní mezi kavitační bublinou a kapalinou může být vyjádřena tímto vztahem:

$$|\dot{R}| \cong \sqrt{\frac{2 p_{\infty} - p_w}{3 \rho} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{\frac{3}{2}}} \cong 0,747 \frac{R_0}{\tau} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{\frac{3}{2}}$$

Rychlost kolapsu kavitační bubliny se může blížit až hodnotám rychlosti zvuku ve vodě. S tímto je spojeno vytváření tlakových vln v kapalině při zániku bubliny. Tyto tlakové vlny mají dále za následek vznik vibrací, a tedy i hluku po čas kavitace. Výskyt kavitace v systému tedy můžeme identifikovat i pomocí sluchu. Tento jev je často nazýván jako kavitační hluk nebo kavitační šum [2].

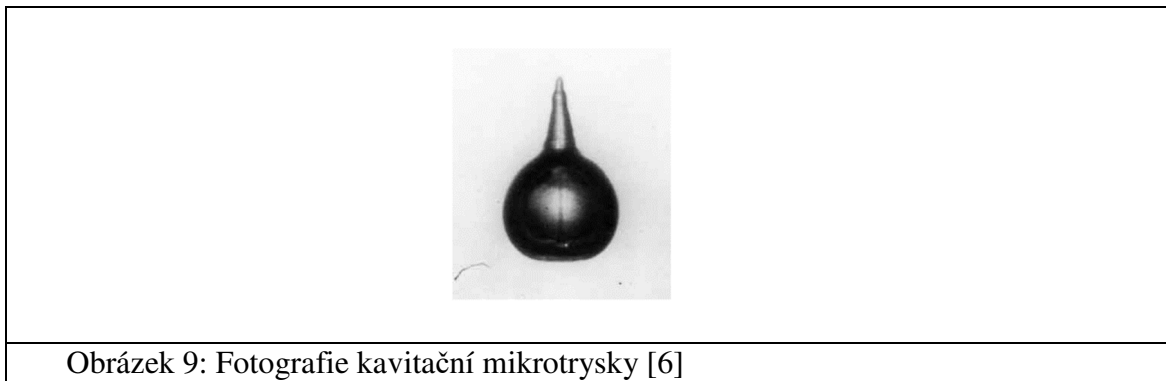


Jako důležitý fakt je třeba zmínit, že při kolapsu si kavitační bublina nezachovává symetrický kulovitý tvar. Při nárůstu okolního tlaku kapaliny se bublina začne prudce zmenšovat. Do dutiny uvnitř bubliny se postupně z jedné strany dostává okolní kapalina a bublina samotná imploduje. V místě pronikání kapaliny do bubliny vzniká vysokorychlostní mikrotryska („microjet“) urychlovaná rozdílem tlaků v bublině a kapalině, která dále penetruje bublinu a vychází z ní na opačné straně, než do bubliny vniká kapalina.

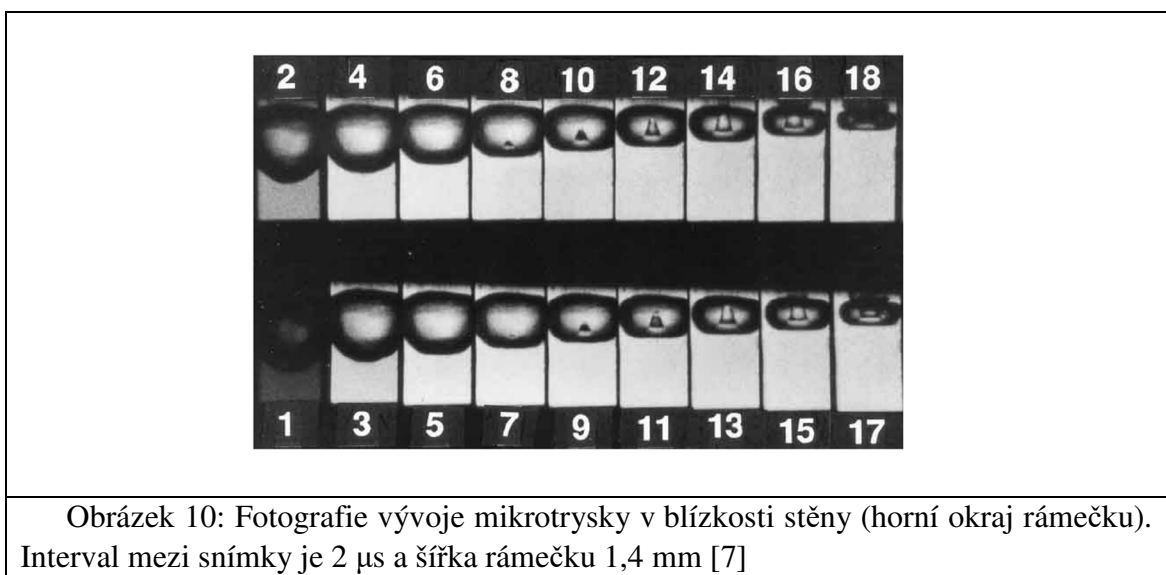


Obrázek 8: Schéma vývoje mikrotrysky v bublině [1]

Orientace mikrotrysky v kapalině je vázaná ke vzdálenosti od pevného povrchu a výskytu dalších kavitačních bublin. Tryska obvykle směřuje svým „hrotem“ směrem k pevnému povrchu. Toto je jedna z příčin opotřebení materiálu v kavitační oblasti, tzv. kavitační eroze. Vlivem vysoké rychlosti trysky vznikají v kapalině rázové vlny, které působí na povrch tělesa na velmi malém prostoru, kvůli čemu následně dochází k poškození a vydrolování materiálu tělesa.



Obrázek 9: Fotografie kavitační mikrotrysky [6]



Obrázek 10: Fotografie vývoje mikrotrysky v blízkosti stěny (horní okraj rámečku). Interval mezi snímky je 2 μ s a šířka rámečku 1,4 mm [7]

2.9.1. Kavitační eroze [2]

Vlivem proudu kapaliny se kavitační bublina přesunuje do oblasti tlaku vyššího, než je tlak kavitační, přičemž v ní prudce kondenzují páry a plyny částečně difundují do okolní kapaliny – kavitační bublina se zmenšuje. Kvůli tomuto vznikají v kapalině tlakové rázy, které narušují povrch obtékaného tělesa. V závislosti na časovém působení kavitace se povrch materiálů nejprve zdrsňuje. Při delším vystavení působení kavitace vznikají na povrchu ostře ohraničené jamky a uvolněný materiál je proudem odplavován pryč. Tohoto procesu se nejednou zúčastňuje velké množství kavitačních bublin, proto k narušení materiálu dochází velmi rychle. V důsledku toho může dojít až k ulomení součásti a následné havárii stroje.

K nejsilnější kavitační erozi dochází v místech konce kavitační oblasti ve směru proudění, tj. v místech začátku zvyšování tlaku nad kavitační tlak. Dále pak ve směru proudění za oblastí maximální eroze dochází po jejím snížení k opětovnému zvýšení, ačkoliv již s mnohem menší intenzitou. To je vysvětlováno cyklickým růstem a zánikem kavitačních bublin.



Obrázek 11: Poškození způsobené kavitační erozí [1]

2.9.2. Tepelné děje při zániku kavitační bubliny [1]

Při zániku kavitační bubliny již nemůžeme zanedbávat teplotní vlivy tak jako u předchozích fází vývoje kavitační bubliny, a to především z toho důvodu, že ve finální fázi kolapsu je obsah bubliny silně stlačen okolní kapalinou.

Vlivem velmi krátké doby, za kterou dojde ke kompresi bubliny, můžeme tento děj považovat za adiabatický. Plyn uvnitř bubliny je tedy velmi prudce stlačen, čímž dochází k výraznému zvýšení jeho teploty a tlaku. Teplota v centru bubliny tak může dosahovat až 6 700 K a na rozhraní s kapalinou pak okolo 3 400 K. K takto vysokým teplotám však dochází jen na velmi krátkou dobu, a to v řádu *ps*. Už po 2 μ s klesá teplota na rozhraní přibližně na hodnotu 300 K. Velikost teploty je mimo jiné závislá i na plynu obsaženém v bublině. Nejvyšších teplot dosahují obsahy jednoatomových plynů, jako je například argon [14]. Tento jev při zániku kavitační bubliny je také nazýván „hotspot“ neboli „horký bod“.

2.9.3. Sonoluminescence [1]

Sonoluminescence je jev, který může doprovázet kavitaci. V místě zániku kavitačních bublin může docházet ke světélkování bublin v kapalině. Toto světélkování je vysvětlováno jako zažehnutí plynu v kavitační bublině vlivem vysokých teplot a tlaků uvnitř bubliny. Podle [1] pánové Jarman a Taylor zjistili, že každý takový světelný záblesk je doprovázen akustickým tlakovým pulzem. Podle všeho dochází k sonoluminescenci jen u těch kavitačních bublin, které si i při kolapsu zachovávají symetrický kulový tvar. Proto je tento jev poměrně vzácný.

2.10. Další faktory ovlivňující kavitaci [2]

Jedním z faktorů ovlivňující kavitaci je povrchové napětí kavitační bubliny. S rostoucím povrchovým napětím se snižuje hodnota kavitačního tlaku, tedy tlaku potřebného k iniciaci kavitace. Zároveň rostoucí povrchové napětí zpomaluje růst bubliny v počáteční fázi kavitace, ale na druhou stranu urychluje kolaps bubliny ve fázi závěrečné.

Viskozita kapaliny je dalším z faktorů ovlivňující kavitaci. Dle teoretických úvah by vyšší viskozita měla působit antikavitačně, protože by napomáhala zpomalovat růst bublin. Experimentální měření však podávají i protichůdné závěry. Viskozita kapaliny je skrze Reynoldsovo číslo ve vztahu s kavitačním parametrem počátku kavitace. Tento parametr je nejnižší pro hodnotu $Re = 1,5 \cdot 10^5$. S rostoucími i klesajícími hodnotami Re oproti této hodnotě pak dále kavitační parametr počátku kavitace roste.

Vyšší obsah nerozpuštěného vzduchu v kapalině má za následek větší tvorbu kavitačních jader a tím zvyšuje hodnotu tlaku potřebného pro začátek kavitace, tedy $p_{kr} > p_w$. Dále s rostoucím obsahem nerozpuštěného vzduchu roste i kavitační parametr počátku kavitace. Díky difuzi vzduchu z kapaliny do bublin je navíc urychlována jejich expanze.

Jako poslední faktor ovlivňující kavitaci uvedu teplotu kapaliny. Při vyšší teplotě kapaliny se zlepšují antikavitační vlastnosti této kapaliny. Teplota kapaliny má vliv především na kavitační parametr. Obvykle se pro zjišťování charakteristik daného systému využívá studené kapaliny a výsledky jsou pak přepočítávány pro teplou kapalinu pomocí různých vztahů dle konkrétní aplikace.

3. Využití kavitace pro čištění vody

3.1. Problematika čištění vody

Voda je pro nás životně důležitá, a proto je potřeba zabývat se problematikou jejího čištění. Do vody se dostává velké množství znečišťujících látek, například skrze zemědělství (pesticidy, hnojiva), z domácností nebo jako odpadní produkty z průmyslových závodů. Spousta těchto toxických látek je z vody odstraněna při průchodu čističkou odpadních vod. Některé organické i anorganické látky mají však vysokou odolnost vůči konvenčním způsobům čištění a dezinfekci vody, a i po průchodu čističkou stále zůstávají v různých koncentracích ve vodě. Mezi takové látky patří zejména některé insekticidy, organická barviva, léčiva, fenoly a jejich deriváty. [8, 10, 12]

Dále je potřeba si uvědomit, že může docházet i k tzv. sekundárnímu znečištění vody během samotného procesu čištění vody v čističkách, kdy dochází k postupnému uvolňování menších dávek čistících chemikálií jako například chloru nebo peroxidu vodíku do již vyčištěné vody. Tyto látky a jejich sloučeniny mohou pak dále tvořit potenciálně nebezpečné karcinogenní látky. [10]

A proto, z důvodu odstraňování látek s vysokou odolností a látek vzniklých při sekundárním znečištění vody, je vhodné rozšířit způsoby čištění a dezinfekce vody o nové, účinnější a zároveň cenově rozumné metody.

3.2. Možné způsoby čištění vody

3.2.1. Pokročilé oxidační procesy

Mezi pokročilé oxidační procesy (Advanced oxidation processes, AOP) patří skupina chemických postupů určených k odstraňování organických a částečně i anorganických polutantů z vody za pomoci oxidace skrze vysoce reaktivní hydroxylové radikály OH^\cdot . Mezi pokročilé oxidační procesy patří zejména použití peroxidu vodíku H_2O_2 a ozonu O_3 , někdy také doplněné o použití UV záření. [10]

3.2.1.1. Peroxid vodíku – H_2O_2

Peroxid vodíku je chemická sloučenina známá pro své silné oxidační účinky. Tyto oxidační vlastnosti peroxidu vodíku jsou spojeny se vznikem hydroxylových radikálů OH^\cdot , které vznikají při rozpadu peroxidu vodíku. [10] Díky hydroxylovým radikálům obsaženým ve vodném roztoku dochází k dezinfekci, oxidaci a degradaci organických znečišťujících látek.

Se zvyšujícím se množstvím peroxidu obsaženého ve vodném roztoku dochází ke zvyšování účinnosti odbourávání nežádoucích látek z vody díky většímu počtu vysoce reaktivních OH^\cdot radikálů. Ovšem při příliš vysoké koncentraci H_2O_2 v roztoku dochází ke snižování účinnosti oxidace látek znečišťujících vodu. Toto je způsobeno reakcí OH^\cdot radikálů s peroxidem vodíku, přičemž vznikají sekundární hydroxylové radikály s výrazně nižším oxidačním potenciálem (HO_2 , O_2 , O). Při prodlužující se době, kdy je ošetřovaná voda vystavená působení H_2O_2 , dochází stále ke zvyšování počtu usmrcených mikroorganismů. [8]

3.2.1.2. Ozon – O₃

Ozon je nestabilní chemická látka s dobrými dezinfekčními vlastnostmi. Při rozpadu ozonu vznikají kyslíkové radikály, které jsou silnými oxidačními činidly. Tyto radikály oxidují organické sloučeniny v buněčných membránách mikroorganismů. V buněčných membránách následně dochází k porušení stěn a tím ke snižování životaschopnosti buňky, čímž dochází k dezinfekci. [12]

S vyšším množstvím ozonu přidaného do vody roste účinnost jeho dezinfekčních a oxidačních vlastností a tím i kvalita čištění vody. Při vyšších koncentracích ozonu ve vodném roztoku nemusí docházet k jeho kompletnímu rozložení. Zbytkový ozon je nežádoucí látka stejně tak jako sloučeniny, které z něj mohou vzniknout. Z toho důvodu není vhodné používat vyšší dávky ozonu pro čištění a desinfekci vody. V porovnání s metodou přidání peroxidu vodíku H₂O₂ pro čištění a desinfekci vody vychází, že efektivnější metoda je právě přidávání ozonu O₃ za účelem odstraňování nežádoucích organických a anorganických látek. [10]

3.2.2. Hydrodynamická kavitace

Jedním ze způsobů použitelných pro čištění vody může být právě využití kavitace. K odstranění biologických a chemických látek znečišťujících vodu dochází za pomoci kombinace několika dějů typických pro kavitaci.

Ve fázi kolapsu kavitační bubliny dochází lokálně k obrovskému nárůstu teploty a tlaku kvůli rychlé kompresi plynů obsažených v bublině. Právě vysoká teplota a tlak má za následek rozpad molekul vody na vodík a vysoce reaktivní hydroxylový radikál OH[•], který slouží k oxidaci a odstranění nežádoucích látek ve vodě. [13] Primární čištění a desinfekce vody je uskutečněná díky zoxidování látek znečišťujících vodu.

K dalšímu odbourávání především organických látek slouží i lokální nárůst teploty a tlaku. Mikroorganismy a bakterie jsou vystaveny obrovským teplotním změnám a změnám v tlaku na ně působícím, které mají za následek narušování buněčné struktury a tím ulehčují přístup oxidačním činidlům do jádra buněk a urychlují tak proces dezinfekce. Dále pak při implozi kavitační bubliny dochází ke vzniku tlakových vln s velkou destrukční silou, která také může vést k dalšímu úbytku nežádoucích látek ve vodě. [10]

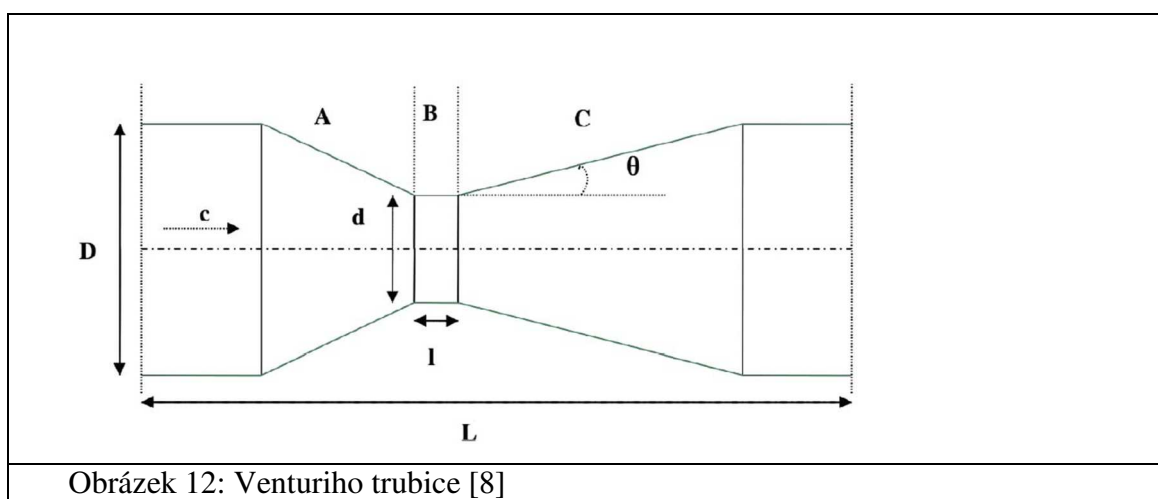
Účinnost hydrodynamické kavitace závisí na velikosti tlakového spádu použitého pro její vyvolání. Nejvyšších účinností pro úpravu vody bylo dosaženo při tlakovém spádu v rozmezí od 4 do 5,2 barů. S dalším nárůstem tlakového spádu dochází ke snižování účinnosti čištění vody. [9]

Hydrodynamická kavitace může sloužit k efektivnímu generování oxidačních látek a následné dezinfekci vody i díky faktu, že při ní vzniká velké množství kavitačních bublin hustě rozložených po celém průřezu, což zvyšuje šanci kontaktu nežádoucích látek s oxidačními činidly. [8, 10]

3.2.2.1. Způsoby iniciace hydrodynamické kavitace [8]

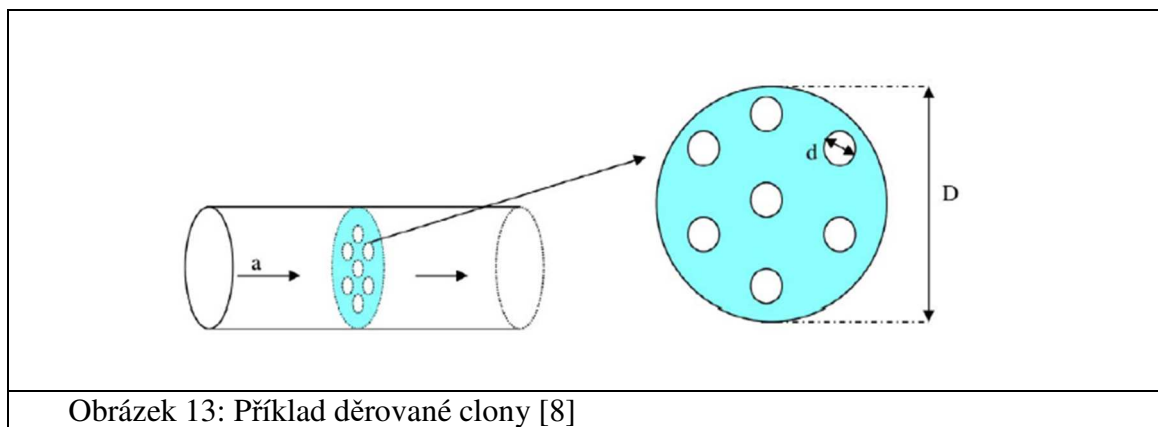
Vyvolání hydrodynamické kavitace lze provést několika způsoby.

Venturiho trubice je zařízení pracující na principu Bernoulliho zákona, kde změnou průřezu trubice dosahujeme vyšší rychlosti proudění a nižšího tlaku v kapalině, který může klesnout až pod hodnotu kavitačního tlaku a tím vyvolat kavitaci. Venturiho trubice je složená ze tří částí. Konvergentní část slouží k navýšení rychlosti proudění a snížení tlaku, je následována částí s nejnižším průměrem. V této části je místo nejnižšího tlaku, a proto zde dochází k iniciaci kavitace. Poslední část trubice je divergentní. Zde dochází k opětovnému navyšování tlaku, také se zde nachází kavitační oblast, ve které imploduje kavitační bubliny a dochází k dezinfekci vody. Změna geometrických vlastností trubice vede k úpravě charakteristik proudění a následně i účinnosti čištění vody.



Obrázek 12: Venturiho trubice [8]

Děrovaná clona je další způsob, který lze využít pro iniciaci hydrodynamické kavitace. Jedná se o clonu s vyvrtanými otvory po celém svém povrchu. Množství děr i jejich velikost se mohou lišit. Clona je zasazena do potrubí v místě požadovaného začátku kavitační oblasti. Clona se chová jako překážka pro proudění. Dochází k nárůstu tlaku u vstupu do děr v cloně a opětovnému snížení na výstupu, čímž vzniká tlakový spád, který vede k počátku kavitace na výstupní straně clony. Charakteristika proudění a tím i následné kavitace a dezinfekce vody závisí na geometrických charakteristikách plátu, především na počtu děr, celkové průchozí ploše, šířce clony a průměru děr vůči průměru potrubí.



Obrázek 13: Příklad děrované clony [8]

Hydrodynamické kavitace může být dosaženo i za pomoci speciálně navrhnutých rotačních zařízení [11], jako jsou vysokotlaké nebo vysokorychlostní homogemizátory a kavitační reaktory. Generování kavitačních bublin v těchto zařízeních je dosaženo vysokou rychlostí rotace (2 200 – 8 000 rpm) a designem rotoru. V porovnání s ostatními metodami generování kavitace je tento způsob charakteristický horší ovladatelností kavitačního procesu. Dále je také energeticky náročný, a proto i nevýhodný k použití pro čištění vody ve větších objemech.

3.2.3. Akustická kavitace

Princip využití akustické kavitace pro odbourávání nežádoucích látek z vody je obdobný jako u kavitace hydrodynamické. Při kolapsu kavitační bubliny dochází k vytváření sloučenin se silnými oxidačními vlastnostmi, které hubí mikroorganismy a bakterie, dezinfikují vodu a oxidují toxické látky. [12] K tomuto dochází vlivem vysokých teplot a tlaků typických pro zánik kavitační bubliny. Navíc oproti hydrodynamické kavitaci dochází také k narušování chemických vazeb mezi molekulami v buněčné membráně mikroorganismů vlivem ultrazvukových vln. Toto vede ke zvyšování prostupnosti chemických sloučenin, jako například hydroxylových radikálů, do buněk, a tím zvyšuje rychlost a účinnost dezinfekčních a oxidačních procesů. [10]

Ačkoliv projev akustické kavitace je shodný s projevem hydrodynamické kavitace, jejich způsob vzniku je zcela odlišný. Na rozdíl od hydrodynamické kavitace, která vzniká v důsledku velkého tlakového spádu a poklesu tlaku v kapalině pod kavitační tlak, je akustická kavitace vyvolána za pomoci generátoru akustických vln. V případě, že tento generátor vysílá vlny s dostatečně velkou amplitudou, dochází ke vzniku kavitace vlivem rychlých změn amplitudy vlny, které vyvolávají lokální rozdíly v tlaku. Takovéto generátory nejčastěji operují s kmitočtem v rozsahu 20-520 kHz, tedy v ultrazvukovém spektru. [8]

V porovnání s hydrodynamickou kavitací dosahuje akustická kavitace vyšších teplot a tlaků při zániku kavitačních bublin, což vede k větší efektivitě odbourávání nežádoucích látek. Na druhou stranu nedosahuje takové hustoty rozložení kavitačních bublin, čímž se snižuje šance kontaktu implodujících bublin s látkami určenými k odstranění. S prodlužující se dobou, kdy je vodný roztok vystaven kavitaci, se zvyšuje i míra odstranění škodlivin z vody vzhledem k větší šanci vystavení těchto látek kontaktu se zanikající kavitační bublinou. Z toho vyplývá, že akustická kavitace je vhodnější metodou čištění a dezinfekce vody v případě, kdy je ve vodě obsažena vyšší koncentrace znečišťujících látek. Použití hydrodynamické kavitace vykazuje dobrou účinnost i pro nižší koncentrace těchto látek. [8, 11]

3.2.3.1. Způsoby iniciace akustické kavitace [8]

K vyvolání akustické kavitace lze využít dva způsoby. Prvním z nich je použití ultrazvukové sondy. Válcová sonda je umístěna přímo do kapaliny. Obvykle je vyrobena z vodivého kovu, například titanu. Skrze vibrace, vyvolané zdrojem napětí, vysílá akustické vlny do kapaliny. Energie vlny je soustředěna na malé ploše na sondě, čímž dochází k rychlým změnám lokálního tlaku a vyvolání kavitace. Tímto způsobem dochází k nejagresivnější kavitaci soustředěné na malém prostoru.

Druhým způsobem vyvolání akustické kavitace je ultrazvuková lázeň. V tomto případě jsou pod nádobou s kapalinou umístěné zdroje vibrací. Ultrazvuková energie vyvolávající kavitaci proniká do kapaliny nepřímo skrze stěny nádobí. Díky tomuto přístupu je kavitační oblast širší než v případě ultrazvukové sondy, avšak teplota a tlak při kolapsu bublin jsou nižší.

Nevýhodou nasazení akustické kavitace je limitovaný objem kapaliny.

3.3. Hybridní způsoby čištění vody

Pomocí výše zmíněných postupů lze dosáhnout různou mírou odstranění polutantů z vody. Při většině těchto procesů však nedochází ke 100 % odstranění škodlivých látek z vody, nebo k tomu dochází po velmi dlouhé době. Toto lze ovšem překonat právě za pomoci hybridních způsobů čištění vody. Jedná se o různé kombinace metod čištění vody pomocí pokročilých oxidačních procesů společně s kavitačními metodami. [8, 10]

Spojením jednotlivých procesů dochází k synergii, tedy k dosažení účinku většího, než je pouhé sečtení účinků dílčích. Hybridní metody v sobě kombinují výhody z každé v sobě obsažené metody. [8]

3.3.1. Peroxone [8, 10]

Peroxone je hybridní metodou čištění vody kombinující mezi sebou použití peroxidu vodíku H_2O_2 a ozonu O_3 , tedy dvou pokročilých oxidačních procesů. Vlivem vysokého oxidačního potenciálu jejich radikálů dokáží zoxidovat prakticky jakoukoliv organickou i anorganickou znečišťující látku obsaženou ve vodě. Výhodou použití této metody je právě její účinnost a také fakt, že díky kombinaci peroxidu vodíku a ozonu lze použít na dezinfekci a vyčištění vody nižší koncentrace každé jedné z těchto látek. Na druhou stranu stále se jedná o přidávání chemikálií do vody, které může vést k tvoření nežádoucích až karcinogenních vedlejších produktů.

3.3.2. Hydrodynamicko-akustická kavitace [13]

Hydrodynamicko-akustická kavitace (hydrodynamic-acoustic cavitation, HAC) je hybridní metodou spojující výhody kavitace hydrodynamické, vyvolané pomocí změn geometrie systému proudění, a kavitace akustické, vzniklé pomocí generátoru akustických vln.

Výhoda této metody tkví ve využití hustě rozložených kavitačních bublin typických pro hydrodynamickou kavitaci a vysoké teploty a tlaku při implozi bublin náležící akustické kavitaci. Díky tomu je vysoká šance, že látky znečišťující vodu, přijdou do kontaktu s implodující bublinou a zároveň budou vystaveny účinkům agresivní kavitace.

V práci [13] porovnávají účinnost HAC s klasickou hydrodynamickou kavitací a akustickou kavitací. Účinnost metod porovnávají pomocí zjištěného odstraněného množství látky karbamazepinu, špatně z vody odbouratelného léku proti epilepsii, za časové období 15 minut. Zatímco hydrodynamická a akustická kavitace odbourala 27 % a 33 %, metodou HAC došlo k odbourání většímu než 96 %. Zde lze dobře pozorovat výhody synergie hybridních procesů.

Dále pak energetická náročnost procesu HAC je menší než náročnost hydrodynamické a akustické kavitace pro odbourání stejného množství znečišťujících látek, čímž vychází jako levnější varianta pro možné budoucí použití. Jednou z výhod této metody je i fakt, že zde nedochází k přidávání žádných dalších chemikálií do vody. Zatím testováno pouze v laboratorních podmínkách.

3.3.3. Kavítace + pokročilé oxidační procesy [10]

Dalším z hybridních procesů čištění vody je využití kavitace, ať už hydrodynamické, tak i akustické, s příměsí ozonu nebo peroxidu vodíku. V tomto případě kavitace urychluje rozpad chemických příměsí a tím zvyšuje rychlost generování látek se silnými oxidačními vlastnostmi, které dále ničí polutanty ve vodě.

Hydrodynamická kavitace ve spojení s příměsí peroxidu vodíku/ozonu dosahuje vyššího procentuálního vyčištění vody než její jednotlivé složky samostatně. Účinnost této metody lze zvýšit buď zvýšením tlakového spádu hydrodynamické kavitace, nebo vyšším množstvím chemických aditiv.

Akustická kavitace s příměsí peroxidu vodíku/ozonu vykazuje ještě vyšší účinnost než použití hydrodynamické kavitace ve spojení s pokročilými oxidačními procesy. To je způsobeno tím, že ultrazvuk zvyšuje průchodnost oxidačních látek skrze buněčnou stěnu do buňky a tím napomáhá dezinfekci. Dále pak dochází k narušování a praskání buněčné membrány mikroorganismů vlivem ultrazvukových vln, čímž se do vody uvolňuje enzym peroxidáza. Tento enzym podporuje rozklad peroxidu vodíku na hydroxylové radikály a tím dále urychluje probíhající dezinfekci. Účinnosti použití ultrazvukové sondy a ultrazvukové lázně jsou obecně srovnatelné. V konkrétních případech se liší jen minimálně.

Díky synergii mezi kavitačními a oxidačními procesy lze dosáhnout vysoké účinnosti odbourávání nežádoucích látek z vody. Dále pak nutné množství chemických aditiv používaných pro dezinfekci vody je u hybridních metod nižší než u samostatného použití AOP. Navíc během kavitace dochází k výraznému odbourávání peroxidu vodíku a ozonu z vody, čímž ještě více klesá množství zbytkových chemikálií ve vodě.

3.4. Možnosti použití hybridních metod pro čištění vody [8, 10]

Použití hybridních metod pro čištění vody má spoustu výhod. Mezi hlavní z nich patří vysoká účinnost a nízký obsah nežádoucích zbytkových chemických látek označovaných jako sekundární znečištění. Dále pak schopnost odstranit i špatně odstranitelné látky, jako jsou fenoly, jejich deriváty, léčiva, pesticidy a další. Další výhodou je nižší množství používaných chemických látek (peroxid vodíku, ozon) a s tím navazující snížení nákladů. Díky kombinaci několika čistících a dezinfekčních principů je použití hybridních metod vhodné jak pro odstraňování hydrofilních, tak i hydrofobních organických polutantů.

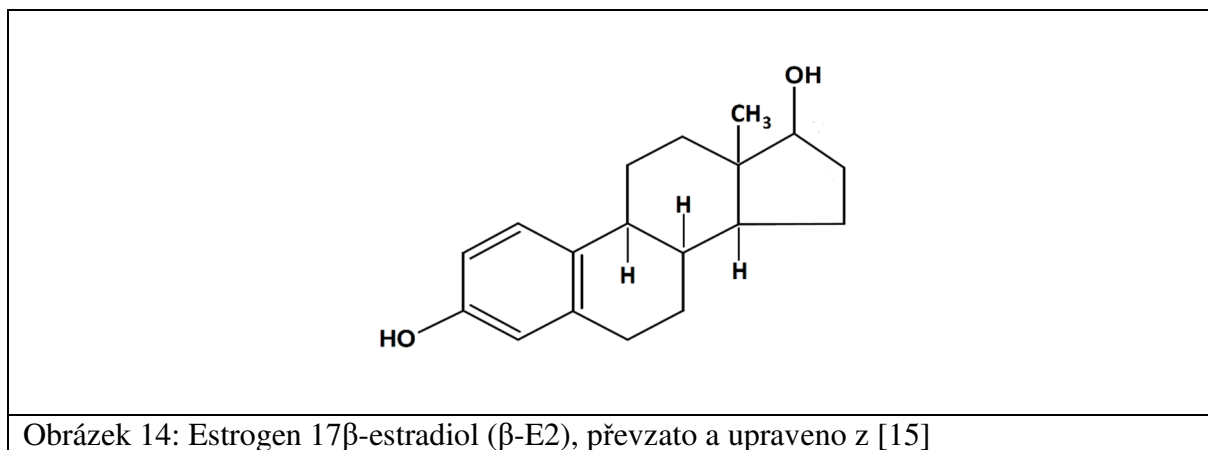
Hlavní nevýhodou těchto metod je nákladnost. Všechny zmíněné metody jsou nákladnější než doposud užívané způsoby čištění vody pomocí chemikálií. Vzhledem k nákladnosti se jako

nejlepší varianta nabízí využití hydrodynamické kavitace s příměsí oxidačních látek. V čističkách odpadních vod je ošetřovaná voda vedena pod tlakem, který se snižuje v redukčních stanicích na požadovanou hodnotu. Právě takováto stanice na regulaci tlaku nabízí možnost změny designu tak, aby zde mohlo probíhat čištění za pomoci hydrodynamické kavitace jen díky změně tlaku v systému, a tedy bez dalšího přídavného zařízení, čímž by znatelně klesly provozní náklady.

4. Odbourávání estrogenu z vody pomocí hydrodynamické kavitace

V této kapitole bude popsáno provedení pokusu, jehož cílem bylo zjistit možnosti využití hydrodynamické kavitace pro odstraňování estrogenu z vody. Tento experiment byl prováděn ve spolupráci s doc. Ing. Pavlem Rudolfem, Ph.D. z Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického, doc. Mgr. Pavlem Štáhelem, Ph.D. z Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity a Ing. Eliškou Maršálkovou, Ph.D. z Botanického ústavu Akademie věd ČR.

Estrogeny patří mezi steroidy. Především představují ženské pohlavní hormony. V malé míře je lze nalézt i v těle mužů. Estrogeny jsou často součástí léků pro ženy po menopauze a také jsou obsaženy v antikoncepci. Existují tři hlavní typy estrogenů: estradiol, estriol a estron. V tomto experimentu je snahou odstranit z vody 17β -estradiol (β -E2) [15]. Právě kvůli farmaceutickým přípravkům může docházet k pronikání estrogenů do vody a tím k znečišťování vodních toků [16]. I přes nízké koncentrace estrogenu ve vodě může při dlouhodobém vystavení této látky docházet k mutacím u živých organismů. Kvůli obtížné odbouratelnosti mohou být estrogeny obsaženy i v pitné vodě a tím mít negativní vliv na zdraví člověka. Z toho důvodu je na místě věnovat se možnostem účinného odstraňování této chemické látky z vody.

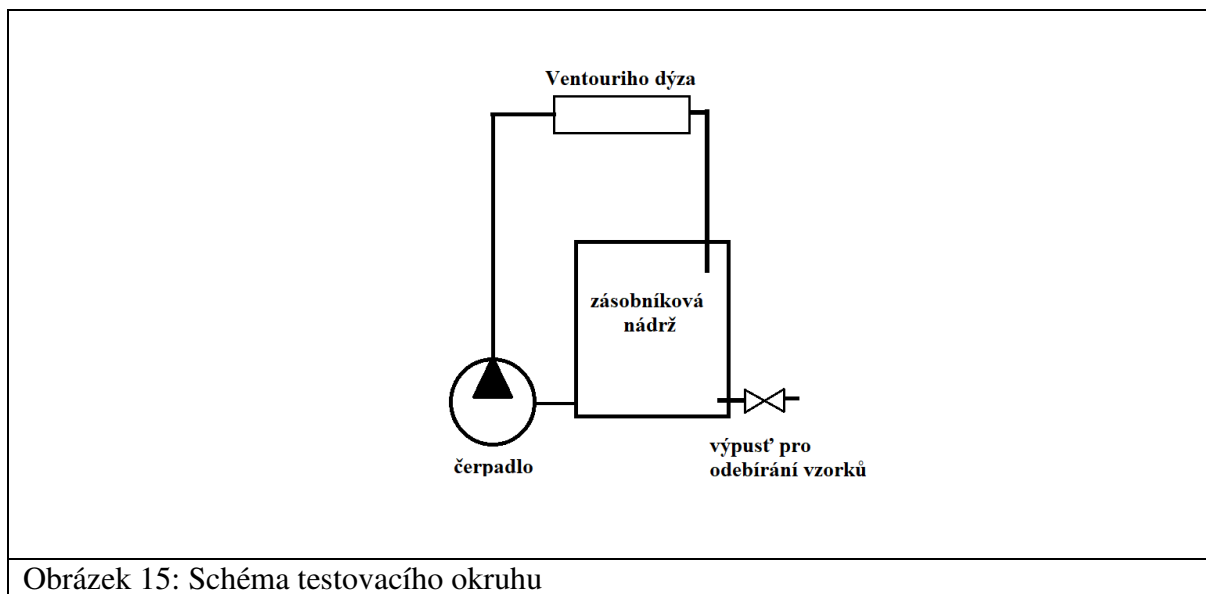


Obrázek 14: Estrogen 17β -estradiol (β -E2), převzato a upraveno z [15]

4.1. Příprava experimentu

Experiment byl proveden na testovacím okruhu, kde byla hydrodynamická kavitace vyvolána pomocí použití plexisklové trubice ve tvaru Venturiho dýzy, kde díky změně průřezu dochází ke snížení tlaku pod hodnotu nasycených par. Testovací okruh se dále skládal ze zásobníkové nádrže pro testovací kapalinu, čerpadla a výstupu pro odběr vzorků.

Jako testovací medium byl použit roztok 17β -estradiolu s destilovanou vodou o objemu 3 l a koncentraci 1 mg/l. Okruh byl před provedením experimentu propláchnut právě tímto roztokem.

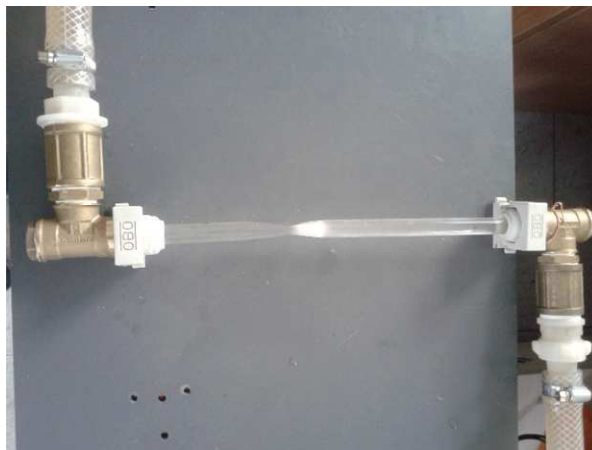


4.2. Průběh experimentu

Experiment byl prováděn za pokojové teploty. Spuštěním čerpadla dochází k cirkulaci testované kapaliny v okruhu a vyvolání hydrodynamické kavitace ve Venturiho dýze. Doba jednoho průchodu celého objemu kapaliny systémem (tj. 13 s) byla změřena ještě před začátkem pokusu.

Vzorky testované kapaliny byly odebrány po 3, 6 a 9 oběhových cyklech, respektive po 39 s, 78 s a 117 s. Dále byl taktéž odebrán jeden referenční vzorek roztoku před zahájením samotného experimentu. Každý vzorek byl odebrán v objemu 250 ml.

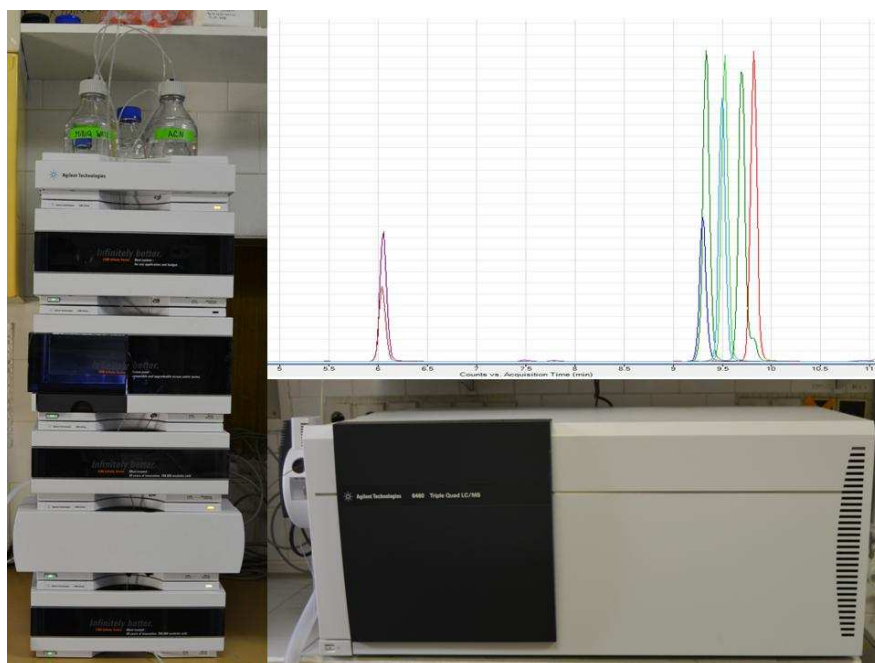




Obrázek 16: Detail kavitace v testovacím okruhu

4.3. Analýza měřených vzorků

Analýza vzorků byla provedena metodou kapalinové chromatografie s tandemovou hmotností detekcí (HPLC-MS/MS). Tato metoda se řadí mezi nejcitlivější separační metody určené ke kvantitativní analýze a díky tomu je vhodná pro vyhodnocení vzorků s předpokládanou nízkou koncentrací estrogeneru. [16]



Obrázek 17: Zařízení pro provádění metody HPLC-MS/MS, obrázek použit s dovolením Ing. Elišky Maršákové, Ph.D

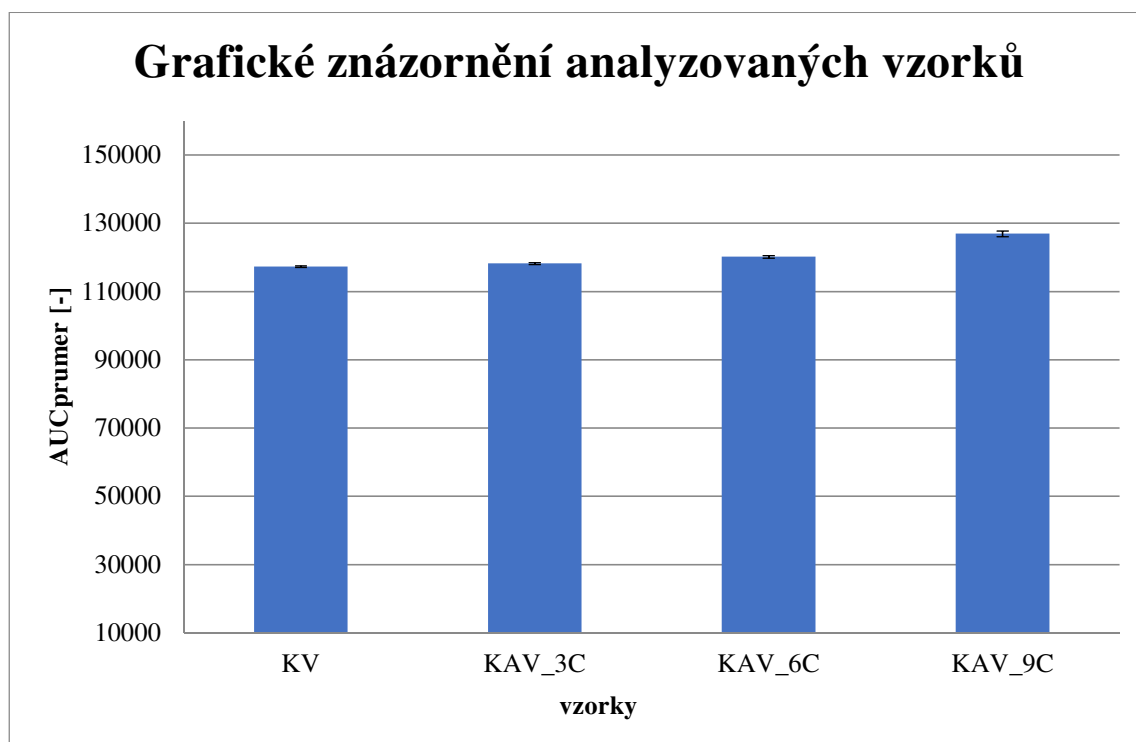
4.4. Výsledky měření

Analýzou vzorků byla zjištěna následující data.

vzorek	AUC _{prumer}	AUC _{sd}	AUC _{rsd}
KV	117282,19	219,10	0,19
KAV_3C	118163,79	360,59	0,31
KAV_6C	120147,85	858,05	0,71
KAV_9C	126897,98	167,75	0,13

Tabulka 1. analýza měřených vzorků

Vzorky označené jako KAV_3C, 6C, 9C odpovídají vzorkům odebraným po 3, 6 a 9 cyklech. KV je kontrolní vzorek odebraný před zahájením měření. AUC_{prumer} reprezentuje zprůměrovanou hodnotu plochy pod křivkou ppeeku, který je výstupem analyzační metody kapalinové chromatografie s tandemovou hmotností detekcí. Tato hodnota je bezrozměrná a slouží především k názornému porovnání jednotlivých vzorků tak, že nižší hodnota AUC_{prumer} reprezentuje nižší koncentraci 17 β -estradiolu v roztoku. Hodnota AUC_{sd} je směrodatná odchylka a AUC_{rsd} relativní směrodatná odchylka. Oba tyto prvky znázorňují míru přesnosti měření – čím nižší hodnota, tím přesnější měření.



4.5. Zhodnocení výsledků měření

Výsledná data měření jsou v přímém rozporu s počátečním předpokladem. Na rozdíl od očekávaného snižování koncentrace estrogenu 17 β -estradiolu v roztoku dochází k jeho mírnému nárůstu. Tento estrogen se tedy z roztoku neodstraní. Je důležité upozornit, že se jedná o naprosto první měření v dané problematice. Vysledovaný jev můžeme přisoudit několika různým faktorům.

První možností může být fakt, že roztok byl připraven kombinací estrogenu s destilovanou vodou. Je pravděpodobné, že použití nedestilované vody, která v sobě obsahuje podstatně více ostatních látek, může zesílit vlastnosti hydrodynamické kavitace.

Dosažení lepších výsledků by také mohlo být možné za použití testovacího okruhu s dvěma oddělenými nádržemi pro vstupní a výstupní kapalinu, protože ve stávajícím řešení se kapalina, která už prošla přes kavitační oblast, vrací zpět do zásobníkové nádrže, kde se opět částečně ředí se zatím nevyužitou kapalinou.

Za negativními výsledky měření může také stát nedostatečný čas, po který byl experiment prováděn. Zvýšením počtu cyklů průběhu skrze kavitační oblast by mělo dojít ke snížení hladiny estrogenu v roztoku.

Nedostatečné propláchnutí testovacího okruhu může mít rovněž za následek chyby v měření.

Posledním faktorem ovlivňujícím výsledky je možnost nevhodně zvolené analyzační metody. Před dalšími měřeními by bylo vhodné validovat použitou metodu.

Vzhledem k prvnímu měření v této problematice by bylo vhodné pokračovat v optimalizaci hydraulické části experimentu, zejména pak návrhu tvaru dýzy nebo zvážení použití jiného zařízení vyvolávajícího hydrodynamickou kavitaci. Doporučil bych opakování experimentu s použitím vhodnějšího testovacího okruhu a jiným roztokem estrogenu. Bylo by také namístě provést optimalizaci i u analytické části experimentu, zvážit různé metody pro zjišťování obsahu estrogenu ve vodě a vybrat z nich tu nejvhodnější. Dále by mohlo být vhodné provést měření s dalšími estrogény a porovnat jejich jednotlivé reakce po vystavení hydrodynamické kavitaci. Před samotným experimentem pak doporučuji důkladně vymýt testovací okruh.

5. Závěr

Úvodní rešeršní část práce se věnuje hydrodynamické kavitaci a její fyzikální podstatě. Jsou v ní vysvětleny pojmy úzce spjaté s hydrodynamickou kavitací jako je kritický poloměr kavitační bubliny, kritický tlak, kavitační oblast, kavitační parametr. Součástí této kapitoly je rozdělení kavitace podle její podstaty i podle způsobu jejího vyvolání. Kapitola je zakončena uvedením Rayleigh-Plessetovy rovnice, která popisuje chování kavitačních bublin.

Následující kapitola rešeršního charakteru je zaměřena na problematiku čištění vody za pomoci různých metod využívajících kavitaci, dále na popis principu odbourávání nežádoucích látek kavitací díky rozkladu vody na hydroxylové OH^\cdot radikály. Jsou zde uvedeny výhody i nevýhody použití hydrodynamické i akustické kavitace pro odstraňování špatně odbouratelných látek z vody. Následující část je věnována využití hybridních kavitačních metod, jako je například kombinace kavitace s AOP – advanced oxidation process, tedy pokročilými oxidačními metodami. Závěr kapitoly je věnován možnostem využití hydrodynamické i akustické kavitace v kombinaci s ostatními metodami pro čištění vody.

V poslední kapitole je popsáno provedení experimentu, jehož cílem bylo eliminovat špatně odbouratelnou látku 17β -estradiol z roztoku destilované vody s pomocí hydrodynamické kavitace. Tento estrogen se vyskytuje v nízkých koncentracích ve vodě a může mít při dlouhodobém působení negativní vliv na živé organismy. Z toho důvodu je vhodné zabývat se způsoby jeho eliminaci z vody. Experiment byl proveden na testovacím okruhu s objemem 3 litrů testovaného roztoku s koncentrací 1 mg/l 17β -estradiolu. Vzorky roztoku byly odebrány po 3, 6 a 9 cyklech průběhu okruhem. Analýza výsledků byla provedena pomocí metody kapalinové chromatografie s tandemovou hmotností detekcí (HPLC-MS/MS). Analýza vzorků byla provedena externě Ing. Eliškou Maršálkovou, PhD. z Botanického ústavu Akademie věd ČR. Jednalo se o první experimentální měření v dané problematice. Výsledná naměřená data byla v přímém rozporu s očekávanými výsledky. Míra koncentrace estrogenu v testované kapalině s rostoucím počtem cyklů rostla, a to dokonce nad referenční úroveň vzorku, který nebyl podroben průchodem hydrodynamickou kavitací. Toto neočekávané chování je vysvětlováno vlivem několika faktorů, jako například nevhodně zvoleného testovacího okruhu, použití roztoku s destilovanou vodou. Vliv na výsledky může mít i zvolená analytická metoda.

Pro další pokračování by bylo vhodné provést optimalizaci hydraulické i analytické části experimentu, navrhnout tvarově lépe vyhovující dýzu nebo zvážit použití jiné metody určené k vyvolání hydrodynamické kavitace. V analytické části pak navrhuji provést průzkum použitelných metod pro zjištění estrogenu ve vodě. Doporučuji navrhnout nový experiment s vhodnějším testovacím okruhem a pro roztok nepoužívat destilovanou vodu. V novém experimentu by bylo vhodné použít k testování také další estrogenu, využít jiných kavitačních metod včetně jejich kombinace s AOP metodami a tím zjistit jejich vhodnost pro odbourávání konkrétního typu estrogenu.

6. Použité zdroje

[1] BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. DOI: 10.1017/CBO9781107338760. ISBN 9781107338760.

[2] NOSKIEVIČ, Jaromír, *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních* / Vyd. 1. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 333 s. : il., tabulky. ISBN 80-03-00206-0 (váz.)

[3] Fázový diagram | Eduportál Techmania. *Eduportál | Eduportál Techmania* [online]. Techmania Science Center, o.p.s. [cit. 19.11.2018]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/fazovy-diagram>

[4] Super-cavitating Sphere – james venning. *James Venning* [online]. cit. 19.11.2018]. Dostupné z: <http://jamesvenning.net/super-cavitating-sphere>

[5] FRANC, Jean-Pierre a Jean-Marie MICHEL. *Fundamentals of cavitation*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2010, xxii, 300 stran : ilustrace. ISBN 978-90-481-6618-3.

[6] BENJAMIN, T.B. a ELLIS, A.T. The collapse of cavitation bubbles and pressures thereby produced against solid boundaries. *Phil. Trans. Roy. Soc., London Ser.*, 1966

[7] TOMITA, Y. a SHIMA, A. High-speed photographic observation of laser-induced cavitation bubbles in water. *Acustica*. 1990

[8] GAGOL, Michal, Andrzej PRZYJAZNY a Grzegorz BOCZKAJ. *Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review*. *Chemical Engineering Journal*. 2018, (338), 599-627

[9] GOGATE, P.R. a PATIL, P.N. Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2015, 25, 60-69

[10] JYOTI, K. K. a PANDIT, P. N. Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2003, 10, 255-264

[12] JYOTI, K. K. a PANDIT, P. N. *Ozone and cavitation for water disinfection*. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2004, 18, 9-19

[11] ROVDER, J. *Kavitační ohřivač*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

[13] BRAEUTIGAM, P., FRANKE, M., SCHNEIDER, R. J., LEHMANN, A., STOLLE, A., ONDRUSCHKA, B. *Degradation of carbamazepine in environmentally relevant concentrations in water by Hydrodynamic-Acoustic-Cavitation (HAC)*. *Water Research*. 2012, 46, 2469-2477

[14] SUSLICK, K. S., McNAMARA III, W. B., DIDENKO, Y. *Hot spot conditions during multi-bubble cavitation*. *Sonochemistry and Sonoluminescence* 1999, 191-204

[15] LEDVINA, M., STOKLASOVÁ A., CERMAN J. *Biochemie pro studující medicíny I. Díl*. Vyd. 2. Praha: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1414-4

[16] KOZLÍK, P. *Kapalinová chromatografie s tandemovou hmotnostní detekcí* Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova [online] [cit. 8.5.2019] Dostupné z: http://web.natur.cuni.cz/~kozlik/Prednasky/HPLC_MS_MS.pdf