



Česká zemědělská univerzita v Praze  
Fakulta životního prostředí  
Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování

**Vznik kavitačních bublin ve vodě působením intenzivních  
ultrazvukových vln a praktické využití kavitačních bublin v  
procesu extrakce**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce:  
Diplomant:

doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.  
Bc. Miloš Houžvička

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Miloš Houžvička

Krajinné inženýrství  
Regionální environmentální správa

Název práce

**Vznik kavitačních bublin ve vodě působením intenzivních ultrazvukových vln a praktické využití kavitačních bublin v procesu extrakce**

Název anglicky

**The formation of cavitation bubbles in water by the action of intense ultrasonic waves and the practical use of cavitation bubbles in the extraction process**

---

### Cíle práce

Zjistit a podrobně popsat důvody a mechanismy vzniku kavitačních bublin ve vodě, včetně role ultrazvukových vln v tomto procesu. Dále má práce za cíl provést empirický výzkum vlivu extrakce, konkrétně vybrané dřevité hmoty, za pomoci ultrazvuku v EtOH prostředí. Též posouzení vlivu kvality použitého EtOH na výsledný produkt. A analýza zjištěných skutečností.

### Metodika

Vyhledání a podrobné studium dostupné literatury k tématu a formulace logických závěrů.

V experimentální části bude použita přesná navážka konkrétní dřevité hmoty v přesně odměřeném objemu daného EtOH. Vše bude převedeno do skleněné baňky a poté bude baňka vložena do vodní lázně, nahřáté na teplotu cca 45 °C. Na vodní lázeň s vloženou baňkou bude působeno ultrazvukem o kmitočtu cca 40 kHz. Každých 5 minut bude provedena aerace obsahu baňky. Celkový čas procesů je cca 20 minut.

Další experimentování bude probíhat se stejnými druhy EtOH, ale s menšími navážkami dřevité hmoty.

Bude tak zkoumáno urychlení extrakčních procesů na organickou hmotu za použití ultrazvuku a zároveň i vlivy daného rozpouštědla.

**Doporučený rozsah práce**

50 stran textu

**Klíčová slova**

kavitační bubliny, ultrazvukové vlny, extrakce; cavitation bubbles, ultrasonic waves, extraction

---

**Doporučené zdroje informací**

- BRUJAN, Emil-Alexandru. Cavitation in non-Newtonian fluids: with biomedical and bioengineering applications. New York: Springer, 2010
- DAVADORZH, Tserengin a Ivo HRAZDIRA. Teoretická předpověď prahu pro kavitační aktivitu pulsního ultrazvuku a jeho závislosti na parametrech akustického pole a fyzikálních vlastnostech kapalin. Brno: s.n., 1991
- FRANC, Jean-Pierre a Jean-Marie MICHEL. Fundamentals of cavitation. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ©2004. Fluid mechanics and its applications.
- OMETTO, Francesco, Gerardo QUIROGA, Pavel PŠENIČKA, Rachel WHITTON, Bruce JEFFERSON a Raffaella VILLA. Impacts of microalgae pre-treatments for improved anaerobic digestion: thermal treatment, thermal hydrolysis, ultrasound and enzymatic hydrolysis. Water research, 2014
- RAICHEL, Daniel R. The science and applications of acoustics. 2nd ed. New York: Springer, 2006
- ZIMA, Patrik. Cavitation rates and bubble dynamics in gas-contaminated water. 2002
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2022/23 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

doc. Mgr. Marek Vach, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 1. 2. 2023

**prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 2. 2023

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2023

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vznik kavitačních bublin ve vodě působením intenzivních ultrazvukových vln vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti GDPR.

V Praze dne 27. 3. 2023

.....

Bc. Miloš Houžvička

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval všem ochotným lidem, kteří mně svým přístupem a radami pomohli k vypracování této diplomové práce, především pak školiteli Ing. Davidu Vokounovi, CSc. z Fyzikálního ústavu AV ČR za jeho rady, postřehy a podnětné návrhy při řešení dané problematiky. Též chci poděkovat vedoucímu práce doc. Mgr. Marku Vachovi, Ph.D. za jeho trpělivost a vždy vstřícný přístup. Vděčný jsem i své Univerzitě za vědomosti získané při studiu.

## **Abstrakt**

Kavitace je obecně definována jako vznik, následný růst a kolaps dutin v kapalině generovaných několika různými způsoby, což vede k velmi vysokým lokálním hustotám energie.

Kavitace je spojována s obrovským potenciálem pro intenzifikaci některých fyzikálních nebo chemických procesů energeticky účinným způsobem.

Vyhledáváním a podrobným studiem dostupné literatury k tématu (především kavitační procesy ve vodě generované pomocí ultrazvukových intenzivních vln) jsem popsal důvody a mechanismy vzniku kavitačních bublin, včetně role ultrazvukových vln v tomto procesu. Při studiu dostupné literatury jsem se zaměřil hlavně na rusko-jazyčné zdroje.

Na základě analýzy vlivu akustických parametrů a charakteristik kavitačních procesů bylo zjištěno, že účinnost všech procesů provázejících kavitaci závisí na akustickém tlaku v kapalině vznikajícím při zhroucení kavitačních bublin a na jejich počtu. Obecně je hodnota akustického tlaku určena parametry obsahu plynu a závisí také na teplotě kapaliny.

V experimentální části, zabývající přípravou whisky, se potvrdilo, že kavitace může urychlit přípravu whisky.

**Klíčová slova:** kavitační bubliny, ultrazvukové vlny, whisky;

## **Abstract**

Cavitation is generally defined as the formation, subsequent growth and collapse of cavities in a fluid generated in several different ways, leading to very high local energy densities.

Cavitation is associated with a huge potential for intensifying certain physical or chemical processes in an energy-efficient manner.

By searching and studying in detail the available literature on the topic (mainly cavitation processes in water generated by ultrasonic intensity waves), I have described the reasons and mechanisms of cavitation bubble formation, including the

role of ultrasonic waves in this process. In studying the available literature I focused mainly on Russian-language sources.

On the basis of the analysis of the influence of acoustic parameters and characteristics of cavitation processes, it was found that the efficiency of all processes accompanying cavitation depends on the acoustic pressure in the liquid generated during the collapse of cavitation bubbles and on their number. In general, the value of the acoustic pressure is determined by the gas content parameters and also depends on the temperature of the liquid.

In the experimental part dealing with the preparation of whisky, it was confirmed that cavitation can speed up the preparation of whisky.

**Keywords:** cavitation bubbles, ultrasonic waves, whisky

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÉ ZÁKLADY KAVITAČNÍHO PROJEVU</b> .....	<b>11</b>
2.1	FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY KAVITAČNÍHO EFEKTU .....	11
2.2	VÝVOJOVÉ FÁZE A TYPY KAVITACE .....	15
2.3	NEGATIVNÍ PROJEVY KAVITACE A ZPŮSOBY JEJICH ODSTRANĚNÍ .....	17
2.4	POZITIVNÍ PROJEVY KAVITACE A MOŽNOST JEJICH PRAKTICKÉHO POUŽITÍ .....	19
2.5	SONOCHEMIE .....	20
2.6	ZÁVĚRY Z KAPITOLY .....	24
<b>3</b>	<b>ANALÝZA VLIVU AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ A VLASTNOSTÍ KAPALINY NA KAVITAČNÍ PROCESY</b> .....	<b>25</b>
3.1	ZJEDNODUŠENÁ RAYLEIGH-PLESSETOVA ROVNICE .....	25
3.2	RAYLEIGHŮV ČAS .....	27
3.3	PARAMETR OBSAHU PLYNU, $\Delta$ .....	27
3.4	TEPLOTA A PLYNOVÉ SJEDNOCENÍ KAPALINY .....	30
3.5	HYDROSTATICKÝ TLAK .....	33
3.6	IMPULZNÍ DOPAD .....	37
3.7	ZÁVĚRY KAPITOLY .....	39
<b>4</b>	<b>ZPŮSOBY PRAKTICKÉ APLIKACE ÚČINKU KAVITACE</b> .....	<b>41</b>
4.1	VYHLÍDKY NA POUŽITÍ KAVITAČNÍCH TECHNOLOGIÍ .....	41
4.2	KAVITACE V POTRAVINÁŘSKÉM PRŮMYSLU .....	48
4.3	APLIKACE ULTRAZVUKOVÝCH KAVITAČNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO ČIŠTĚNÍ ELASTICKÝCH PLOCH .....	51
4.4	ULTRAZVUKOVÁ PRŮTOKOVÁ KAVITAČNÍ JEDNOTKA PRO ZLEPŠENÍ EFEKTIVITY TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ .....	59
4.5	HODNOCENÍ ÚČINNOSTI KAVITAČNÍCH REAKTORŮ POMOCÍ MODELOVÝCH REAKCÍ.....	62
4.6	ZÁVĚRY KAPITOLY .....	64
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>66</b>
5.1	CÍL A POPIS EXPERIMENTU .....	66
5.2	VLASTNÍ LABORATORNÍ PROCES .....	68
5.3	ZÁVĚR EXPERIMENTU:.....	71
<b>6</b>	<b>DISKUSE</b> .....	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>81</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>83</b>



# 1 ÚVOD

Zlepšení efektivity výroby je neoddelitelně spojeno s hledáním a navrhováním zařízení nové technické úrovně a též dokonalejších technologií. Dnes používané technologie a zařízení pracují na produkci konkurenceschopných výrobků, a proto by měly plně uspokojit požadavky na spotřebu energie a zdrojů, bezpečnosti životního prostředí, poptávku na domácím i zahraničním trhu. Cíle je dosaženo použitím progresivních inovativních myšlenek.

Jedním z takových inovativních směrů je užitečné použití akustické kavitace. Proces kavitace je již dlouho znám a až do nedávné doby byly informace o tomto jevu převážně negativní – kavitace způsobuje erozi ploch, hluk a vibrace v hydraulických systémech, zhoršuje se energetické charakteristiky hydraulických strojů, což vede k jejich opotřebení.

O pozitivních vlastnostech kavitace začali vědci mluvit až koncem minulého století. Ale již dnes jsou navržena a implementována různá zařízení pro zpracování povrchů, jejichž princip práce je založen na působení kavitace. Jsou vytvořeny technologie, které umožňují míchání těžce mísitelných nebo vůbec nemísitelných medií prostřednictvím kavitace atd.

V současné době se kavitační technologie stále více rozvíjejí pro teplárenství, petrochemický, kovozpracující a potravinářský průmysl. To vyžaduje od budoucích specialistů důkladnou znalost fyzikálních procesů souvisejících s účinkem kavitace, což vysvětluje nálehavost tématu diplomové práce – « Tvorba kavitačních bublin ve vodě v důsledku intenzivních ultrazvukových vln». Cílem práce je prozkoumat fyzikální jev tvorby kavitačních bublin ve vodě, kvůli intenzivnímu působení ultrazvukových vln a poskytnout doporučení pro jeho použití v průmyslu.

Za účelem dosažení stanoveného cíle v práci jsou řešeny následující úkoly:

- Vytvořit teoretické základy pro projev kavitace.
- Analyzovat vliv akustických parametrů a charakteristik kapaliny na kavitační procesy.
- Určit způsoby praktické aplikace kavitačního efektu.

Předmětem výzkumu jsou procesy výskytu akustické kavitace.

- Demonstrovat využití kavitačního efektu v experimentální části práce na příkladu přípravy whisky.

Objektem výzkumu jsou metody a prostředky praktické implementace kavitačního efektu.

## 2 TEORETICKÉ ZÁKLADY KAVITAČNÍHO PROJEVU

### 2.1 Fyzikální základy kavitačního efektu

Účinek kavitace je člověku znám po dlouhou dobu. Jedny z prvních, v nichž se zvažoval fenomén kavitace, byly teoretické práce Reynoldse (Reynolds, 1873; Pirsol, 1975). Ve skutečnosti lidé věnovali pozornost fenoménu kavitace již na konci 19. století, tento objev byl učiněn v procesu zkoumání námořních lodí (Roždestvenskij, 1977). Po objevení byla kavitace považována za pouze a jenom negativní jev, který vedl ke zničení povrchů lodních vrtulí a také způsoboval hluk a vibrace. V minulém století, konkrétně až do 40. let, bylo studium kavitačních procesů velmi pomalé. Důvodem této situace byla obtížnost simulace významných rychlostí tekutin, které byly nezbytné ke stimulaci kavitace v laboratorních studiích. Rychlý rozvoj výzkumu kavitace začal na konci 40. let minulého století. Rozvíjel se výzkum v oblasti snižování škodlivých účinků kavitace na provoz vrtulí, hydraulických turbín a čerpadlových prvků. Vědci se navíc pokusili zvážit příznivé účinky, které kavitaci doprovázely.

Kavitací se nazýval proces tvorby a následného prasknutí bublin vzduchu (páry), které se nacházejí v proudu kapaliny, vzniku hluku a hydraulické rázy, vzniku dutin v kapalině (kavitační bubliny nebo dutiny), které jsou schopné obsahovat řídké páry. Obvykle se kavitace začíná projevovat pod vlivem místního poklesu tlaku v kapalině menším, než tlak nasycení, který se projevuje při vyšší rychlosti kapaliny (hydrodynamická kavitace), nebo v důsledku působení akustické vlny značné intenzity v procesu ředění (akustická kavitace). Existují i jiné příčiny kavitačního účinku. Bublina pohybující se v toku kapaliny do oblasti s vysokým tlakem nebo během poloperiod komprese, kavitační bublina se zhroutí, zatímco se vytvoří rázová vlna. V zásadě je kavitace založena na stejném mechanismu účinku jako rázová vlna ve vzduchu, která se objevuje v okamžiku překonání zvukové bariéry hmotným tělesem.

Projev kavitace má místní charakter a vyskytuje se v místech, kde existují požadované podmínky. Kavitace se nemůže sama od sebe pohybovat v prostředí výskytu. Kavitační procesy vedou k narušování povrchu vrtule, hydraulické turbíny, akustických emitorů, dílů tlumičů, kapalinové spojky atp. Kavitační procesy nemají pouze destrukční projevy, ale i užitečné vlastnosti, které se používají pro potřeby průmyslu, v lékařství, ve vojenské technice a v dalších souvisejících oblastech.

Fyzikální význam kavitace je podobný procesu varu kapaliny. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že v případě varu dochází ke změně fázového stavu kapaliny při tlaku zprůměrovaném na objem kapaliny rovném tlaku nasycených par, zatímco během kavitace je průměrný objemový tlak kapaliny vyšší než tlak nasycených par a pokles tlaku je lokální.

Následné studie kavitačních procesů zjistily, že hlavní role při tvorbě bublin při kavitaci patří plynům, které se uvolňují uvnitř vznikajících bublin. Tyto plyny jsou neustále v kapalině a kvůli místnímu poklesu tlaku se začínají aktivně uvolňovat uvnitř těchto bublin.

Vzhledem k tomu, že v důsledku působení proměnlivého místního tlaku kapaliny jsou bubliny schopné ostře se smršťovat a expandovat, může se proto teplota a tlak plynu uvnitř bublin měnit v rámci významných mezí. Když se generují kavitační procesy v reaktoru, lokální tlak uvnitř bublin může dosáhnout v krátkých časových intervalech 100-5000 atmosfér a teplota 500-15000 K (Suslick, 1990).

Je nutné vzít v úvahu skutečnost, že koncentrace plynu v rozpuštěné kapalině je vyšší než procento kyslíku ve srovnání se vzduchem, proto jsou plyny v bublinách během kavitace chemicky agresivnější než atmosférický vzduch. To nakonec vede k oxidaci (reakci) většiny obvykle inertních materiálů.

Na základě metod navození kavitace, lze známé procesy rozdělit na: periodické efekty (akustická kavitace), jednorázovou expozici ((hydrodynamická kavitace v toku, Venturiho trubice, laserová kavitace, elektrohydraulický výbuch, mechanický (hydraulický) šok atd.)), jakož i kombinované efekty (hydrodynamické sirény a píšťalky, rotační přístroje všech provedení) (Smorodov, 2008).

Akustická kavitace je proces tvorby, růstu, střídání pulzací a dalšího kolapsu bublin plynu v kapalině v důsledku vystavení měnícímu se tlaku z času na čas (Smorodov, 2008). Frekvence periodických zvlnění tlaku v kapalině není stejná, může být v desítkách Hertzů nebo desítkách megahertzů.

Pro určitý frekvenční rozsah se používá charakteristický typ měniče elektrických kmitů na akustické vibrace. Pro nízké frekvence (10-5000 Hz) se používají nejčastěji elektromagnetické nebo mechanické měniče. Nízká frekvence (velká vlnová délka) ztěžuje použití v tomto kmitočtovém pásmu rezonančních jevů systému emitor-kapalina. To vede k nízké efektivnosti zvyšování energie v kapalině.

Pro frekvenční rozsah 5-50 kHz se používají magnetostrikční emitory, které působí v rezonančním režimu. Tato soustava je ideální pro konstrukce emitorů s geometrickými parametry vlnového systému. Rozměry se mohou pohybovat od několika centimetrů do desítek centimetrů (Smorodov, 2008).

Pro vysoké ultrazvukové frekvence se používají nejčastěji piezoelektrické emitory. Vzhledem k malé vlnové délce pro daný frekvenční rozsah je možné dosáhnout efektivního zaostření ultrazvuku. Tohoto stavu může být dosaženo při vytváření silných ultrazvukových polí.

Skutečnost, že se kavitace projevuje a vyvíjí ve specifické ustálené části kapaliny, která se běžně nazývá kavitační oblast nebo kavitační mrak, je společná pro existující akustické metody tvorby kavitace. Proto k vlivu na objemový podíl média z kapaliny a plynu dochází opakovaně, a to je v průběhu času důvodem pro změnu jeho vlastností (nasycení plynu, velikost bublin, teplota). Takové změny nelze vždy kontrolovat. Transformace vlastností uvažovaného média může vést ke změně toku kavitačního působení. V tomto ohledu může být studium fyzikální podstaty kavitačních procesů a studium dynamických procesů vývoje bublin kavitačních mraků velmi obtížné a nepohodlné (Smorodov, 2008).

Významný vývoj experimentální techniky zkoumání účinku ultrazvukové kavitace začal po objevu jevu stabilních pulzací jedné plynové bubliny v roce 1990. Tento jev je spojen se sonoluminiscencí, v souvislosti s níž byl celý soubor jevů nazýván SBSL (Single-Bubble SonoLuminescence).

Kavitační procesy v toku kapaliny se projevují v případě, kdy dochází k rychlé změně rychlosti toku. Změna rychlosti vede v souladu s rovnicí hydrodynamiky ke změně tlaku v kapalině, což je zase příčinou růstu a budoucího zhroucení plynové bubliny. Hlavním rozdílem ve vztahu k akustické kavitaci bude jednorázový účinek na počáteční mikrobublině („zárodek“ kavitace), v tomto ohledu rezonanční metody akumulace energie plynovou bublinou pro tento případ nelze zavést. Velkou roli hraje i to, že v takové situaci chybí „oblak“ bublin, které odvádějí tok tekutiny. Z tohoto důvodu neexistuje proces „vývoje“ kavitace. Dynamika kavitačních procesů se nemění a především je určena vlastnostmi kapaliny i charakterem toku. V tomto případě je studium takových procesů náročným úkolem kvůli obtížné reprodukovatelnosti složení a struktury kavitačních zárodků v kapalině. Kromě toho je velmi důležitá přítomnost stochastických turbulentních zvlnění toku. Technicky se podařilo vyvinout

pro různé průmyslové oblasti kavitační zařízení, která mají podobu zužujících se trubek a hydrodynamických píšťal (Smorodov, 2008).

Vyvolání kavitačních procesů v důsledku jednorázové expozice se jeví jako souhrn metod přenosu energie do plynové bubliny v důsledku jediného projevu fyzického dopadu na nehybnou tekutinu. V tomto případě jsou takové bubliny vytvořeny při působení laserovým impulsem či elektrohydraulickou explozí nebo jsou zavedeny do tekutiny uměle (vlivem pístu v důsledku mechanického nárazu). Složení paroplynové směsi pro první variantu skutečně nelze kontrolovat a v případě nárazu může být složení plynu a primární rozměry bubliny dané. To slouží jako závažná výhoda této metody v procesu zkoumání kavitačních jevů.

Kombinované metody buzení kavitace spočívají v inicializaci tlakových pulzací v průtoku kapaliny prostřednictvím krátkodobých změn průtoku kapaliny, realizovaných mechanickými zařízeními různých konstrukcí. Díky své jednoduché konstrukci, značnému výkonu a produktivitě se tato zařízení používají pro různé technologické procesy, které jsou spojeny s operacemi hromadného přenosu. Nejčastěji se používají hydrodynamické sirény, píšťalky, rotační hydrodynamické instalace.

Významná část kavitačních účinků souvisí s významnou koncentrací (kumulací) energie ve velmi malém objemu plynných a kapalných médií. Dnes je známo, že kavitační kumulace energie je nejúčinnějším způsobem kumulace všech existujících metod koncentrace energie a má hodnotu  $10^{12}$ . Zde mluvíme o poměru hustoty energie v kavitační bublině k hustotě energie akustického pole.

Vysoká hustota energie v kavitačních bublinách je způsobena především velmi zanedbatelným objemem hmoty během doby imploze bubliny na minimální poloměr. V souladu s provedenými studii má poloměr bubliny během ultrazvukové kavitace na konci komprese,  $R_{\min}$ , obvykle rozměry  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  m s rovnovážným (počátečním) poloměrem  $R_0 = (1-10) \cdot 10^{-6}$  m. Změna objemu bubliny (a hustoty plynu) je tedy nejméně 1000 %, což způsobuje extrémní koncentrace energie původně uložené v bublině.

## 2.2 Vývojové fáze a typy kavitace

Bubliny, které se tvoří v kavitačním prostoru, se podle principu svého vlivu na zrychlený technický proces dělí do tří skupin (Hmelev et al., 2007):

1. Malé pulzující bubliny. Během fáze zředění podléhají expanzi do malého poloměru. Rychlost zhroucení takových bublin je velmi nízká a nestačí k vytvoření rázové vlny.

2. Kavitační bubliny. Jejich pulzace vede k tvorbě intenzivních rázových vln ve vodném prostředí.

3. Velké pulzující bubliny. Takové bubliny mohou stabilně existovat po desítky nebo stovky období. Mohou být viditelné pouhým okem. Jejich rozměry se v čase prakticky nemění a proměnné tlaky vytvářené v kapalině během jejich pulzací jsou velmi malé.

Přebytek každého typu bublin určuje způsob vývoje kavitace.

Při analýze dat prací (Hmelev et al., 2007; Rozenberg, 1968, 1970; Barsukov, 2005) rozlišujeme následující režimy kavitačního toku v závislosti na síle ultrazvukového záření.

1. Kavitace není pozorována kvůli malým amplitudám akustického tlaku. To je způsobeno skutečností, že ultrazvuková vlna v procesu pohybu kapalinou vytváří kompresní zóny a zóny zředění, které mění místa v každé půlperiodě vlny. Výsledkem tohoto postupu procesu je, že kavitační jádro vytváří lineární radiální vibrace s malými amplitudami (zlomky mikrometru) (Hmelev et al., 2007).

2. Kavitace začíná. V případě následného zvýšení amplitudy akustického tlaku ( $10^5$  Pa ve vodě a  $(3-5) \cdot 10^5$  Pa v oleji) (Hmelev et al., 2007) získává hodnota amplitudy oscilací poloměru bublin srovnatelné rozměry s počátečním poloměrem, v důsledku čehož je porušena linearita oscilací. Specifikovaná nelinearita je charakterizována skutečností, že rychlost kontrakce poloměru bubliny během komprese je mnohem větší než rychlost expanze bubliny během zředění.

Tato okolnost je důvodem, že při působení setrvačných sil se nejmenší poloměr bubliny zmenší natolik, aby tlak plynu v ní překročil desítky atmosfér. Takové lokální zvýšení tlaku je charakterizováno rázovou vlnou s malou amplitudou tlaku v přední

části, která se se vzdáleností rozpadá podle zákona  $O(1/r^2)$ , to znamená, že má podobný asymptotický průběh jako  $1/r^2$ . Výsledkem je počáteční fáze kavitace.

Vzhledem k tomu, že ve vzdálenosti asi 5  $\mu\text{m}$  se tlak rázové vlny pohybuje v rozmezí  $2 \cdot 10^5$  až  $3 \cdot 10^5$  Pa, nemůže tato rázová vlna ovlivnit průběh technologických procesů. Taková vlna je srovnatelná se statickým tlakem v kapalině (Hmelev et al., 2007).

3. Kavitace je v pokročilé fázi. Následné amplitudy akustického tlaku přispívají k velkému zvýšení amplitudy tlaku rázových vln v procesu komprese (kolapsu) kavitačních bublin. Fáze rozvinuté kavitace probíhá. Lze ji charakterizovat tvorbou rychle rostoucích bublin plyných par, které se během doby stlačení velmi rychle zmenšují v objemu, v důsledku čehož dojde ke zhroucení. V procesu kolapsu se uvnitř bublin vytváří značný tlak až do  $10^9$  Pa, v bublinách se směs páry a plynu zahřívá na 8 000 -12 000 K. Rázové vlny, které se objevují v důsledku kolapsu, jsou hlavním hnacím faktorem řady technologických procesů. Oscilace bubliny jsou poznamenány vysokou radiální rychlostí stěn, která překračuje rychlost zvuku (340 m/s) (Hmelev et al., 2007).

4. Kavitace mizí. V důsledku zvýšení amplitudy akustického tlaku nad kritickou hodnotu získává kavitační bublina kritické rozměry, a proto degenerují na bubliny s dlouhou životností (Hmelev et al., 2007). Po značný počet období takové bubliny kmitají kolem svých největších velikostí (přes 100–1 000 mikronů). Bubliny s dlouhou životností prakticky nepodléhají kolapsu, a proto neovlivňují průběh technologických procesů v kapalných médiích. Vzhledem k tomu, že velikost bubliny se prakticky nemění, v důsledku toho je spotřeba energie vynaložené na práci vedoucí ke změně velikosti bubliny stejně malá. V tomto případě nízký vlnový odpor degenerované kavitační zóny vede k tomu, že bubliny, které mají významný stínící účinek na šíření ultrazvukových vibrací, neumožňují šíření ultrazvukové energie hluboko do média.

V tomto ohledu je velmi zajímavá fáze rozvinuté kavitace (Hmelev et al., 2007; Barsukov, 2005). Tvoří se při určitém rozsahu intenzit, který je odlišný s ohledem na všechny typy nosné kapalné fáze zpracovaného heterogenního média.



### 2.3 Negativní projevy kavitace a způsoby jejich odstranění

Hlavním negativním faktorem kavitace je eroze. Zvýšený, rychle se měnící tlak během vln tepelného šoku vede k tomu, že materiál nacházející se vedle stlačující bubliny podléhá destrukci, což je jeden z důvodů, proč mohou nastat únavové procesy (Èpštejn, 1970).

Použité čerpací jednotky, turbínové jednotky, lodní šrouby, různé typy klapky a ventilů často podléhají významné erozi (Obr. 1). Proces eroze materiálu může probíhat velmi rychle, například mohou být lodní šrouby pohlcneny erozí během jedné zaoceánské plavby. Kola čerpacích jednotek mohou po několika týdnech provozu selhat. V tomto ohledu je velmi často po stanovených časových intervalech nutné svařovat erodované otvory, které vznikají na lopatkách turbíny vlivem kavitace. Za jiných okolností mohou mechanismy fungovat několik let v kavitačních podmínkách bez viditelného poškození.



Obr. 1– Kavitační eroze na lopatkách lodního šroubu (Asnaghi, 2015).

Dnes stále neexistuje přesvědčivá odpověď, za jakých podmínek začíná hmatatelná kavitační eroze, ale je zřejmé, že se zvyšuje se zvyšováním rychlosti kapaliny ve vztahu k jednotkám strojů a mechanismů pracujících v kapalině.

Chemická agresivita plynů v bublinách, které mají vysokou teplotu vede k erozi materiálů při interakci s kapalinou, která je vystavena kavitaci. Taková eroze je hlavním faktorem negativního projevu kavitace. Další faktor se vyznačuje značnými tlakovými rázy, které se projevují v důsledku zhroucení bublin a ovlivňují vnější povrch různých materiálů.

Eroze kovů během kavitace vede ke zničení vrtulí různých lodí, výkonných orgánů čerpadel, jednotek hydraulických turbín atd. Kavitace vede k hluku, vibracím a snížení výkonu hydraulických strojů.

Kavitace přispívá ke snížení vztlaku a ke zvýšení odporu lopatek lodních šroubů, navíc výrazně zhoršuje vlastnosti různých vzpěr, šroubů, čerpadel a turbín. Účinek kavitace je často studován při experimentech v hydrodynamických trubkách, jeho tvorba je však dostatečná pro potvrzení distribuce tlaku, která se počítá teoreticky nebo nasimulovaným prouděním ve větrných tunelech (Ěpštejn, 1970).

Zhroucení kavitační bubliny je důvodem, proč se energie okolní kapaliny koncentruje ve velmi malých objemech. Z tohoto důvodu se vytvářejí zóny se zvýšenými teplotami a objevují se rázové vlny, které vytvářejí hluk a způsobují erozi kovů. Hluk, který se vyskytuje během kavitace, je pro ponorky vážným problémem, může k nim přilákat nepřítel. Je známo, že ničivému vlivu kavitace mohou podléhat i látky chemicky inertní vůči kyslíku (zlato, sklo atd.). Zmíněné procesy u těchto materiálů probíhají velmi pomalu. Tato skutečnost naznačuje, že kromě faktorů chemické agresivity plynů obsažených v bublinách se jeví jako významný faktor tlakových rázů, ke kterým dochází při zhroucení bublin. Kavitace způsobuje značné opotřebení pracovních částí a může výrazně zkrátit životnost šroubů a čerpadel. V metrologii, při použití ultrazvukových průtokoměrů, kavitační bubliny modulují vlny v širokém spektru, a to i na frekvencích emitovaných průtokoměrem, což vede ke zkreslení jeho odečtů.

Aby se eliminovaly negativní důsledky působení kavitace na jednotky a části strojů, designéři se snaží změnit jejich konstrukci tak, aby vyloučili tvorbu dutin nebo eliminovali destrukci těchto dutin na povrchu součástí. Pokud není možné změnit konstrukci zařízení, je povoleno přidat ochranný povlak, například ve formě tepelného nástříku slitin na základě kobaltu. Určité vyhlídky otevírá vývoj metod pro získávání materiálů odolnějších proti erozi (jako je chrom-manganová ocel), které kombinují tvrdost a plasticitu. Některé studie (Santa, 2009) uvádí výsledky neúspěšných pokusů, kde korozní odolnost WC/ Co–Ni a Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> povlaků není větší než korozní odolnost ocelového substrátu. Jiná studie (Lin et al., 2006) pojednává o odolnosti vůči kavitační korozi Ni-P-SiC kompozitních povlaků.

U hydraulických strojů se často používají doplňovací zařízení, která zahrnují přídavné čerpadlo. Kapalina z takového zařízení je vstřikována přes speciální ventil

do hydraulického systému, ve kterém tlak začíná klesat méně než nastavený. Když je tlak v hydraulickém systému udržován na přijatelné úrovni, kapalina z přídavného čerpadla je vypouštěna do nádrže. Takové systémy jsou široce používány na rypadlech.

Kavitace v krvi je pro lidské zdraví velmi nebezpečná. Tok krve v tepnách a žilách se velmi liší od přirozeného toku tekutin, protože krev je v systému elastických „trubek“ a podléhá znatelným pulzacím. Je známo, že kavitace ovlivňuje srdeční chlopně, poškozuje ji a vede k zesílení stěn tepen, což může být příčinou aterosklerózy. Tedy v medicíně použité nástroje typu soustředěný ultrazvuk a laser mohou generovat výše zmíněný nežádoucí efekt.

Kavitace v nádrži může být příčinou smrti ryb. U většiny vodních elektráren je faktem, že ryby v proudu vody padají do lopatek turbíny, a proto většina z nich zemře. Současně nebylo zaznamenáno žádné mechanické poškození na tělech uhynulých ryb, proto se má za to, že příčinou jejich úhynu není mechanický účinek lopatek turbíny, ale nízký tlak a velmi vysoké tlakové spády způsobené kavitací na lopatkách.

#### **2.4 Pozitivní projevy kavitace a možnost jejich praktického použití**

V některých případech se kavitace používá jako prospěšný jev. Akustická kavitace má některé výhody. Používá se v zařízeních za účelem čištění různých částí, jako jsou holicí hlavy nebo přesné ventily, navíc jej lze použít k protřepávání a míchání v řadě technických procesů. Dnes se pro echolokaci topografie dna oceánů a moří používá zdroj kavitačního zvuku (Gorškov et Ruseckij, 1962). Venturiho trubice nebo škrtkící klapka se používají k regulaci průtoku pomocí kavitačního principu. Zde kavitační procesy vedou k blokovacímu efektu, který je podobný blokování toků stlačeného plynu při nadkritickém tlakovém rozdílu.

Ultrazvuková kavitace může být použita v řadě výrobních cyklů, například k urychlení chemických reakcí, čištění, odplynění kapalin, emulgace. V těchto případech je vliv ultrazvukové kavitace způsoben jedním nebo dvěma efekty, které vytváří. Rezonanční bubliny fungují jako směšovač, který rozšiřuje kontaktní plochu s ohledem na kapaliny nebo mezi kapalinu a povrch, ve kterém se nachází. Podobně se provádějí operace čištění a emulgování obtížně mísitelných kapalin.

Ultrazvuková kavitace se často používá k aktivaci chemických reakcí, ke kterým nedochází bez její účasti. Tato skutečnost se týká hlavně reakcí, které probíhají ve vodném prostředí. Studie (Pirsol, 1975) popisuje významný počet chemických reakcí, které jsou realizovány nebo zrychleny v důsledku působení ultrazvukové kavitace. Například když se na polymerní roztoky aplikují ultrazvukové vlny o vysoké intenzitě, jejich viskozita klesá v důsledku destrukce chemických vazeb v polymerním řetězci.

Kavitace vytváří destruktivní účinek na červené krvinky, kvasinkové buňky, stejně jako bakterie, kvůli nimž se používá při extrakci buněk. Je známo, že prostřednictvím kavitace lze extrahovat enzymy, které mají malou molekulovou hmotnost.

Kavitace se používá k odstranění virů z infikované tkáně. Je známo, že v případě nízké intenzity kavitace bude stimulován růst organismů a se zvýšením jeho intenzity přijde určitá hranice růstu, po které se úplně zastaví. Rychlost úmrtí organismů bude narůstat s prodloužením doby expozice kavitace a teploty. Existuje předpoklad, že ničení bakterií závisí na účincích kavitace uvnitř bakterií a na produkci peroxidu vodíku ve vodě. Hlavními faktory ničení virů jsou plyn uvolněný z roztoku a změna tlaku.

## 2.5 Sonochemie

Sonochemie je odvětví chemie, které studuje interakci silných akustických vln a výsledné chemické a fyzikálně-chemické účinky a řídí se parametry, mezi něž patří amplituda a frekvence aplikovaného zvukového pole, teplota, povrchové napětí, tlak par a geometrie nádoby (Mason et Lorimer, 1988). Těsné propojení těchto parametrů, stejně jako malá velikost a vysoká frekvence oscilací mikrobublin a nízká koncentrace částic v jedné bublině, činí experimentální a teoretické studie sonochemie velmi obtížnými. Přesto byla provedena řada studií z různých úhlů pohledu, z nichž každá poskytuje užitečné poznatky o tomto fascinujícím fenoménu.

Ultrazvuk (od 20 kHz do 100 kHz) může generovat vysokou akustickou energii a ovlivňovat chemickou reaktivitu (Mason et Lorimer, 1988). Ultrazvukové záření zintenzivňuje chemické reakce v roztoku tvorbou kavitačních mikrobublin. Růst a kolaps těchto mikrobublek vede k přenosu a soustředění energie z pohybu

akustického měniče na makroúrovni na dvojice v mikroměřítku uvnitř bublinek. Během kolapsu parní fáze dochází uvnitř bubliny k extrémně vysokým tlakům v řádu stovek atmosfér a extrémně vysokým teplotám v řádu tisíců stupňů Kelvina, což vede ke vzniku vysoce reaktivních volných radikálů. Tento jedinečný mechanismus soustředění energie umožňuje interakci sloučenin ve vodném roztoku.

Gaitan a spolupracovníci a Matsumoto a Takemura studovali vliv tepelné vodivosti, kondenzace páry a difúze nekondenzujícího plynu na pohyb mikrobublin. Došli k závěru, že tepelná vodivost a počáteční poloměr mikrobublin jsou kritickými parametry pro předpověď tlaku a teploty při kolapsu bublin (Gaitan, 1992; Matsumoto et Takemura, 1994).

Teoretické modely dynamiky bublin jsou stále komplexnější a přesnější a poskytují užitečné poznatky o sonochemických jevech. Experimentátoři zároveň intenzivně zkoumali tvorbu volných radikálů v ultrazvukovém poli. Anbar a Pecht zkoumali sonochemické místo vzniku peroxidu vodíku a zjistili, že  $\text{H}_2\text{O}_2$  se tvoří spíše v kavitačních bublinách než v kapalně fázi (Anbar et Pecht, 1964). Hart a Henglein provedli rozsáhlé experimenty, při nichž měřili rychlost tvorby  $\text{H}_2\text{O}_2$  v různých směsích plynů při ošetření vody ultrazvukovým zářením (Hart et Henglein, 1987; Henglein, 1993).

Několik nedávných studií se pokusilo vysvětlit interakci mezi pohybem bublin a chemickými reakcemi. Snad nejpronikavější a rozhodně nejrozsáhlejší z těchto studií je studie Kamatha, Prosperettiho a Egolfopoulose (Kamath et al., 1993). Pomocí komplexního termomodelu odhadli vznik radikálů v důsledku disociace vodní páry v oscilující argonové bublině. Došli k závěru, že poloměr bubliny a přenos tepla mezi bublinou a kapalinou jsou kritickými parametry pro výtěžnost sonochemických procesů. Ačkoli je tento model podrobný, nezohledňuje vztah mezi dynamikou bublin a chemickou kinetikou. Vliv chemických reakcí na teplotní pole bubliny se tedy nebere v úvahu. Kromě toho se předpokládá, že vlastnosti plynu jsou konstantní. Vlastnosti, jako je entalpie, entropie a měrná tepelná kapacita, jsou však výrazně závislé na teplotě a jsou důležité pro předpověď sonochemického chování.

V práci (Gong et al., 1998) je představen model, který přímo souvisí s dynamikou a chemickou kinetikou jedné kavitační bubliny v ultrazvukovém poli. Tento model je potvrzen dostupnými experimentálními údaji. Článek poskytuje srovnání získaných údajů s experimentálními daty. Bylo zjištěno, že tento model nejen

zachycuje základní charakteristiky dynamiky kolapsu bublin, ale také kvalitativně předpovídá detailní chování sonochemických výtěžků vznikajících v důsledku změn obsahu a složení rozpuštěného plynu. Tento model poskytuje nástroj pro studium parametrických vlivů na sonochemické procesy, vlivu složení plynu a vlivu chemických reakcí na dynamiku bublin. Model ukazuje, že radikál OH se může hromadit v parní fázi bubliny a jeho koncentrace se s každou oscilací zvyšuje. Tento neobvyklý jev je způsoben rychlým rozpínáním bubliny po jejím zhroucení, což snižuje koncentraci složek, a tím i rychlost reakce. Vzhledem k tomu, že předložený model uvažuje pouze chemické procesy probíhající v parní fázi jedné kavitační bubliny bez zohlednění transportu částic do roztoku, nemůže poskytnout nástroj pro zkoumání celkové rychlosti sonochemických reakcí. Model nicméně umožňuje sledovat základní parametrické vztahy a zkoumat chemickou kinetiku během kolapsu bublin.

Rázové vlny způsobené kavitací v kapalných a pevných suspenzích způsobují srážky částic vysokou rychlostí, jejichž účinky jsou dostatečné k roztavení většiny kovů. V zásadě tedy existují dvě skupiny účinků: radikálové a mechanické účinky, jako například (Suslick, 1988; Mason et Lorimer, 1988):

- Molekulární sonolýzy: homolytická fragmentace na radikály, rozpad polymerů, generace excitovaných stavů, destrukce buněk;
- Aktivita v systémech kapalina-kapalina: zlepšení přenosu hmoty, emulgace, zvýšení účinku katalyzátorů mezifázového přenosu nebo dokonce jejich nahrazení;
- Vliv v systémech plyn-kapalina: odplyňování kapalin nebo tavenin, atomizace kapalin na vzduchu, příprava tenkých vrstev.
- Efekty v kapalině a pevné látce: heterogenní sonochemie.

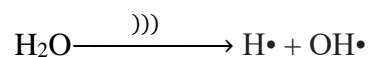
Vznik  $H_2O_2$  při sonolýze vody a ultrazvukovém rozkladu organických sloučenin ve vodě poprvé popsali Schmitt a jeho kolegové v roce 1929 (Schmitt, 1929). V práci (Weissler et al., 1950) autoři zjistili, že vodné roztoky  $CCl_4$  uvolňují  $Cl_2$  během ultrazvukového ozařování v nepřítomnosti  $O_2$  a významně urychlují tvorbu  $I_3^-$  ve vodných roztocích jodidů. Na roli volných radikálů při tvorbě  $H_2O_2$  působením ultrazvukových vln bylo poukázáno v roce 1959 (Weissler et al., 1959). Od roku 1970 se stále více pozornosti věnuje sekundárním reakcím radikálů OH a H. V roce 1980 spolu s rozvojem sonochemie životního prostředí dosáhla vodní sonochemie svého

apogea. Byla studována sonochemie velkého počtu organických sloučenin zajímavých pro životní prostředí ve vodných roztocích. V roce 2001 publikoval Adewuyi (Adewuyi, 2001) úvodní a odborný přehled o aplikacích sonochemie ve vědě a technice životního prostředí.

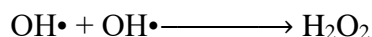
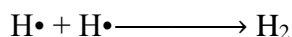
Organické sonochemické reakce ve vodných roztocích se dělí do dvou skupin (Mason et Lorimer, 1988):

- (1) Reakce při velmi vysoké teplotě a tlaku během kolapsu kavitační bubliny.
- (2) Radikálové reakce probíhající na rozhraní plynu a kapaliny mezi bublinkami a objemovou kapalinou.

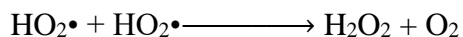
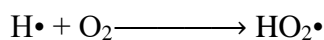
Imploze a fragmentace kavitačních bublin vytváří mikrooblasti s extrémními podmínkami. Vlivem velmi vysoké teploty a tlaku dochází k tepelnému rozkladu vody za uvolňování radikálů (-H, -OH), jak je uvedeno níže (Hua et Hoffmann, 1997; Henglein, 1987):



Radikály rekombinují za vzniku vodíku a peroxidu vodíku:



Hart a Henglein (Hart et Henglein, 1987) poznamenali, že v přítomnosti kyslíku mohou vznikat radikály  $\text{HO}_2\cdot$ . Radikály  $\text{HO}_2\cdot$  mohou rovněž produkovat  $\text{H}_2\text{O}_2$ :



HO tedy vzniká třemi paralelními cestami: z vody, z atomů kyslíku a z molekul kyslíku (Promtov et Akulin, 2006). Tvorba  $\text{H}_2\text{O}_2$  probíhá podle kinetiky nulového řádu (Jahno et al., 2010). Koncentrace hydroxylových radikálů na rozhraní bublin se odhaduje na 4 mmol/l (Griško et al., 2011). Ve studiích (Lugovskoj et al., 2008; Lugovskoj et Griško, 2009) byla stanovena rychlost sonolytické produkce HO ve vzduchem nasycené vodě na  $2,40\text{-}2,52 \cdot 10^{-3}$  mmol/l·min<sup>-1</sup> při 24 kHz a 3360 W/l.

## 2.6 Závěry z kapitoly

V současné době je při studiu kavitace věnována hlavní pozornost otázce možnosti predikce kavitace a eroze u strojů a mechanismů pro dané materiály a podmínky proudění kapaliny.

Určité vyhlídky otevírá vývoj metod pro získávání materiálů odolnějších proti erozi (jako je chrom-manganová ocel), které kombinují tvrdost a plasticitu. Zřejmě se zde otevírá velká budoucnost i pro plasty, i když jejich možnosti nebyly v tomto kontextu ještě dostatečně prozkoumány.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat studiu průmyslových odvětví, kde kavitace hraje pozitivní roli a její využití je účelné. Používání kavitace v čisticích procesech a pro získávání emulzí se rozšiřuje a možná se kavitační metoda stane hlavní metodou povrchové úpravy mnoha průmyslových výrobků. V tomto ohledu má problém kontroly kavitace velký význam. Hydraulická kavitace běží nepravidelně. Ultrazvuková kavitace může být do jisté míry řízena, ale existují značné potíže.

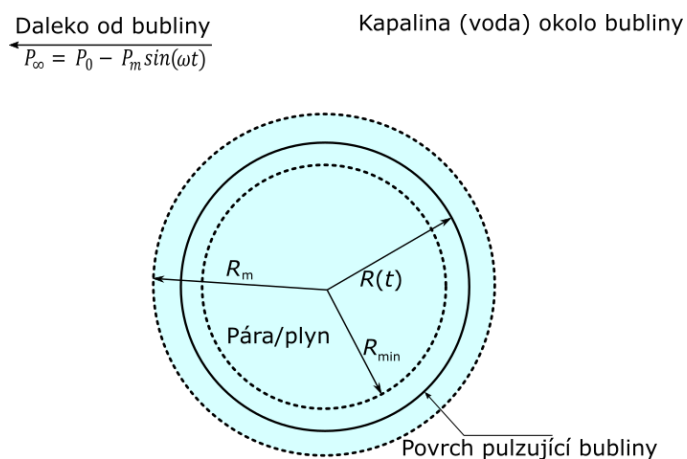
Velmi důležitou (z praktického hlediska) vlastností kapalin je jejich schopnost odolávat bez výrazných změn vysokým tlakům. Tedy platí, že kapaliny jsou nestlačitelné a rychlost zvuku v takovéto kapalině je konstantní a nekonečně velká. Avšak pro vysoké rychlosti (tzn. srovnatelné s rychlostí zvuku) nemůže být stlačitelnost kapaliny ignorována, neboť má velký vliv na závěrečné stádium kolapsu bubliny. Přesněji – pro rychlosti konstantní a zároveň menší než je rychlost zvuku platí, že stlačitelnost kapaliny rychlost kolapsu bubliny snižuje.

Studie z oboru sonochemie poukazují na vznik a účinek  $H_2O_2$  při sonolýze vody a ultrazvukovém rozkladu organických sloučenin ve vodě.



### 3 ANALÝZA VLIVU AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ A VLASTNOSTÍ KAPALINY NA KAVITAČNÍ PROCESY

Obr. 2 schématicky znázorňuje kulovou bublinu v kapalině, jejíž poloměr se mění v závislosti na aplikovaném vnějším tlaku. Vnitřek bubliny obsahuje páru (pokud je bublina ve vodním prostředí) a plyn. V následujících částech se odvodí základní rovnice pro poloměr bubliny v závislosti na čase při působení známého vnějšího periodického tlaku. Při té příležitosti se definují různé akustické parametry a posoudí se jejich vliv na kavitační procesy.



Obr. 2– Schéma kulové bubliny v nekonečně rozlehlé kapalině

#### 3.1 Zjednodušená Rayleigh-Plessetova rovnice

Budeme uvažovat bublinu (Obr. 2) v nestlačitelné a nekonečně rozlehlé kapalině o konstantní hustotě  $\rho_0$ . Učiníme následující předpoklady:

- (i) Tvar bubliny je kulový s poloměrem  $R(t)$  a počátečním poloměrem  $R_0$ , kde  $t$  je čas.
- (ii) Povrch bubliny je neproniknutelný, není žádný přenos cizí plynné hmoty skrze něj (Nicméně, kapalina se z povrchu může odpařovat směrem do bubliny a syté páry kapaliny mohou kondenzovat na stěně bubliny v závislosti na teplotě a tlaku).
- (iii) Dynamická viskozita kapaliny se zanedbá.
- (iv) Tlak  $P_{\infty}$  v nekonečně rozlehlé kapalině je proměnný a známý.

Cílem je určit, jak se bude měnit poloměr bubliny v závislosti na tlaku  $P_{\infty}$ . Zjednodušená Rayleigh-Plessetova rovnice uvedená níže říká, jak se mění  $R(t)$  s  $P_{\infty}(t)$ .

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} [P_\infty - P(R)] = 0, \quad (3.1)$$

kde  $P(R)$  je tlak na povrchu bubliny. Při řešení rovnice (3.1) musíme vzít v úvahu počáteční a okrajové podmínky.

Skutečné bubliny v kapalině jsou naplněny plynem a sytou parou kapaliny. Budeme používat označení  $P_\Gamma$  pro tlak plynu a  $P_\Pi$  pro tlak sytých par a  $P_{\Pi\Gamma} = P_\Gamma + P_\Pi$ . Pokud tlak sytých par zůstává konstantní a  $P_\Gamma$  se mění s objemem bubliny, tak můžeme psát:

$$P_\Gamma = \left( P_0 - P_\Pi + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma}, \quad (3.2)$$

kde  $P_0$  je hydrostatický tlak v kapalině a kde  $\gamma$  je Poissonova konstanta definovaná jako poměr tepelných kapacit při stálém tlaku a objemu, rovný 1 v případě izotermických pulzací a 4/3 v případě adiabatických pulzací.

$$P(R) = \left( P_0 - P_\Pi + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_\Pi - \frac{2\sigma}{R}, \quad (3.3)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napětí kapaliny.

V případě akustického pole o amplitudě  $P_m$  a frekvenci  $f = \omega/(2\pi)$ , které působí na bublinu, lze tlak v nekonečnu vyjádřit ve tvaru

$$P_\infty = P_0 - P_m \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

Dosazením (3.3) a (3.4) do rovnice (3.1) získáme nelineární diferenciální rovnici druhého řádu

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho_0} \left[ P_0 - P_\Pi - P_m \sin(\omega t) + \frac{2\sigma}{R} - \left( P_0 - P_\Pi + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0, \quad (3.5)$$

Nicméně rovnice 3.5 má jednu slabinu, že předpokládá nestlačitelnost kapaliny a z toho vyplývající skutečnost, že rychlost zvuku je v takové kapalině nekonečně velká. Při rychlostech kolapsu bubliny srovnatelných s rychlostí zvuku nemůže být předpoklad nestlačitelnosti kapaliny ignorován a rovnice 3.5 musí být modifikována. Nejznámější modifikace rovnice 3.5 je Herringova modifikace.

### 3.2 Rayleighův čas

Rayleighův čas, je čas prvního kolapsu bubliny, který je možné odvodit ze zjednodušené Rayleigh-Plessetovy rovnice při položení  $R \rightarrow 0$  a  $dR/dt \rightarrow \infty$ :

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho_0}{P_\infty - P_\Pi}} \int_0^{R_0} \frac{dR}{\sqrt{\frac{R_0^3}{R^3} - 1}} \cong F \cdot R_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{P_\infty - P_\Pi}}, \quad (3.6)$$

kde  $F = 0,915$  při  $\delta = 0$  (definice parametru  $\delta$  v části 3.3).

Rayleighův čas je možné vyjádřit jako funkci  $R_m$ , kde  $R_m$  je maximální poloměr bubliny při pulzaci bubliny v akustickém poli:

$$\tau_m = 0,915 R_m \left( \frac{\rho_0}{P_0} \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

### 3.3 Parametr obsahu plynu, $\delta$

Maximální tlak  $P_{\max}$ , který vznikne v bublině při jejím minimálním poloměru  $R_{\min}$  v okamžiku kolapsu, závisí na maximálním poloměru  $R_m$ , na který byla bublina roztažena akustickým polem, a na obsahu plynu v bublině, protože její kolaps bude tlumen směsí sytých par a plynu uvnitř bubliny.

Obsah směsi par a plynů v bublině je obvykle charakterizován parametrem obsahu plynu (Sirotjuk, 2008).

$$\delta = \frac{P_{\Pi\Gamma}}{P_0} = \frac{P_\Gamma + P_\Pi}{P_0} \left( \frac{R_0}{R_m} \right)^3, \quad (3.8)$$

kde  $P_{\Pi\Gamma}$  je tlak uvnitř bubliny při jejím maximálním poloměru (nikoli při působení pouze hydrostatického tlaku), který se rovná součtu parciálních tlaků páry  $P_\Pi$  a plynu  $P_\Gamma$ . Předpokládáme-li, že směs par a plynů obsažená ve skutečné kavitační bublině se při adiabatické kompresi chová jako ideální plyn, pak když bublina splaskne z maximálního poloměru  $R_m$ , tlak směsi par a plynů v ní roste nepřímě úměrně poloměru na  $3\gamma$  ( $\gamma = 4/3$  při adiabatickém ději). Pak tlak  $p_m$  v bublině při jejím kolapsu do minimálního poloměru  $R_{\min}$  je roven (Sirotjuk, 2008):

$$p_m = P_{\Pi\Gamma} \left( \frac{R_m}{R_{\min}} \right)^4 \quad (3.9)$$

Tlak  $P_{III}$  závisí na množství směsi par a plynu a na poloměru  $R_m$ , který je zase určen hodnotou akustického tlaku  $P_m$  (Je dobré si všimnout, že  $p_m$  a  $P_m$  jsou dvě různá označení dvou různých tlaků).

Z porovnání prací akustického a hydrostatického tlaku při kontrakci bubliny, dostaneme následující vztah:

$$\frac{R_{min}}{R_m} \approx 3\delta \quad (3.10)$$

Dosazením rovnice 3.10 do 3.9 a s uvážením rovnice 3.8 dostaneme:

$$p_m \approx P_0 \frac{1}{81\delta^3} \quad (3.11)$$

Chceme-li získat malou hodnotu  $\delta$ , musí být bublina roztažena během záporné poloviční periody akustického tlaku na požadovanou hodnotu  $R_m$  (Sirotnjuk, 2008):

$$R_m \approx \sqrt{\frac{2P_p(R)T}{3\rho}} \frac{T}{4} \left(2 - \frac{P_k}{P_m}\right), \quad (3.12)$$

kde  $P_m$  je, jak definováno výše, amplituda akustického tlaku za předpokladu absence kavitace;

$P_p = P_0 -$  působící akustický tlak;

$P_k$  – práh kavitace;

$\rho$  – hustota;

$T$  – perioda (působení akustického vlnění).

V souladu s výrazem (3.12) má smysl zvyšovat  $R_m$  pouze do doby, než se doba kolapsu bubliny  $\tau_m$  rovná polovině doby akustického vlnění:

$$\tau_m = 0,5T \quad (3.13)$$

S použitím Rayleighova vzorce (3.7) a s uvážením rovnic (3.12) a (3.13) získáme mezní hodnotu  $(P_m)_{max}$ , nad kterou bude pozorován pokles účinnosti kavitace (Sirotnjuk, 2008):

$$(P_m)_{max} = \frac{P_k}{1 - \frac{1}{F \sqrt{\frac{2P_p(R)}{3P_0}}}} \quad (3.14)$$

Z toho tedy vyplývá, že má smysl bublinu zvětšovat, dokud:

$$0,75 \sqrt{\frac{P_p(R)}{P_0}} > 1 \quad (3.15)$$

V případě, kdy  $P_r = 0$ , je parametr obsahu plynu,  $\delta = P_{II}/P_0$ ; pro vodu při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku  $\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ . V tomto případě tlak v bublině při jejím kolapsu, dosahuje hodnoty  $p_m \approx 10^2$  MPa, jak vyplývá z předpokladu adiabatického procesu a z rovnice 3.11. Zdálo by se, že  $p_m$  již nebude stoupat se zvyšujícím se  $R_m$ , protože nyní je  $\delta$  určeno pouze tlakem nasycených par kapaliny, který při dané teplotě zůstává nezměněn. K tomu však dojde pouze při relativně pomalé expanzi bubliny. Pokud je rychlost expanze bubliny  $v_p$  vysoká, může rychlost odpařování vody z povrchu bubliny  $v_{II}$  začít zaostávat za rychlostí jejího pohybu její stěny a tlak páry v bublině je menší než tlak nasycení.

Je známo, že rychlost odpařování z povrchu kapaliny se rovná:

$$v_{II} = 0,04 \left( \frac{R_{\Gamma} \cdot T^0}{2\pi \cdot \mu} \right)^{0,5}, \quad (3.16)$$

kde  $R_{\Gamma}$  je univerzální plynová konstanta; ( $R_{\Gamma} = 8,3143 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ );

$T^0$  je absolutní teplota;

$\mu$  je molekulová hmotnost [kg/mol].

Kritická rychlost stěny bubliny ve vodě za normálních podmínek je tedy  $v_k = v_{II} \approx 7 \cdot 10^2 \text{ cm/s}$ .

Na druhé straně je doba, během které bublina dosáhne maximálního poloměru, přibližně  $0,75T$  (Sirotjuk, 2008), proto je průměrná rychlost stěny kavitační bubliny  $R_m/(0,75T)$ . Pokud je tedy podmínka splněna:

$$\frac{R_m}{0,75T} = v_c > v_k, \quad (3.17)$$

tlak páry v bublině  $P_{II}$  je menší než tlak nasycení par, což vede ke snížení  $\delta$  a podle toho ke zvýšení tlaku  $p_m$ . Odhadněme možnost splnění podmínky (3.17). Při frekvenci asi 20 kHz ( $T = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ ), která se v praxi často používá, při zvukových tlacích způsobujících vyvinutou kavitaci v kapalině ( $P_{\kappa} \approx 0,2 \text{ MPa}$ ) je maximální poloměr kavitačních bublin řádově  $(1-10) \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ , což odpovídá rychlosti expanze bubliny nejvýše  $v_c \approx 2,7 \cdot 10^2 \text{ cm/s} < v_k$ . V důsledku toho je za těchto podmínek tlak vodní páry

v expandující bublině vždy stejný jako tlak nasycení. Pouze výrazné zvýšení frekvence a akustického tlaku může vést ke zvýšení rychlosti expanze.

Podmínka (3.16) je v zaostřovacích systémech snadno splněna. Takže například v zaostřovacím koncentrátoru pracujícím na frekvenci přibližně 500 kHz (Rozenberg et Sirotjuk, 1959) pro  $R_0 = 10^{-4}$  cm,  $R_m = 1,3 \cdot 10^{-3}$  cm, za normálních podmínek, ve vodě, rychlost kavitační bublinové stěny ve fázi rozpínání bude  $v_c \approx 10^3$  cm/s a rychlost stěny během kolapsu bude  $v_c \approx 1,5 \cdot 10^5$  cm/s (Akuličev, 1968), což je výrazně vyšší než  $v_k$ .

Za těchto podmínek se tedy chování páry v kavitační bublině (ve které  $P_r = 0$ ) nijak neliší od chování plynu a terminologie „prázdná“ nebo „parní“ bublina často ztrácí svůj význam – zhroucení bubliny je tlumeno nekondenzovanou párou v ní.

### 3.4 Teplota a plynové sjednocení kapaliny

Tlak v rázových vlnách během kolapsu kavitačních bublin, jak vyplývá z výrazu (3.11), je primárně určen parametry obsahu plynu  $\delta = (P_{II} + P_r)/P_0$ .

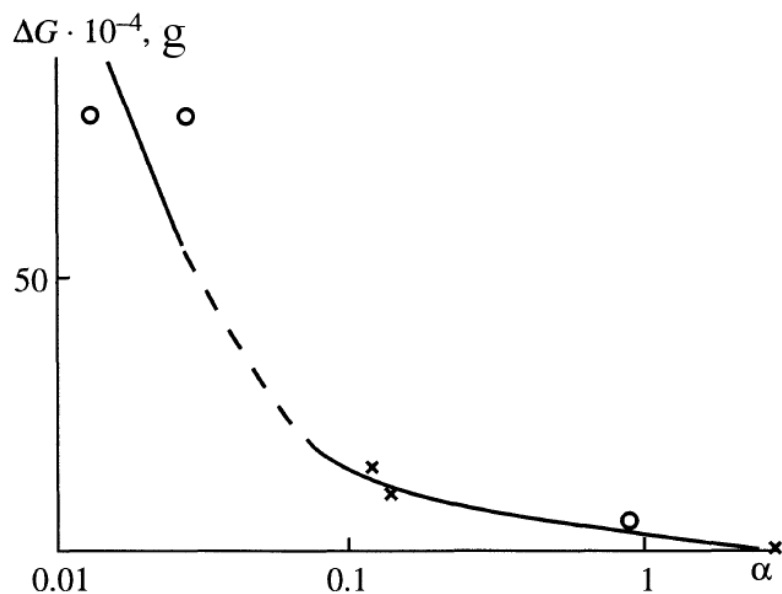
Plyn rozpustný v kapalině difunduje do bubliny, takže tlak v ní  $P_r$  závisí na rozpustnosti plynu v kapalině (Sirotjuk, 2008):

$$P_r \approx k\alpha, \quad (3.18)$$

kde  $\alpha = V_r/V_{\text{oc}}$  – koeficient rozpustnosti plynu [ $\text{cm}^3/\text{l}$ ];

$k$  – koeficient proporcionality.

Přirozeně bude erozivní aktivita kavitace, která je úměrná  $p_r$ , tím vyšší, čím nižší bude rozpustnost plynu v kapalině. To potvrzuje Obr. 3, který ukazuje závislost kavitační eroze  $\Delta G$  hliníku na koeficientu rozpustnosti plynů  $\alpha$  ve vodě a ethylalkoholu (frekvence zvuku 8 kHz) (Akuličev, 2009). Jako plyny byly používány  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  a  $\text{CO}_2$ , které byly vháněny do kapaliny. Je vidět, že se zvýšením rozpustnosti plynu kavitační eroze skutečně plynule klesá a při vysoké rozpustnosti klesá na nulu.



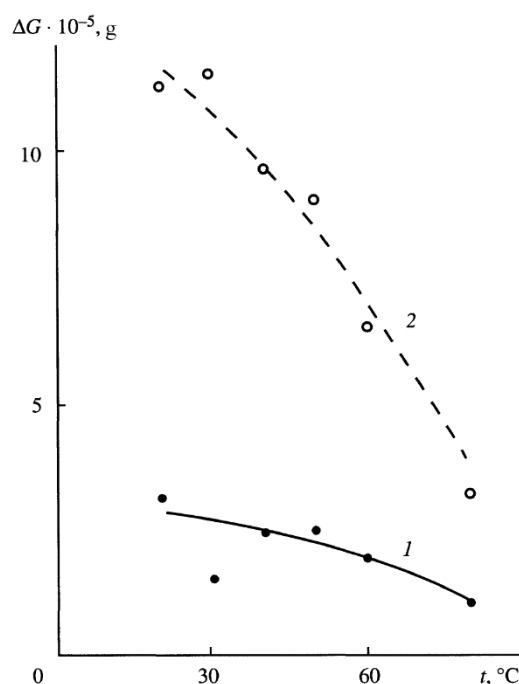
Obr. 3 – Závislost kavitační eroze ve vodě (kroužky) a ethylalkoholu (křížky) na koeficientu rozpustnosti plynu (Sirotnjuk, 2008).

Experiment, jehož výsledky jsou uvedeny na Obr. 3, byl proveden při konstantní teplotě okolí (20 °C) okolního prostředí (Sirotnjuk, 2008). Změna teploty kapaliny by měla také ovlivnit hodnotu  $p_m$ , protože jak rozpustnost plynu  $\alpha$  v kapalině, tak tlak směsi par a plynů  $P_{III}$  v bublině jsou funkcí teploty  $t$ .

Zkoumáme-li erozní účinnost jedné kavitační bubliny nebo malého počtu v kavitační oblasti, měl by být pozorovatelný pokles účinnosti kavitace se zvyšující se teplotou. Pokud studujeme erozní účinnost celé kavitační oblasti, pak v důsledku jejího růstu s teplotou (ke kterému dochází v důsledku zvýšení poloměrů všech bublin v kapalině, které snižují její pevnost), nejprve, jak teplota kapaliny stoupá, se zvýší účinnost eroze celé oblasti a poté, když intenzita rázové vlny poklesne, v důsledku zvýšení obsahu plynu v bublinách se sníží.

Na Obr. 4 je vidět účinnost eroze relativně malého počtu kavitačních bublin v závislosti na teplotě kapaliny. Účinnost eroze byla hodnocena erozí malého hliníkového válce (průměr ( $\varnothing$ ) 2 mm  $\times$  výška 2 mm) umístěného v kavitační zóně mnohem větší, než je jeho velikost. Z tohoto důvodu má změna velikosti kavitační zóny (její nárůst se zvyšující se teplotou) malý vliv na množství eroze. Křivka 1 označuje obyčejnou odstátou vodu s obsahem vzduchu  $\alpha \approx 22 \text{ cm}^3/\text{l}$  a křivka 2 - odplyněnou vodu s obsahem vzduchu  $\alpha \approx 6,8 \text{ cm}^3/\text{l}$  (Sirotnjuk, 2008).

Jak se dalo očekávat, kavitační eroze v odplyněné vodě byla vyšší než v odstáté vodě; s rostoucí teplotou vody klesá v obou případech. V odplyněné vodě vstupuje do kavitačních bublin menší množství vzduchu než v usazené vodě, což vede ke snížení tlaku směsi páry a plynu v bublině a ke zvýšení tlaku v rázové vlně. Jak teplota stoupá, zvyšuje se tlak uvnitř bubliny, který je určen tlakem páry a plynu, a rázová vlna slábne.

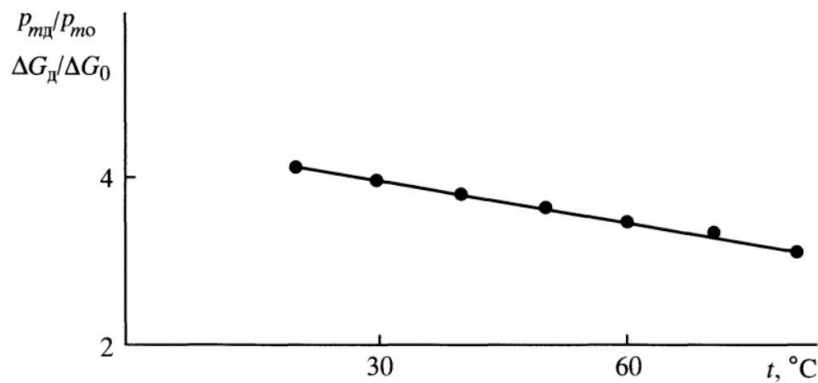


Obr. 4 – Kavitační eroze jako funkce teploty kapaliny (zničený vzorek je menší než velikost kavitační oblasti): 1 - obsah plynu  $\alpha \approx 22 \text{ cm}^3/\text{l}$ ; 2 -  $\alpha \approx 6,8 \text{ cm}^3/\text{l}$  (Sirotnjuk, 2008).

Pomocí výrazů (3.8) a (3.11) získáme hodnoty  $p_{m\text{Д}}/p_{m\text{O}}$  pro různé teploty, které jsou uvedeny na Obr. 5 v přímkce. Na tomto obrázku tečky ukazují vztah mezi stupněm destrukce (vlivem kavitace) válce v odplyněné a odstáté vodě  $\Delta G_{\text{Д}}/\Delta G_{\text{O}}$ , získaný z experimentálních hodnot (Obr. 4). Je vidět, že relativní zvýšení tlaku v rázové vlně během kolapsu kavitačních bublin, spojené se snížením tlaku směsi páry a vzduchu v těchto bublinách, vede ke stejnému relativnímu zvýšení stupně destrukce kavitace.

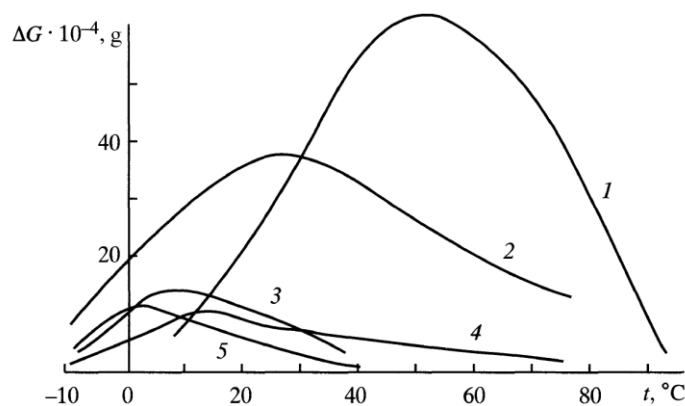
Pokud má vzorek podrobený kavitační destrukci velikost srovnatelnou, nebo větší než kavitační oblast, pak může zvýšení teploty nejprve vést ke zvýšení kavitační eroze v důsledku zvýšení kavitační oblasti a poté, když tlak v rázové vlně silně poklesne v důsledku zvýšení  $P_{\Gamma}$ , do snížení eroze. Tato okolnost vysvětluje teplotní maximum destrukce kavitace pozorované v experimentech (Bebčuk, 1957), kdy byly velikosti vzorků vystavených destrukci větší než kavitační zóna.





Obr. 5 – Vypočítané zvýšení tlaku v kavitační bublině, když se zhroutí v odplyněné vodě, ve srovnání s tlakem v usazené vodě (přímka) a poměrem stupně eroze (body) (Sirotnjuk, 2008).

Na Obr. 6 je vidět teplotní závislosti eroze hliníkové desky, upevněné nad koncem tyčového emitoru, jejíž rozměry ( $25 \times 20 \times 4$  mm) byly větší než kavitační oblast (Bebčuk, 1957). Výzkum byl prováděn v různých kapalinách. Je vidět, že v případě, že je kavitační zóna menší než vzorek, například pro vodu, maximální eroze nastává při 50 °C a pro jiné kapaliny, kde je koeficient rozpustnosti plynu jiný než ve vodě, odpovídají tato maxima jiné teplotě a eroze jetím menší, tím větší je tlak par v kapalině.



Obr. 6 – Kavitační eroze jako funkce teploty kapaliny (zničený vzorek je větší než kavitační oblast): 1 - voda; 2 - petrolej; 3 - benzín; 4 - alkohol; 5 - aceton (Sirotnjuk, 2008).

### 3.5 Hydrostatický tlak

Snížení obsahu plynu  $\delta$  odplyněním kapaliny, nebo snížením její teploty umožňuje mnohokrát zvýšit tlak  $p_m$  během kolapsu kavitační bubliny. Mnohem většího zvýšení tlaku lze dosáhnout vytvořením zvýšeného hydrostatického tlaku. Výsledkem je, že ve vzorci (3.11)  $p_m = P_0/(81\delta^3)$ ,  $p_m$  vzroste nejen lineárně s  $P_0$ , ale také v důsledku snížení parametru  $\delta$ , který je také funkcí  $P_0$ .

V důsledku zvýšeného hydrostatického tlaku se plyn, který zůstane v jádru kavitace, zcela nerozpustí a poloměr bublin se zmenší. Tento jev vede ke změně tlaku, který na ně působí: ve stadiu dekomprese  $P_0 - \alpha P_m$  a ve stadiu stlačení  $P_0 + \alpha P_m$ .

Zvýšení hydrostatického tlaku umožňuje výrazné zvýšení  $p_m$ , přičemž bude k dispozici nejlepší poměr  $P_0/P_m$ . V práci (Agranat et al., 1968) byla provedena numerická integrace Nolting-Nepirasovy rovnice (Sirotnjuk, 2008), která popisuje chování kavitační bubliny v závislosti na poměru  $P_0/P_m$ . Analýza získaných výsledků ukázala, že za prvé lze čas expanze kavitační bubliny, v závislosti na frekvenci pole, vyjádřit poměrem:

$$\tau_p = \frac{0,4}{f(1,9 - P_m/P_0)}, \quad (3.19)$$

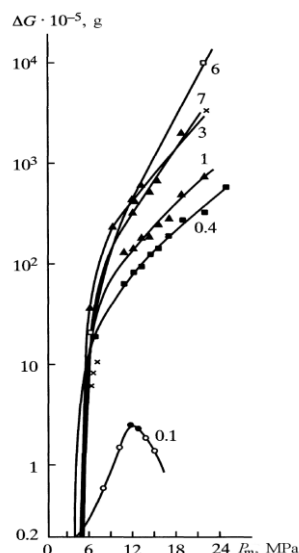
kde  $f$  je frekvence akustického pole. Při pevné hodnotě  $P_0$  a zvýšení  $P_m$  klesá hodnota  $\tau_p$  a má sklon k hranici  $0,76/f$ . Se zvyšujícím se poměrem  $P_0/P_m$  je limit, ke kterému má doba expanze tendenci,  $0,36/f$ .

Za druhé, jak se zvyšuje poměr  $P_0/P_m$ , čas kolapsu dutiny  $\tau_p$  se neustále snižuje (to také vyplývá ze vzorce 3.7).

Nakonec z analýzy chování kavitační bubliny vyplývá, že se zvýšením poměru  $P_0/P_m$  se maximální tlak  $p_m$ , ke kterému dochází, když se bublina zhroutí, zvyšuje, prochází maximem a poté klesá. Maximální hodnota nastane, když:

$$P_0/P_m \approx 0,4. \quad (3.20)$$

Experimentální studie eroze při zvýšených hydrostatických tlacích ukázaly (Agranat et al., 1964) významné (o několik řádů) zvýšení erozní aktivity. Příklad je Obr. 7, kde je znázorněna závislost kavitační eroze  $\Delta G$  hliníkového válce ( $\varnothing 2 \times$  výška 2 mm) na  $P_m$  v ohniskové oblasti koncentrátoru při různých hodnotách statického tlaku  $P_0$ , získaná autory práce (Sirotnjuk, 2008). Pokusy byly prováděny na zaostřovacím koncentrátoru, kterým je pevná hliníková koule o průměru 200 mm, přilepená piezoelektrickou mozaikou, uprostřed níž byla sférická dutina o poloměru 8 mm, naplněná vodou (Sirotnjuk, 2008). Studie byly prováděny na frekvenci 560 kHz, což odpovídalo jedné z harmonických radiálních vibrací hliníkové koule. Průměr ohniskové skvrny byl 3,3 mm.



Obr. 7 – Závislost eroze kavitace na  $P_m$  při různých hydrostatických tlacích  $P_0$ , v MPa (uvedeno na křivkách) (Siroťjuk, 2008).

Zejména z Obr. 7, je vidět, že při statickém tlaku rovném atmosférickému má erozní křivka maximum při  $P_m = 11$  MPa. Toto maximum je dáno rovností doby kolapsu kavitačních bublin a poloviční periody zvuku  $\tau_m = 0,5T$ , kde  $\tau_m$  je určeno výrazem (3.7)  $\tau_m = FR_m (\rho/P_0)^{1/2}$ .

Z toho tedy vyplývá, že zvýšení hydrostatického tlaku povede ke snížení doby zhroucení kavitační bubliny. To bude také usnadněno snížením koeficientu  $F$ , který poněkud klesá s nárůstem  $P_0$ . Zvyšováním hydrostatického tlaku je tedy možné posunout maximum kavitační eroze směrem k vyšším akustickým tlakům v kapalině, přibližně úměrným  $(1/P_0)^{1/2}$ . S nárůstem hydrostatického tlaku toto maximum skutečně zmizí (Obr. 7). Nakonec z Obr. 7 je vidět, že se zvýšením hydrostatického tlaku podle očekávání výrazně narůstá eroze a následně i intenzita rázových vln kavitačních bublin. Jak se  $P_0$  zvyšuje, eroze roste, dosahuje maxima při  $P_0 = 6$  MPa a poté klesá, tj. podmínka (3.20) je splněna.

Je třeba poznamenat, že zvýšení hydrostatického tlaku  $P_0$  vede ke zvýšení ekvivalentního vlnového odporu  $\rho_c$  kapaliny. V důsledku zvýšení  $\rho_c$  se zvyšuje akustický výkon zavedený do kapaliny (s konstantní amplitudou posunutí emitoru).

Je však třeba mít na paměti, že zvýšený hydrostatický tlak stlačující zářič, nebo působící na jeho vyzařující povrch způsobuje mírné snížení amplitudy posunu oscilačního povrchu. Experimenty uvedené v práci (Siroťjuk, 2008) ukázaly, že takové snížení amplitudy zkreslení může dosáhnout 50 % při  $P_0$  asi 2 až 3 MPa.

Účinek  $P_0$  na vlnovou impedanci vody byl zkoumán, když byl magnetostrikční emitor provozován s kmitočtem oscilace 20 kHz (Sirotnjuk, 2008). V těchto experimentech byl měřen akustický výkon  $W_a$  a elektrická energie spotřebovaná radiátorem z generátoru byla udržována konstantní. Odolnost proti vlnám byla určena výrazem:

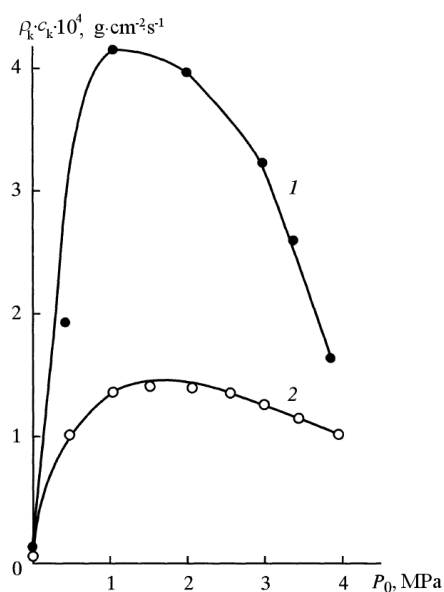
$$\rho_k \cdot c_k = \frac{2W_a}{S\dot{\xi}^2}, \quad (3.21)$$

kde:  $S$  – emitorová oblast;

$\dot{\xi}$  – amplituda vibrační rychlosti;

$W_a$  – akustický výkon.

Na Obr. 8 se ukazuje závislost  $\rho_k c_k$  na hydrostatickém tlaku  $P_0$  během kavitace. Je vidět, že pokud je při normálním atmosférickém tlaku vlnový odpor kavituující vody roven  $\rho_k c_k = 2,6 \cdot 10^4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , pak s růstem  $P_0$  se jeho odpor nejprve zvyšuje a potom klesá.



Obr. 8 – Změna vlnového odporu vody během kavitace, v závislosti na hydrostatickém tlaku  $P_0$  při různých amplitudách oscilace povrchu emitoru  $\xi$ : 1 - 6  $\mu\text{m}$ , 2 - 18  $\mu\text{m}$  (Sirotnjuk, 2008).

Existují tedy režimy, kdy se  $\rho_k c_k$  kavitační tekutiny zvyšuje po zvýšení hydrostatického tlaku. V tomto případě se zvyšuje akustický výkon zavedený do kapaliny a zvyšuje se účinnost kavitačních procesů.

### 3.6 Impulzní dopad

Účinek emitoru v pulzních režimech lze použít ke zvýšení úrovně iniciace kavitace, která se tvoří pod vlivem krátkého pulzu, při kterém kavitace ještě neměla čas na rozvoj. V tomto případě je nutné, aby doba trvání impulsu byla několik desítek akustických period (Sirotnik, 2008).

Impulzní expozice v kavitačním režimu je široce používána pro velmi dlouhodobý provoz ultrazvukového zařízení. Příkladem je zabránění usazování na stěnách povrchů pro výměnu tepla. V některých případech se uvádí, že impulzní expozice zvyšuje erozní účinnost kavitace.

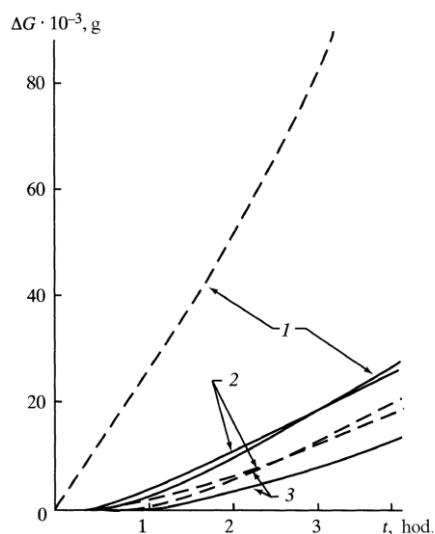
Pulzní práce je určena délkou pulzu  $\tau$ , periodou  $T$  nebo opakovací frekvencí  $F = 1/T$ . Pro stanovení vztahu mezi periodou opakování a dobou trvání je možné použít koncept pracovního cyklu  $q = T/\tau$ . Pokud je výkon v impulsu  $W$  úměrný druhé mocnině amplitudy předpětí, nebo napětí dodávajícího emitoru, pak bude průměrný výkon za období  $W_c = W/q$ .

Pulzní režim činnosti magnetrostrikčních emitorů se zpravidla provádí podle principu rázového buzení (šoku), kdy se obvod generátoru skládá ze dvou větví, z nichž jedna slouží k nabíjení akumulárního kondenzátoru a podél druhé jeho vybíjení na vinutí emitoru. Namísto jednorázového připojení vysílače k paměťovému koncentrátoru bylo navrženo (Sirotnik, 2008) vytvořit takové buzení připojením vysílače ke zdroji ne jednou, ale několikrát, v čase s oscilacemi, zatímco se zvyšuje účinnost systému.

Akustický emitor je často buzen pravoúhlými pulzy nebo pulzy uspořádané blízko sebe. Pokud mají budicí impulsy formu  $\delta$ -funkce, pak je amplituda emitovaného signálu  $\omega$  krát ( $\omega$  je úhlová frekvence) větší než v případě buzení vysílače pravoúhlými pulsy (Plesset, 1963).

Zdalo by se, že když jsou součty trvání jednotlivých impulsů v impulsu a kontinuální kavitaci stejné, měla by být erozní aktivita v obou případech stejná. To platí pouze pro inertní materiály a kapalná média. V ostatních případech může v pauzách mezi impulsy dojít k chemické reakci, která proces urychlí. Porovnání erozivní aktivity kavitace v pulzním a kontinuálním režimu při stejné expoziční době bylo experimentálně provedeno v práci (Plesset, 1963), kdy vzorky z ocelí různých tříd vibrovaly v různých médiích se stejnou amplitudou. Vzorky byly vystaveny kavitační erozi po stejnou dobu v kontinuálním i pulzním režimu. Jeden příklad takového

experimentu je uveden na Obr. 9 při  $q = 20$ . To znamená, že pokud je čas nepřetržitě expozice například 1 hodina, pak je doba impulzní expozice 20 hodin (takže v obou případech je doba expozice stejná) (Siroťjuk, 2008).



Obr. 9 – Eroze oceli (4340 - norma USA) během kontinuální kavitace (plné křivky) a impulzní kavitace (přerušované čáry) ( $\tau = 12 \cdot 10^{-3}$  s,  $T \approx 216 \cdot 10^{-3}$  s): 1 - ve 3 % roztoku soli; 2 - v destilované vodě při pH 8; 3 - v destilované vodě (Siroťjuk, 2008).

Je vidět, že v pulzním kavitačním režimu ve slaném roztoku a v destilované vodě se zvyšuje eroze. To je způsobeno skutečností, že spolu s kavitační erozí, která u obou režimů trvá stejnou dobu, dochází také ke korozi v pauzách mezi impulsy. V procesu impulsní kavitace v blízkosti rozpadajícího se povrchu se obnovuje kyslík uvolněný z vody, což podporuje korozi, a zkorodované množství kovu se odstraňuje prouděním kapaliny a vystavuje se tak čerstvému kovu. Alkalická voda s pH 8 je méně aktivní, proto méně korozní. Během impulsní kavitace je tedy nutné vzít v úvahu velký účinek koroze na úbytek hmotnosti rezavých materiálů.

Protože zvýšený hydrostatický tlak zvyšuje intenzitu rázové vlny v okamžiku zhroucení kavitační bubliny, je možné vytvořit takový tlak s dalším akustickým pulzem v okamžiku, kdy bublina dosáhne svého maximálního poloměru, a udržovat jej, dokud se kavitační bublina úplně nezhroutí. Takový dodatečný pulzní zvýšený tlak, vyvíjený na spojitě akustické pole, je někdy snazší provést, než vytvořit uzavřený objem procesu se zvýšeným hydrostatickým tlakem.

V praxi je nejjednodušší kombinovat dvě sinusoidně se měnící akustická pole: jedno s frekvencí  $\omega_1$  a další, jehož frekvence je například  $\omega_2$ , například o řád vyšší než

frekvence  $\omega_1$ . V práci (Agranat et al., 1974) byla provedena teoretická analýza působení takového dalšího pole, jehož tlak se mění jako:

$$P_{dop}(t) = \begin{cases} P_i \cdot \exp\left[-\frac{t-t_1}{\theta \cdot \sin(\omega_2(t-t_1))}\right] & \text{při } t \geq t_1, \\ 0 & \text{při } t < t_1 \end{cases}, \quad (3.22)$$

kde je  $P_i$  – amplituda tlaku;

$t_1$  – doba působení dodatečného tlaku;

$\theta$  – časová konstanta.

K diferenciální rovnici Nolting-Nepirase (Sirotnjuk, 2008), která popisuje pulzace kavitační bubliny, byl přidán další tlak  $P_{dop}(t)$  a numerickým řešením pro různé hodnoty  $t_1$  byly stanoveny parametry dynamiky kavitační bubliny. Výpočty byly provedeny pro vodu s počáteční hodnotou  $R_0 = 3,2 \cdot 10^{-4}$  cm,  $P_0 = 0,1$  MPa,  $P_a = P_i = 1$  MPa,  $\omega_1 = 1,26 \cdot 10^5$  s<sup>-1</sup>,  $\omega_2 = 1,26 \cdot 10^6$  s<sup>-1</sup>. Ukázalo se, že za těchto podmínek se erozní aktivita několikrát zvyšuje. Se zvýšením amplitudy přídavného tlaku na  $P_i = 10 \cdot P_a$  se účinnost zvyšuje o několik desítekkrát.

Impulzy pozitivního tlaku mohou být také generovány jiskřením ve vodě. Takové experimenty s účinkem pulzu generovaného jiskrovým výbojem na kavitační oblast poblíž povrchu emitoru pracující na frekvenci 18 kHz ukázaly, že po výboji je kavitační oblast zničena (Plesset, 1963). Zda to bylo způsobeno zmenšením velikosti kavitačních bublin a zda byl zaznamenán nárůst erozní aktivity, není v práci uvedeno.

### 3.7 Závěry kapitoly

Na základě analýzy vlivu akustických parametrů a charakteristik na kavitační procesy bylo zjištěno, že účinnost všech procesů provázejících kavitaci závisí na akustickém tlaku v kapalině vznikajícím při zhroucení kavitačních bublin a na jejich počtu. Obecně je hodnota akustického tlaku určena parametry obsahu plynu a závisí také na teplotě kapaliny. Akustický tlak v kapalině ovlivňuje erozivní aktivitu kavitace, která se zvyšuje s nižší rozpustností plynu v kapalině.

Studie také ukázaly, že zvýšením hydrostatického tlaku kapaliny je možné významně zvýšit akustický tlak, což umožňuje řídit procesy kavitační eroze.

Dnes se pulzní akce v kavitačním režimu často používá pro velmi dlouhodobý provoz ultrazvukového zařízení. Příkladem je prevence usazenin na stěnách teplosměnných ploch. V některých případech může impulsní akce dokonce zvýšit erozivní účinnost kavitace.

Obecně lze říci, že počet studií o erozi vlivem akustické kavitace v průběhu času neustále vzrůstá. Tento zájem je spojen na jedné straně se škodlivými účinky způsobenými kavitací v hydraulických strojích a na druhé straně s příznivými účinky při použití akustické kavitace v řadě technologických procesů, například odstraňování otřepů a vyhlazování ostrých hran na povrchu pevných látek, získávání materiálů s vysokou disperzí, ultrazvukové čištění od povrchových filmů atd. V současné době je obrovské množství prací věnováno využití kavitace pro technologické účely, které mohou mít praktické využití.



## 4 ZPŮSOBY PRAKTICKÉ APLIKACE ÚČINKU KAVITACE

### 4.1 Vyhlídky na použití kavitačních technologií

Mezi způsoby, jak najít účinné metody zrychlení, například chemicko-technologické procesy v různých kapalinách, je použití kavitačního efektu v transformačním médiu (Viten'ko et Gumnickij, 2007; Hmelev et al., 2007). Jak je uvedeno v předchozí kapitole, kavitace je prostředek místního přenosu energie, která má nízkou hustotu, do vysoké hustoty energie v důsledku pulzace a zhroucení kavitačních bublin. Když je akustická vlna zředěna, stejně jako v důsledku poklesu tlaku, v důsledku proudění kolem pevného tělesa, v kapalině se vytvářejí dutiny (kavitační bubliny), které jsou naplněny nasycenou párou sestávající z této kapaliny. Během fáze stlačení se v důsledku projevu zvýšeného tlaku a sil povrchového napětí taková dutina zhroutlí, zatímco pára se bude shromažďovat v zóně oddělení fází. Stěnami dutin do ní prosakuje plyn, který je rozpuštěn v kapalině, a ten poté prochází silnou adiabatickou kompresí.

Se zhroucením kavitačních dutin může tlak a teplota plynu v jednotlivých zónách vzrůst na velké hodnoty (například 100 MPa, 10 000 K) (Knèpp, 1974). Když dojde ke zhroucení dutiny, sférická rázová vlna se pohybuje kapalinou, která s ní byla v kontaktu, a rychle se rozpadá v prostoru. V případě excitace pulzních tahových napětí v kapalině se zóny přítomné v ní s projevem kavitace (nezničitelné bubliny páry a plynu s malými rozměry) zvětší a vytvoří se kavitační shluk, jehož tvar a velikost závisí na formě provozního napětí a mezních podmínkách.

Kavitační dutiny jsou schopné procházet kapalinami, rozpuštěnými plyny nebo některými látkami se značným tlakem par. Ionty do nich nemohou pronikat, stejně jako molekuly rozpuštěných látek, které nejsou těkavé. Energie vytvořená během zhroucení dutiny je dostatečná k excitaci a ionizaci molekul vody, stejně jako plynů a dalších látek s významným tlakem par uprostřed kavitačních dutin.

Rázové vlny a kumulativní proudy, které vznikají při zhroucení kavitační bubliny, vedou k erozi pevných látek (destrukci povrchů), čistí povrchy, vedou k disperzi pevných částic, k rozpuštění, extrakci, emulgaci, homogenizaci a vzniku pěny.

Vliv energie paprsku kapaliny vede k deformaci povrchové vrstvy a celého povrchu pevných látek prostřednictvím kinetické energie kapaliny. Nejmenší částice z pevných látek s rozměry blízkými průřezu onoho paprsku vstupují do jeho toku a jsou dalšími zdroji destrukce povrchu vrstvy a samotných pevných částic, které jsou přítomny v kapalině.

Pro účely kavitačního působení na kapalinu se používají průmyslové hydrodynamické, elektrodynamické, piezoelektrické, magnetostrikční a mechanické generátory kavitace.

Pro taková elektroakustická zařízení je aplikován přímý magnetostrikční a piezoelektrický efekt ve střídavých magnetických a elektrických polích. Frekvenční rozsah excitace uvažovaných typů převodníků může být velmi různorodý (v rozmezí 8-44 kHz nebo více). Převodník přenáší ultrazvukové vibrace na různé látky, které je třeba zpracovat. K tomu je vhodné použít originální transformační a porovnávací systémy (koncentrátory, destičky atd.), které mají vyzařovací plochu (Hmelev et al., 2007).

Charakteristickým rysem činnosti pulzního emitoru s elektrickým výbojem je použití elektrohydraulického efektu, při kterém se v kapalině v případě jejího rozpadu vytvoří rázové vlny. Dopad elektrického výboje na kapalinu (elektrohydraulický šok) vede k řadě nejednoduchých jevů: ionizace a rozklad molekul v plazmě kanálu, stejně jako v jeho blízkosti, světelné záření výbojového kanálu, rázové vlny, silné ultrazvukové záření, tvorba a pulzace plynové bubliny, kavitační procesy, tvorba pulzních magnetických polí (Kudimov et al., 2002).

Pro hydrodynamické kavitátory rotačního typu je charakteristický projev hydrodynamických a akustických účinků v kapalině. Takové procesy vznikají v důsledku existujících turbulencí, jakož i kolísání tlaku a rychlosti proudění tekutiny, intenzivní kavitace, rázové vlny a sekundární nelineární akustické efekty (Promtov, 2001). Během otáčení rotoru se jeho kanály čas od času shodují s kanály vytvořenými na statoru. Průtok kapaliny v otvoru statoru je proměnlivý. V případě nadměrného tlakového impulsu ve statorovém kanálu dojde také ke krátkému impulsu se sníženým tlakem, zatímco síly setrvačnosti vedou k napětí v tahu v kapalině, což je příčinou kavitace.

U rezonančních hydrodynamických generátorů se k vytváření oscilací používají rezonanční prvky desek, tyčí a membrán, po kterých proudí proud kapaliny (Kardašev, 1990). Vibrace rezonujících prvků vedou k tvorbě akustických polí z vysílače. Nejčastěji používanými konstrukcemi těchto záříčů jsou deskové záříče obsahující konzolovou nebo dvoubodovou montáž vibračních desek. Proud kapaliny, vytékající určitou rychlostí z kuželovité nebo štěrbinové trysky, je směřován na desku, která má klínový okraj. Výsledkem je, že se tryska rozpadá a objevují se vírové pulzace a kavitace.

Podobný princip přechodu kinetické energie proudu na energii akustických vibrací se používá u vícedílných hydrodynamických záříčů. Proud, který má kruhový průřez, vycházející z trysky, udeří do konkávního reflektoru a je rozstříkovan ve tvaru paprsků. Tyto proudy jsou v kontaktu se špičatými výstupky tyčí, které jsou namontovány na válcové generatice rovnoběžné s osou trysky.

Tím se vytvoří oscilační pohyb tyčí, které v sousedním prostoru vytvářejí velmi silné zvukové pole. V případě použití kuželovo-válcové trysky a konkávního reflektoru, jehož tvar je podobný paraboloidu otáčení, je mezi konci trysky a reflektoru vytvořena pulzující kavitační zóna, která nastavuje parametry vytvořeného akustického pole.

Známé superkavitační hydrodynamické systémy lze klasifikovat podle principu činnosti (Fedotkin et Gulyj, 2000):

- dynamická zařízení, ve kterých jsou pracovní tělesa rotačního typu (lopatky);
- statická zařízení, ve kterých jsou pracovní tělesa nehybná;
- trysková zařízení, která používají tryskové kavitátory;
- kombinovaná zařízení, která zahrnují vlastnosti několika typů zařízení najednou.

Pracovní těleso výše popsaných zařízení by mělo být umístěno v dodatečně profilovaných oblastech proudění (například Venturiho trubice).

Komplex kavitačních zařízení všeho druhu může posílit kavitační efekt. Dobře se ukázalo generování oscilací na různých frekvencích, které se od sebe liší řádově a vyššími hodnotami (Agranat et al., 1987). Tato situace závisí na skutečnosti, že aby

se vzbudil základ kavitace určitého poloměru, je nutné generovat oscilace s určitou frekvencí. Pokud je velikost kavitačních základů minimální, měla by být použita vyšší frekvence s vyšším akustickým tlakem, což vede ke kavitaci.

V případě, že jsou kavitační generátory zapnuty na nestejných frekvencích a pohyb kapaliny skrz ně probíhá postupně, měla by být kapalina zpočátku vedena přes generátor s vyšší frekvencí a poté přes generátor s nejnižší frekvencí. Pomocí vysokofrekvenčního generátoru se vytvářejí kavitační základy nejmenší velikosti, které mohou rychle růst. Takové kavitační bubliny jsou nízkofrekvenční zdroje kavitace v generátoru. Zvyšují se mnohem rychleji, což přispívá k růstu kavitačních tlakových impulsů.

Kavitační excitace kapaliny umožňuje dosáhnout produktivních účinků v průmyslu, vytvářet různé potravinové a biologicky aktivní směsi extraktů, emulzí a suspenzí (Promtov, 2001; Fedotkin et Gulyj, 2000). Takovými potravinovými systémy jsou zeleninové a ovocné šťávy, pyré, pasty, majonéza, homogenizované a rekonstituované mléko. Zahrnují také jogurty, masti, krémy, systémy s biologicky aktivními látkami (pektin, tanin, aminokyseliny a extrakty), emulze a suspenze voda-palivo, barvy a laky atd.

Kavitace se také používá k homogenizaci a pasterizaci mléka. V tomto případě kavitace vede ke zvýšení dispergování emulze a zároveň ničí škodlivé mikroby. V případě zpracování mléka při teplotě 70 °C se celý obsah mikrobů sníží o 10<sup>3</sup>-10<sup>5</sup>krát. V tomto případě dochází k úplné likvidaci vegetativních forem kvasinek a plísní, včetně i patogenních mikroorganismů ze skupiny *Escherichia coli*. Uvedené zpracování umožňuje prodloužit dobu skladování mléka i při teplotách od 9 do 12 °C v neaseptických obalech až na 5 dní bez známek kysnutí.

Kavitace je dobrá pro urychlení procesů rozpouštění a extrakce. Používá se například k rozpuštění pektinu, karotenu, taninu a dalších drahých látek z biomasy. Kavitační účinek vede ke změně vlastností vodného roztoku a hydrogelů polysacharidů: škrob, amylopektin, alginát sodný, chitosan, sodná sůl karboxymethylcelulózy atd. (Hmelev et al., 2007; Promtov, 2001; Fedotkin et Gulyj, 2000). Většina léků se vyrábí extrakcí surovin rostlinného a živočišného původu. Použití kavitace umožňuje zlepšit kvalitu měkkých dávkových forem typů suspenzí a emulzí.

Slibným směrem v energetickém sektoru je využití zařízení na disperzní palivo (Fedotkin et Gulyj, 2000). Kavitace je produktivním nástrojem při výrobě suspenzí vodního uhlí a past na uhelný olej. Použití kvalitních suspenzí uhelného topného oleje vede ke snížení spotřeby topného oleje až o 20–25 %. Použití suspenzí nafty a vody a uhlí jako paliva umožňuje snížit škodlivé emise ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ), zpracovat uhelný odpad ve formě kalu a snížit náklady na výrobu tepla a elektrické energie (Vintovkin, 2005).

Složení vysoce viskózních topných olejů obsahuje vodu v podobě lokálních klastrů. Použitím vytvořených emulzí voda-olej ve formě paliva vzniká velmi účinná metoda, která umožňuje řešit otázku nízkých nákladů na výrobu tepla a el. energie. (Vintovkin, 2005). V procesu spalování emulzí voda-topný olej lze pozorovat dobrý ekonomický účinek, zvýšení účinnosti až o 3–5 % a snížení emisí znečišťujících látek (CO, saze, oxidy dusíku, benzopyren a další karcinogenní polycyklické aromatické uhlovodíky) do atmosféry.

Po kavitačních technologiích na výrobu emulzí voda-topný olej s přídavkem vápníku se v těchto emulzích během spalování snižuje obsah oxidů dusíku ve spalinách až 2-5krát, obsah  $\text{H}_2\text{S}$  až 2-3krát, oxidy uhlíku až 2-2,5krát. V tomto případě jsou pozorovány určité hluboké strukturální změny v molekulárním složení uhlovodíků. Zvyšuje se stupeň disperze asfaltenů, karbenů, karbidů na velikost jednotlivých částic 2-3 mikrony. Dlouhé molekulární řetězce se přeměňují na lehké uhlovodíkové radikály z plynu, destilují palivové frakce.

Vystavením ropy a ropných produktů kavitačním technologiím je možné zvýšit výtěžek těkavých frakcí během atmosférické destilace (Promtov, 2008a). Pomocí kavitační úpravy ropy je možné získat 20-30 % benzínu, 40-50 % motorové nafty, 20-30 % topného oleje, bitumenu a dalších těžkých komerčních produktů.

Kavitační účinek rozbíjí souvislý řetězec, ničí vazby v molekule, má vliv na viskozitu, to znamená na dočasné rozbití van der Waalsových vazeb. V důsledku působení kavitace značné síly po dlouhou dobu dochází k narušení vazeb C - C v molekulách uhlovodíků, a to z důvodu změny fyzikálně-chemického složení molekul (pokles molekulové hmotnosti, teploty krystalizace atd.) a vlastností ropných produktů (viskozita, hustota, bod vzplanutí atd.).

V důsledku působení impulsní kavitace se při přípravě oleje a ropných produktů energie, která se uvolňuje při zhroucení kavitačních bublin, vynakládá na rozbití chemických vazeb mezi atomy velkých molekul uhlovodíkových sloučenin.

Disociační energie vazby C-H se mění v závislosti na molekulové hmotnosti a struktuře molekul v rozmezí 322-435 kJ/mol, disociační energie vazby C-C je 250-348 kJ/mol. Když se vazba C-H rozpadne z molekuly uhlovodíku, vodík se odtrhne, když se vazba C-C rozbije, molekula uhlovodíku se rozpadne na dvě nerovné části. V procesu kavitační úpravy uhlovodíků dochází k destrukci molekul, což je způsobeno jakýmsi mikrotrháním molekul a ionizačními procesy. V důsledku těchto procesů se v systému objevují aktivní částice: radikály, ionty, formace iontových radikálů (Nesterenko et Berlizov, 2007).

Kavitační úprava topného oleje umožňuje snížit viskozitu o 20–30 % a zvýšit bod vzplanutí o 5–10 %. Po dokončení kavitační úpravy se v topném oleji vytvoří až 35 % motorové nafty (teplota destilace 250 – 290 °C).

Bylo experimentálně zjištěno, že ropa, která byla zpracována v generátoru kavitace, začne destilovat za atmosférického tlaku při teplotě nižší o 10 – 15 °C ve srovnání s ropou bez kavitační předúpravy. Současně se destiluje až 50 % neupravené ropy při teplotě 328 °C a 50 % předupravené ropy lze destilovat pod vlivem teploty již 265 °C za atmosférického tlaku, což je o 63 °C méně (Promtov, 2008a).

Řada studií v oblasti impulsního kavitačního ošetření řepkového a slunečnicového oleje ukázala, že zpracované oleje se liší ve fyzikálně-chemických vlastnostech od nezpracovaných olejů. Řepkový a slunečnicový olej ošetřený kavitací se dělí na frakce s různou těkavostí se značným procentem výtěžku. Mají charakteristické rozdíly od původního oleje v nižší viskozitě, zvýšeném bodu vzplanutí. Dnes se široce používá kavitační technologie pro výrobu bionafty z rostlinných a živočišných olejů. Kavitační zpracování reagujících olejů a methanolu (ethanolu) umožňuje zlepšit kvalitu vyráběného produktu, urychlit technologický proces a snížit teplotu jeho provádění (Ablaev et Gumerov, 2006).

V současné době se vyrábějí generátory tepla, které jsou založeny na principu používání kavitace. Jedná se o zařízení tepelných strojů nové technické úrovně, která jsou schopna převádět mechanické a akustické účinky kapaliny na teplo. Zahřívání

určité chladicí kapaliny lze provádět v procesu změny kinetické energie kapaliny na tepelnou energii pomocí kavitace nebo vírových efektů (Promtov et Akulin, 2006).

Kavitační zařízení lze použít v technologiích na čištění nádrží od vodního kamene, jiných usazenin a usazenin na vnitřních površích nebo v těžko přístupných oblastech použitých zařízení nebo potrubních systémů. Kavitační účinek na vodu vede ke změně jejích fyzikálně-chemických vlastností, ke zvýšení pH vody i zvýšení vodivosti. Posunutí pH do zásadité oblasti se jeví vlivem nárůstu skupin OH- vlivem probíhajících elektrochemických reakcí. Elektromagnetické vlny přetvářejí vnitřní strukturu vody. Během vlastního vývoje kavitace se voda na krátkou dobu změní na aktivní rozpouštědlo pro špatně rozpustné látky. To nevyžaduje přidání chemických činidel (Promtov, 2001).

Složitým úkolem v procesu získávání křemičitanových maziv je výroba soustavy s vysokou stabilitou. Použití kavitace při výrobě křemičitanových maziv (např. pro zařízení obsahující převodovku) prokázalo svoji vysokou účinnost. Zapojení kavitačních procesů do výroby chladicích maziv vede ke zlepšení jejich kvality a snižuje spotřebu energie v jejich výrobní technologii. Velikost částic dispergované fáze vyráběných řezných kapalin je 1 mikron. To umožňuje snížit spotřebu řezných nástrojů, zlepšit kvalitu povrchové úpravy a snížit korozi na obráběcích strojích (Promtov, 2001).

Cemento-vodní suspenze, která je kavitována a poté přidána do betonu, zvyšuje pevnost betonu v tlaku a v tahu. Použití kavitačních procesů k výrobě stabilních a vysoce dispergovaných emulzí a past zavedených do betonu umožňuje zvýšit pevnost betonu o 15–20 % (Promtov, 2001).

Za účelem výroby vysoce kvalitního železobetonu pro stavební, námořní a jiné konstrukce je beton chemicky ošetřen komplexními přísadami. Komplexní přísady směsí jsou hydrofobizující povrchově aktivní látky nebo koloidní parafínové pasty. Což je směs dvou látek, které nejsou identické ve své chemické povaze – voda (polární rozpouštědlo) s parafinem (nepolární hydrofobní látka). Aby byla zajištěna stabilita systému „parafin-voda“, je nutné aktivní ošetření, které je zajištěno díky kavitačnímu účinku. Na konci tohoto ošetření se parafínová pasta přidá do betonu spolu s dalšími složkami. Při teplotě asi 60 °C parafín přechází do viskózního stavu, vyplňuje kapiláry a póry betonu. V procesu chlazení betonu jde parafín do původního stavu, díky čemuž je beton odolný vůči vodě. Objemová hydrofobizace betonu parafínovými částicemi

snižuje absorpci vody o 40–50 %, zlepšuje jeho korozní odolnost a trvanlivost při působení agresivních kapalných médií (Promtov, 2001).

## 4.2 Kavítace v potravinářském průmyslu

Moderní vývoj v potravinářském průmyslu zahrnuje velké množství designů různých zařízení, včetně mixérů. Pokud sledujeme podstatu vývoje míchacích zařízení, lze poznamenat, že dnes se začaly široce používat myšlenky využití zcela nových, nekonvenčních fyzikálních efektů a jevů k urychlení míchacích procesů. Mezi tyto jevy patří kavítace, na jejímž základě se vyvíjejí nové technologie.

Jak již bylo zmíněno dříve, věda zná dva typy kavítace – hydrodynamickou a akustickou. Projev hydrodynamické kavítace je usnadněn lokálním poklesem tlaku v proudu tekutiny v procesu proudění kolem pevné látky. Akustická kavítace nastává v důsledku akustických vibrací pohybujících se kapalinou. Takové jevy se nazývají synperiodická kavítace. Synperiodická kavítace je proces paralelního formování a kolapsu miniaturních bublin výparů a plynů, což vede k prudkému nárůstu tlaku a teploty. To je podstata kavítace. Proto použití samostatného typu kavitačního zařízení v technologickém procesu závisí na způsobu získání fenoménu kavítace.

Projev kavítace začíná v důsledku působení ultrazvukových kmitů, kmitů uměle vytvořených v kapalném médiu při nastavené amplitudě tlaku, která se nazývá zvukový tlak. Ultrazvukový reaktor slouží jako budič vibrací. Když vysílač vibruje na ultrazvukové frekvenci, objeví se v kapalině střídání stlačení a prodloužení, což vede k poklesu tlaku (dekomprese) ve srovnání s konstantním statickým tlakem. U fáze zředění akustické vlny v kapalném médiu nastává zlom ve formě dutiny, do které vstupuje nasycená pára. Ve fázi komprese se vlivem zvýšeného tlaku a sil povrchového napětí dutina zhroutlí a pára začne kondenzovat na rozhraní mezi fázemi.

Tato metoda má několik nevýhod. Průchod kapaliny ultrazvukovým reaktorem vyžaduje zvláštní výběr parametrů reaktoru a kapaliny, která má být zpracována. Mezi tyto parametry patří:

- akustické hodnoty (akustický tlak a frekvence);
- termodynamické hodnoty (vnější tlak a teplota);



- kapalinové charakteristiky (hustota, viskozita, povrchové napětí, tlak nasycených par kapaliny, rozpustnost plynu v ní).

Jinak se kavitace nemusí vyvinout. To je způsobeno skutečností, že existuje určitá kritická hodnota statického tlaku, pod kterou se se zvýšením statického tlaku zvyšuje návrat kavitace a nad kterou klesá. U každého konkrétního případu by tedy měla být provedena kompletní analýza a výběr parametrů. V tomto ohledu je snazší použít hydrodynamické kavitační zařízení.

Princip fungování hydrodynamických kavitačních zařízení je následující: do proudu je umístěn přístroj (například mřížka složená z válců), která pomáhá lokálnímu zrychlení toku na rychlosti, které umožňují snížení tlaku na hodnotu tlaku nasycené páry. To vytváří podmínky, které vedou ke kavitaci. V proudu kapaliny se vytvářejí bubliny páry a plynu, které se mohou v případě následného zrychlení toku zvětšit a když vstoupí do zóny vysokého tlaku, zhroutí se.

Potravinářský průmysl dnes využívá technologie pro kavitační úpravu různých kapalin. Známa je technologie pro pečení chlebového a cukrářského těsta s použitím vody aktivované kavitací, ve které dochází k hydratování lepkových proteinů, což umožňuje zvýšit měrný objem chleba, zvýšit jeho pružnost a zpomalit tvrdnutí, omezit používání zlepšovacích prostředků pro pekárny. Kavitační technologie zpracování cukerno-solných roztoků před jejich smícháním s těstem umožňuje snížit koncentraci v chlebové soli a cukru při zachování chuťové a nutriční hodnoty produktu (Šestakov, 2001).

Kavitace umožňuje vyrábět tukové emulze na těsto pouze z rostlinných tuků a vody. To je způsobeno skutečností, že během jejich přípravy je pozorována neúplná hydrolýza tuků s tvorbou di- a mono-glyceridů, které jsou přírodními emulgátory (Promtov, 2008b).

Hydrodynamická kavitace se používá k získání obilné suspenze. Výsledné produkty se vyznačují vysokou chutí a organoleptické vlastnosti splňují stanovené požadavky na:

- vlhkost 48 %;
- optimální pH 4,2-6;
- pórovitost 68 %.

Výpočty ekonomické účinnosti zahrnutí hydrodynamické kavitace do technologického procesu výroby obilného chleba ve fázi mletí, provedené výzkumníky, ukázaly, že čistý ekonomický efekt na 1 tunu hotových výrobků (chleba) bude cca 620 Kč. (Šestakov, 2010).

Nová technologie úpravy obilí před mletím s aerosolem vody aktivované kavitací vytváří zrychlenou difúzi vody a aktivní hydrataci bílkovin a škrobu. Z tohoto důvodu se doba přípravy zrna na mletí zkrátí 3,0krát a sníží se spotřeba energie.

Dnes se pro pekařský průmysl v receptech na přípravu těsta pro masové druhy pečárenských výrobků často používají nasycené emulze tuk-voda, které zahrnují rostlinný olej (slunečnicový, bavlníkový, sójový atd.), Vodu a slunečnicové nebo sójové fosfatidy. Takovou emulzi představuje kapalná fáze a má zvýšenou odolnost proti delaminaci. Více než 10 dní se mastné emulze nemusí oddělit. Zahrnutí fosfatidů navíc zlepšuje fyziologickou hodnotu pečárenských výrobků. Tato situace je způsobena skutečností, že fosfatidy hrají významnou roli v oxidačních procesech v živém organismu: pomáhají regulovat přísun energie do buněk a jejich spotřebu kyslíku, pomáhají přenášet informace mezi nimi a také normalizují funkce jater, gastrointestinálního traktu, kardiovaskulárního a imunitního systému.

Za účelem implementace uvažovaných kavitačních technologií používaných v potravinářském průmyslu se k vytvoření akustické kavitace používají ultrazvukové reaktory.

V dnešní době se jako jeden z důležitých úkolů na ochranu životního prostředí jeví čištění vody bez použití chemických činidel. Odmítnutí čistit vodu chemickými činidly umožní neznečištění přírody chemickými látkami, nevyvolání škodlivých nebo dráždivých účinků na lidské tělo při použití vyčištěné vody. Činidla může nahradit kavitační úprava vody (Prohas'ko, 2009). Při průtoku vody (s velkou rychlostí) se tvoří během kavitace bubliny slabě ionizovaného plynu. Rovněž se tvoří chemicky aktivní radikály, které zlepšují oxidaci organických a anorganických nečistot ve vodě. Při kavitaci ve vodě dochází ke zničení koloidů a částic, uvnitř nichž se často nacházejí bakterie. V tomto případě jsou patogenní organismy zbaveny ochrany před dalšími chemickými a fyzickými účinky kavitace. Baktericidní účinek kavitace je přímo úměrný jeho intenzitě, frekvenci nebo době zpracování. Účinkem kavitace na vodné roztoky je štěpení molekul vody v kavitačních bublinách. Účinek kavitace na vodu se projevuje přeměnou jejích fyzikálně-chemických vlastností: zvýšení pH, elektrické

vodivosti vody, zvýšení počtu volných iontů a aktivních radikálů, strukturování a aktivace molekul. Projev kumulativních proudů kapaliny, lokální pulzace tlaku a teploty během kolapsu kavitačních mikrobublin může vést ke smrti bakterií. Tento účinek lze použít k dezinfekci kapalných produktů a roztoků. V případě aktivního působení rázových vln ve vodných roztocích se počet hygienicky významných zástupců čeledi Entrobacteriaceae, gramnegativních bakterií *Echerichia coli* a *Salmonella sp.*, snižuje tisíckrát (Promtov, 2008b).

#### **4.3 Aplikace ultrazvukových kavitačních technologií pro čištění elastických povrchů**

V současné fázi vývoje vědy a techniky v mnoha průmyslově vyspělých státech existují aktuální otázky zvyšování účinnosti a environmentální bezpečnosti použitých technologií. Velká pozornost je věnována technologiím, které zlepšují hygienickou a epidemiologickou situaci. V tomto ohledu se stává relevantní vývoj a implementace technologií nové technické úrovně, které jsou zaměřeny na řešení těchto problémů.

Tato technologie také zahrnuje technologii čištění elastických povrchů, například textilie.

Standardní technologie čištění tkanin vyžaduje použití rotujícího bubnu, do kterého jsou umístěny tkaniny a přidán roztok promývací vody. V některých případech lze použít stacionární nádobu a elektromechanický pohon, který pohání roztok mycí vody a míchá tkaniny. Použití vysoce aktivních chemických detergentních vodných roztoků a aktivní mechanické míchání textilií vede k jejich poškození, snížení pevnosti textilie a jasu barev. Kromě toho je hydrosféra znečištěna použitými technologickými čisticími roztoky, které zahrnují velké množství škodlivých chemikálií a nebezpečných mikroorganismů. Požadavky na životní prostředí upravují dezinfekci použitých detergentů, například po umytí nemocničního oblečení a ložního prádla. V tomto ohledu zahrnuje standardní technologie čištění tkanin další náklady na čištění a dezinfekci odpadních vod. Kromě toho pro dezinfekci tkanin, které mají být vyčištěny, zejména pro lékařské účely, které vyžadují speciální ošetření. Tehdy lze použít horkou páru nebo UV lampy.

Použití ultrafialových lamp za účelem dezinfekce odpadních vod má špatnou účinnost v důsledku zákalu použitého roztoku a tím i špatného průchodu UV záření.

Takové zpracování trvá dlouho a vyžaduje hodně energie. Jeho implementace vyžaduje kvalifikovaný personál a průběžnou kontrolu konečné kvality. Při domácí implementaci je taková technologie dezinfekce tkanin obtížná.

Dnes je ultrazvuková kavitace široce používána pro technologii. Tento jev je pozorován, když ultrazvukové vibrace s vysokou intenzitou pronikají do kapaliny. Kromě řady výhod vám ultrazvuková kavitace umožňuje dostatečně vyčistit kontaminované povrchy a dezinfikovat je.

V případě použití kavitace k čištění dochází k nárazu na kontaminované povrchy a existující mikroorganismy v důsledku fyzikálních procesů, které jsou doprovázeny zhroucením kavitačních bublin, které se objevují ve fázi výboje ultrazvukového vlnění.

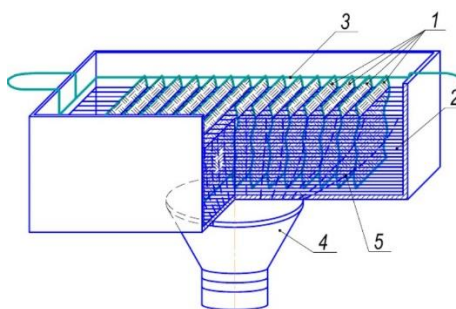
Provádění čištění ultrazvukové kavitace a dezinfekce povrchu je uvedeno v různých studiích (Pirsol, 1975; Smorodov, 2008), jeho mechanismus je následující:

- primární destrukce kumulativním paprskem, vytvořeným při zhroucení kavitační bubliny, který je umístěn vedle zatuhlé nečistoty, nebo mikroorganismů;
- následný vliv sférických rázových tlakových vln, které se tvoří v důsledku zhroucení kavitační bubliny, která je vzdálená od povrchů a sousedních bublin;
- vliv intenzivních mikroproudů, které vznikají v důsledku pulzace a zhroucení kavitačních bublin, což pomáhá rozpouštět a odplavovat mastné filmy nečistot;
- vliv na mikroorganismy teplotou v důsledku místního nárůstu v důsledku zhroucení kavitačních bublin (až do 1000 °C);
- destrukce mikroorganismů pomocí tlakového rozdílu podél ultrazvukové vlnové délky;
- stimulace oxidačních procesů v kavitační oblasti.

Srovnávací testy tradičních a ultrazvukových technologií čištění kavitací jsou popsány v práci ukrajinských autorů (Jahno et al., 2010) pro čtyři velmi rozšířené typy tkanin: chintz, cambrie, kaliko, hedvábí. Čištění bylo prováděno přidáním pracího prášku při teplotě 40 °C. Koncentrace prášku ve všech testech byla udržována stejná. Délka každého čisticího cyklu byla 30 minut.

Analýze byla nejprve podrobena změna pevnostních charakteristik tkanin v procesu tradičního a ultrazvukového čištění kavitací, jakož i srovnání indikátorů kvality odstraňování nejběžnějších typů znečištění.

Vliv počtu čistících cyklů na změnu pevnosti tkáně byl proveden na vzorcích  $30 \times 100$  mm. Jedna část vzorků byla zpracována tradiční technologií v bubnové pračce a druhá byla zpracována pomocí ultrazvukové kavitace. Za tímto účelem byly vzorky upevněny na speciální rám a umístěny do kavitace technické lázně (Obr. 10). Zdrojem ultrazvukových vibrací byl rezonanční piezoelektrický pohon s nízkou amplitudou ve formě půlvlnného Langevinova měniče (Hmelev et al., 2021) (Obr. 11), který byl umístěn na spodní ploše lázně. Vertikální uspořádání vzorků v rámu zajistilo jejich minimální účinek na zavedené ultrazvukové pole v objemu kavitace lázně. Energie spotřebovaná kavitací lázní byla 100 W. Pro srovnání - obvykle udávané hodnoty bubnové pračky: motor cca 500 - 700 W, topná spirála 1-1,5 kW. Intenzita ultrazvukových vibrací zavedených do kapaliny byla  $2,5 \text{ W/cm}^2$ , hustota ultrazvukové energie v objemu kapaliny byla  $0,1 \text{ W/cm}^3$  a amplituda vibrací emitující plochy pohonu byla  $5 \mu\text{m}$ .



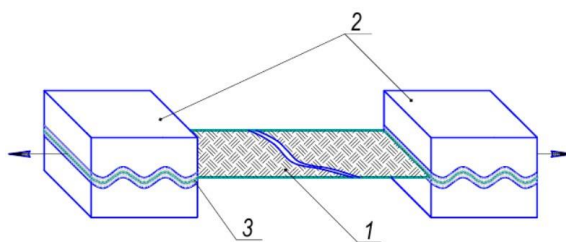
Obr. 10 – Rozložení vzorků tkanin v kavitace lázni: 1 - vzorek tkaniny; 2 - voda s rozpuštěným pracím práškem; 3 - rám s pevnými vzorky tkáně; 4 - zdroj ultrazvukových vibrací; 5 - oblast expozice kavitace (Jahno et al., 2010).



Obr. 11 – Ultrazvuková půlvlnná rezonanční piezoelektrická jednotka s nízkou amplitudou (Jahno et al., 2010).

Po každém čisticím cyklu pomocí dvou technologií byly vzorky zcela vysušeny. Poté byly některé vzorky použity k měření jejich pevnosti a zbytek byl podroben dalším čisticím cyklům.

Zkoušky pevnosti byly prováděny na univerzálním stroji pro zkoušení tahem TIRAtest-2151. Vzorky byly upnuty podle diagramu zobrazeného na Obr. 12, pomocí speciálních úchopů, které vylučují poškození tkáňových vláken (Jahno et al., 2010).

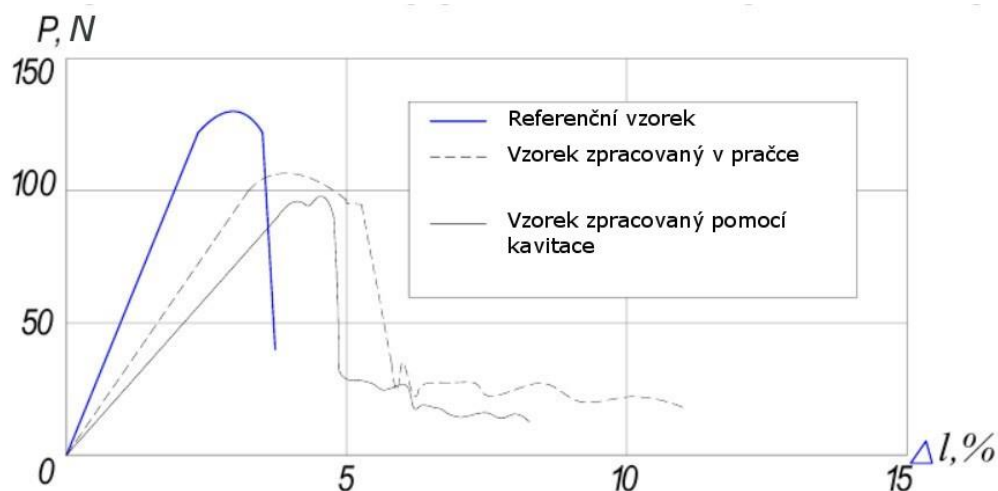


Obr. 12 – Schéma testování vzorků tkáně na pevnost: 1 - zkušební vzorek; 2 - zachycení; 3 - vlnité desky zabraňující poškození vzorku (Jahno et al., 2010).

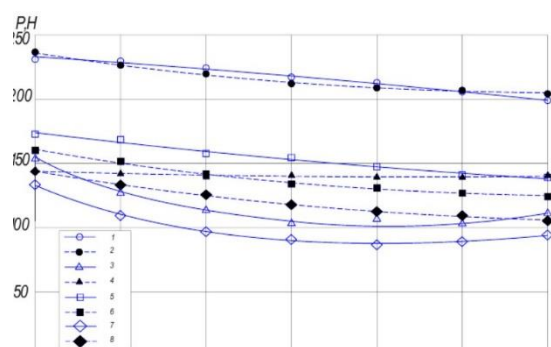
Zkoušky tahem byly prováděny s rychlostí pohybu úchytů 50 mm/min při teplotě 22 °C a relativní vlhkosti 86 %.

Deformační diagramy byly získány pro všechny původní, nezpracované a všechny zpracované vzorky. Jako příklad lze uvést Obr. 13, kde jsou uvedeny diagramy deformace vzorků kaliko v počátečním stavu a po 30 cyklech zpracování (Jahno et al., 2010). Výsledky testu pro všechny vzorky tkání jsou shrnuty v grafických závislostech zobrazených na Obr. 14.

Získané výsledky naznačují, že po 30 technologických cyklech čištění bubnového a ultrazvukového kavitace se pevnost téměř všech uvažovaných typů tkanin snížila o 16-23 % oproti původním hodnotám. Srovnání bubnového a kavitačního praní současně ukazuje, že obě uvažované technologické procesy stejně snižují pevnost tkaniny, což vyvrací názor, že kavitační účinek intenzivně ničí strukturu bavlněných tkanin. Vyjímkou je cambric, který vykazuje vysokou odolnost proti kavitaci. Jeho pevnost po 30 cyklech čištění kavitací se snížila pouze o 2-3 %, zatímco po 30 cyklech čištění bubnu se síla cambricu snížila o 22 %.

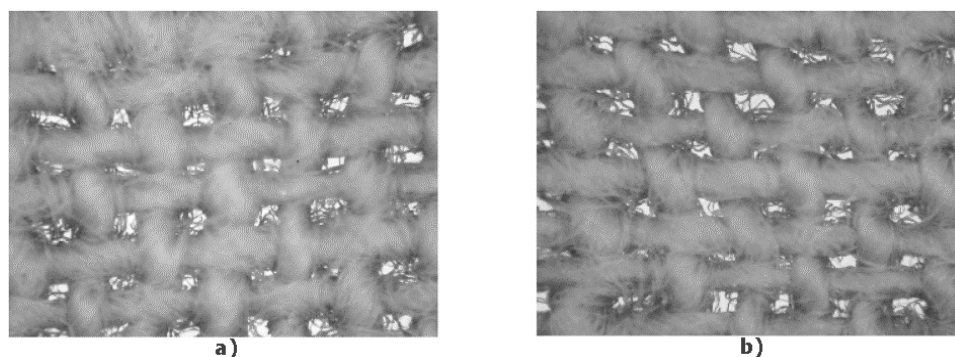


Obr. 13 – Schéma vzorků chintzů po 30 cyklech technologického zpracování: P - tažná síla v tahu;  $\Delta l$  je prodloužení vzorku (Jahno et al., 2010).



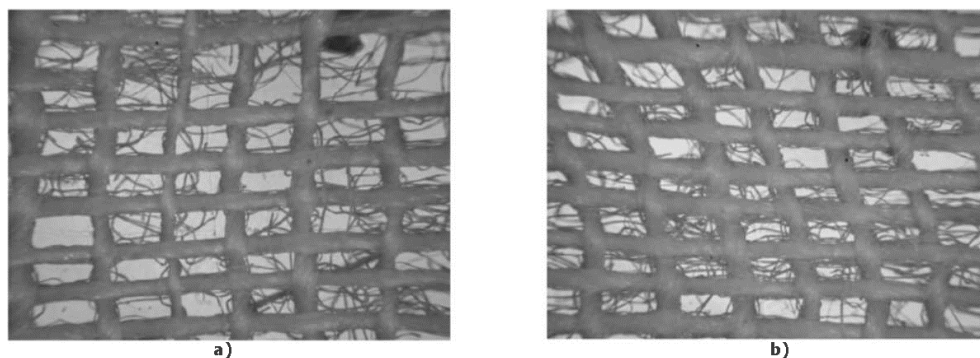
Obr. 14 – Závislost pevnosti v tahu vzorků tkání na počtu cyklů zpracování (zpracování textilie s tradiční technologií čištění v bubnovém stroji: 1 kaliko; 3 - cambric; 5 - hedvábí; 7 - chintz; ošetření textilie pomocí ultrazvukové kavitace: 2 - kaliko; 4 - cambric; 6 - hedvábí; 8 - chintz (Jahno et al., 2010).

Mikrografy původního vzorku hrubého kalika (Obr. 15, a) a po 30 cyklech kavitace (Obr. 15, b) naznačují, že struktura a integrita vláken je zachována, je pozorováno pouze jejich mírné bobtnání.

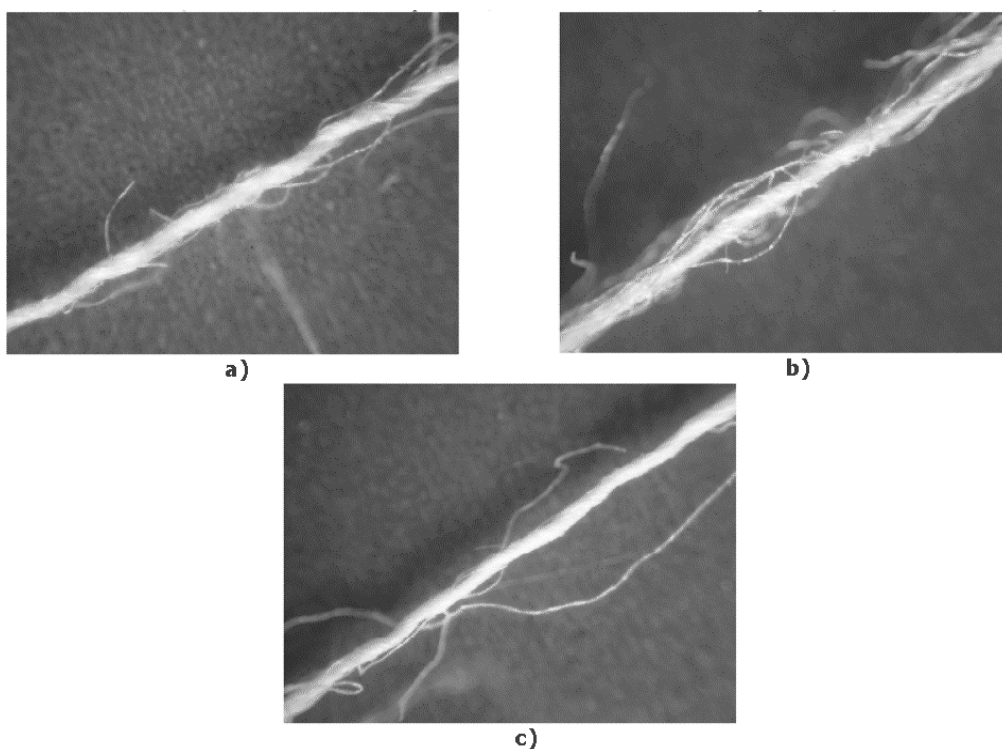


Obr. 15 – Struktura vzorků hrubého kalika: a - před ošetřením kavitací; b - po kavitacím ošetření (Jahno et al., 2010).

Vzorek cambricu po 30 cyklech kavitačního ošetření je prakticky beze změn (Obr. 16). Zároveň s tradičním mechanickým čištěním po 30 cyklech ztratila cambric až 23 % své síly. Je pozorováno jakési kavitační zpevnění nití tkaniny v důsledku zhutnění (Obr. 17).



Obr. 16 – Struktura vzorků z cambricu: a - před kavitací; b - po kavitačním ošetření (Jahno et al., 2010).



Obr. 17 – Vzorky lýkové příze: a - původní vzorek; b - po 30 cyklech zpracování strojního bubnu; c - po 30 cyklech kavitačního ošetření (Jahno et al., 2010).

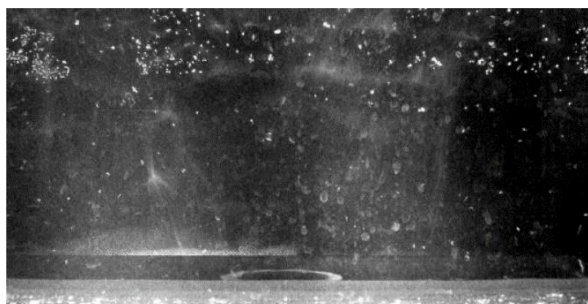
Pro posouzení kvality čištění byla vybrána chintzová textilie. Jako znečišťující látky byly použity krev a slunečnicový olej. Byly zkoumány tři metody čištění: tradiční mechanický buben a dvě kavitace s použitím různých režimů ultrazvuková kavitace, - režim s ultrazvukovou vlnou s intenzitou až  $10 \text{ W/cm}^2$ , vytvořený rezonančním



měníčem s nízkou amplitudou, a režim s ultrazvukovou vlnou s intenzitou více než  $10 \text{ W/cm}^2$ , vytvořený s rezonančním měničem s vysokou amplitudou.

Studie prokázaly, že nejvyšší kvality čištění tuhých nečistot je dosaženo kavitačním čištěním pomocí ultrazvuku s nízkou intenzitou a s mastnými nečistotami - pomocí kavitačního čištění s ultrazvukem o vysoké intenzitě.

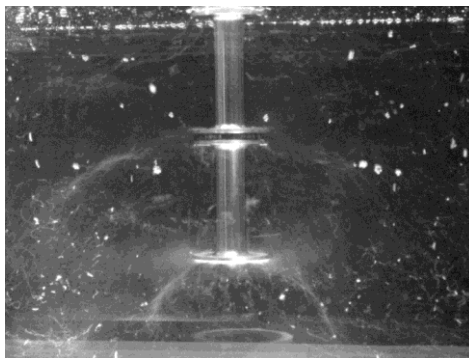
Při intenzitě ultrazvukových vibrací v rozmezí  $1$  až  $10 \text{ W/cm}^2$  se v kapalně fázi aktivně vytvářejí malé bubliny plyných par, prakticky pouhým okem neviditelné (Obr. 18). Po vytvoření jedné nebo několika oscilací a akumulace energie se bubliny zhroutí ve fázi komprese. V tomto případě, pokud je bublina daleko od sousedních bublin nebo od pevných povrchů, pak je její tvar blízky sférickému a ke zhroucení dochází při tvorbě sférických rázových vln. Jinak je tvar bubliny zkreslený a v důsledku radiální nerovnováhy sil se bublina zhroutí s vytvořením kumulativního paprsku směřujícího k nejbližšímu povrchu. Rázové vlny a kumulativní proudy ničí zatuhlé nečistoty, oddělují nečistoty od vláken tkaniny a překonávají síly adheze a soudržnosti. Oscilace bublin a odchylné rázové vlny generují mikroproudy v roztoku čistícího procesu. Mikroproudy podporují míchání promývacího roztoku na molekulární úrovni.



Obr. 18 – Kavitační oblast vytvořená během činnosti ultrazvukového emitoru s nízkou amplitudou instalovaného na spodním povrchu kavitační komory (Jahno et al., 2010).

Velké množství kolabujících bublin poskytuje výslednému kavitačnímu médiu vysokou erozní aktivitu, aktivuje kapalinu v důsledku tvorby volných radikálů během kolapsu bublin a vede k zesílení chemických procesů v kapalině. Současně je významně aktivován účinek chemických složek pracího roztoku, což umožňuje zkrátit čas technologického procesu čištění a snížit množství spotřebovaných detergentů. Při intenzitě ultrazvukových vibrací více než  $10 \text{ W/cm}^2$  nemají kavitační bubliny čas zhroutit se ve fázi komprese kvůli velkým hodnotám amplitudy akustického tlaku, ale

pokračují v oscilaci v čase s ultrazvukovou vlnou a postupně se zvětšují na velikost pozorovanou pouhým okem (Obr. 19).



Obr. 19 – kavitační oblasti vytvořené ultrazvukovým pohonem s vyvinutým radičním povrchem (Jahno et al., 2010).

Intenzivní kavitační proudy tvořené bublinami par a plynů opouštějí emitující povrch piezoelektrického pohonu. Oscilace těchto bublin vedou k výskytu intenzivních mikrotoků v objemu technologického promývacího roztoku. Čistící roztok přejde do jakéhosi třesoucího se dynamického stavu. Ve stejné době se nepohyblivý povrch znečištěný tukem, v tomto případě povrch tkaniny, začne intenzivně čistit v důsledku rozpuštění a odplavení znečišťujících látek intenzivními mikroproudy promývacího roztoku. Na rozdíl od tradičního čištění bubnu není tkanina, přestože zůstává nehybná, mechanicky zdeformovaná nebo poškozená.

Během testů bylo dosaženo vysoké intenzity ultrazvuku pomocí ultrazvukového rychlostního transformátoru.

V tomto případě byla amplituda oscilací pracovní plochy pohonu 25  $\mu\text{m}$ , intenzita ultrazvukové vlny zavedené do kapaliny dosáhla 18  $\text{W}/\text{cm}^2$ . Energetická hustota ultrazvuku byla 0,1  $\text{W}/\text{cm}^3$ . Měnič byl napájen výkonem 100 W.

Studie ukázaly, že další zvýšení intenzity je spojeno s nepřiměřeným zvýšením ztrát, když jsou do kapaliny zavedeny vysokofrekvenční vibrace. Důvodem je tvorba kavitační vrstvy na emitující ploše pohonu, což je akumulace bublin plyn-plyn. Tato dvoufázová vrstva má za následek rozptýlení a absorpci ultrazvukové energie. Potřeba zvýšit produktivitu studované technologie čištění vyžaduje zavedení výrazně vyšší výkonové ultrazvukové energie do kapaliny. K tomu by měla být zvětšena plocha vysílající pracovní plochy pohonu, a pokud je nutné zvýšit intenzitu ultrazvuku, je nutné použít různé metody soustředění ultrazvukové energie v kapalině.

Pro technologická zařízení implementující metodu čištění ultrazvukovou kavitací je možné doporučit ultrazvukový rezonanční emitor pohonu s rozvinutým radiačním povrchem (Obr. 20).

Disky instalované v antinodách podélné stojaté vlny deformace emitují ultrazvukové vlny do objemu kapaliny. Kvůli rozptylu rychlosti zvuku po délce výstupního stupně transformátoru rychlosti budou amplitudy vibrací disků poněkud odlišné. Je také možné uměle přemístit jednotlivé disky z antinod stojaté vlny. V takovém případě se jejich amplitudy vibrací sníží. To umožní použití jednoho takového pohonu k získání spektra intenzit zvuku, které je podle předložených výsledků experimentálních studií nezbytné k zajištění účinnosti technologie ultrazvukové kavitace pro čištění elastických povrchů.

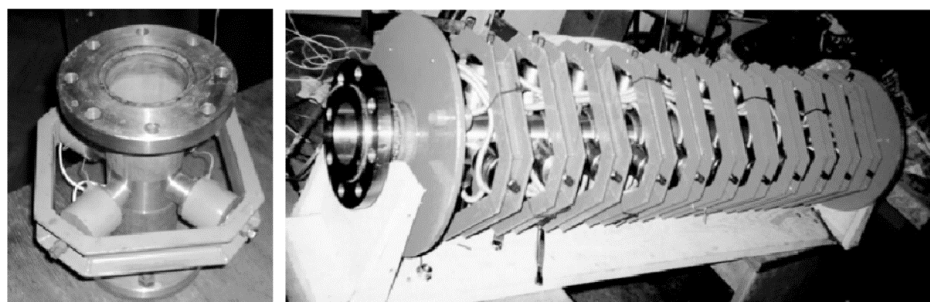
Ultrazvuková technologie kavitačního čištění zajišťuje spolehlivou sterilizaci tkanin i odpadních tekutin bez použití dalších prostředků. Čištění tkanin pomocí kavitace při intenzitě  $18 \text{ W/cm}^2$  po dobu 30 minut zajistilo dezinfekci použitého promývacího roztoku.



Obr. 20 – Ultrazvukový rezonanční emitor pohonu s vyvinutým radiačním povrchem (Griško et al., 2011)

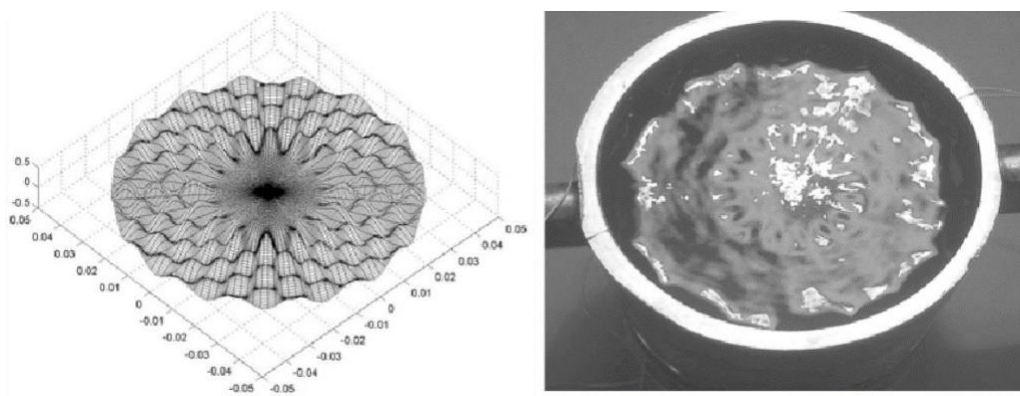
#### **4.4 Ultrazvuková průtoková kavitační jednotka pro zlepšení efektivity technologických procesů**

Pro realizaci technologických procesů spojených s úpravou kapaliny pomocí ultrazvukové kavitace jsou nejvýhodnější zařízení s průtokovou válcovou kavitační komorou (Obr. 21), která zavádí minimální odpor do stávajících technologických potrubí (Lugovskoj et Gričko, 2009).



Obr. 21 – Jednodílné a vícedílné průtokové silnostěnné kavitační komory (Griško et al., 2011).

Taková zařízení obvykle používají radiálně zakřivené vibrace válcového tělesa kavitační komory. K jejich vytvoření jsou na vnější generující plochu instalovány ultrazvukové rezonanční zářiče. Radiálně zakřivené rezonanční vibrace stěn komory umožňují relativně rovnoměrné rozložení kavitačních oblastí po průřezu komory. Kapalina protékající takovou trubkovou komorou s rozptýleným ultrazvukovým polem (Obr. 22) je vystavena rovnoměrné kavitační úpravě střední intenzity, která umožňuje získat vysoce kvalitní emulze, které po dlouhou dobu nestratifikují, aktivují kapaliny a chemické procesy. Taková disperze ultrazvukového pole však neumožňuje vysokou intenzitu vibrací, která je nezbytná pro inaktivaci široké škály mikroorganismů přítomných v čerpané kapalině.

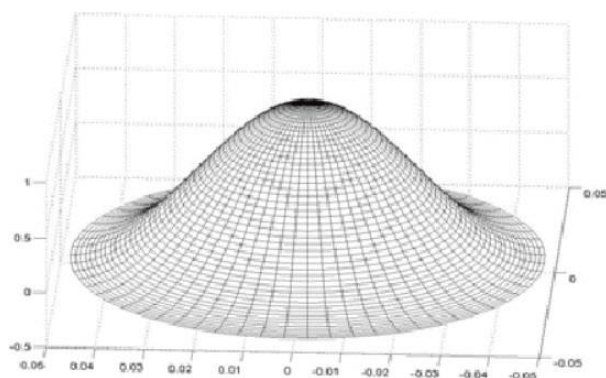


Obr. 22 – Tvar ultrazvukového pole v kapalině po excitaci radiálně-ohybových vibrací (Griško et al., 2011).

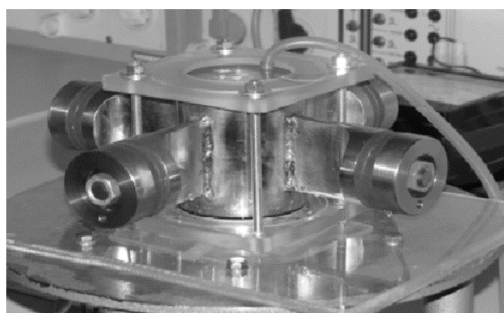
Ke zvýšení intenzity ultrazvukových vibrací v kapalině se používají různé zaostřovací systémy. Takové systémy umožňují minimalizovat energetické ztráty během zavádění ultrazvukových vibrací do kapaliny a zajistit dosažení vysoké intenzity vibrací v ohniskové oblasti.

Jsou známy sférické zaostřovací systémy, které umožňují získat vysoké intenzity ultrazvukové energie (Lugovskoj et Gričko, 2009). Taková zařízení však nejsou technologicky proveditelná, pokud je třeba zpracovat kontinuální tok kapaliny.

Koncentrace ultrazvukové energie podél osy válcové průtokové komory může být dosaženo díky buzení radiálního režimu radiálních vibrací komory (Obr. 23). V tomto případě je kavitační komora vytvořena ve formě trubkového segmentu, jehož délka je menší než polovina vlnové délky rezonančních radiálních vibrací excitovaných v trubce (Obr. 24). Tento stav poskytuje čistě radiální vibrace trubkového vibrátoru.



Obr. 23 – Tvar ultrazvukového pole ve válcové komoře při excitaci režimu radiálních vibrací (Griško et al., 2011).



Obr. 24 – Experimentální uspořádání pro studium činnosti ultrazvukového ro vyšetření ultrazvukového trubkového kavitátoru (Griško et al., 2011).

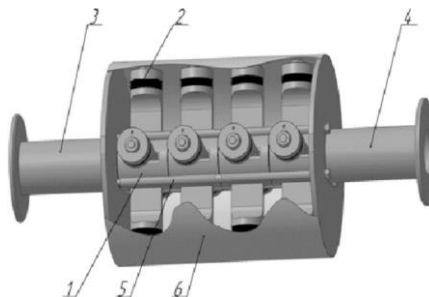
Na vnějším povrchu aparátu, který provádí rytmické oscilace, jsou instalovány půlvlnné ultrazvukové pohony, jejichž výstupní stupně rychlostních transformátorů mají nožovitý tvar a jsou umístěny podél přímek válcového povrchu komory. Tato implementace tvaru rychlostních transformátorů umožňuje efektivně přenášet ultrazvukové vibrace na trubkový kavitátor s minimálním zkreslením tvaru vibrací.

Experimentální studie potvrzují účinek koncentrace ultrazvukové energie podél osy komory při provádění radiálních vibrací. Tato konstrukce umožňuje dosáhnout intenzity ultrazvuku podél osy komory řádově  $50\text{-}60 \text{ W/cm}^2$ .

Experimentální studie šíření ultrazvukových vibrací vyvolaných prstencovým emitorem v režimu radiálních vibrací podél osy potrubí ukázala rychlý pokles vibrací

na úroveň pod prahem kavitace. Umístění indikátorové hliníkové fólie podél potrubí s vložkou ve formě prstencového emitoru ukázalo, že intenzivní kavitační eroze fólie je pozorována pouze v oblasti emitoru (Griško et al., 2011).

Výsledky experimentů umožnily doporučit za účelem zvýšení produktivity technologického zařízení postaveného na bázi ultrazvukového emitoru s radiálním režimem vibrací postupnou instalaci několika akusticky oddělených podobných trubkových emitorů (Obr. 25).



Obr. 25 – Zařízení pro úpravu průtoku ultrazvukové kavitace: 1 - prstencové ultrazvukové zařízení vytvářející rytmické oscilace.; 2 - ultrazvukový emitor; 3 - sací potrubí; 4 - výstupní potrubí; 5 - utahovací kolík; 6 - tělo zařízení (Griško et al., 2011).

V tomto případě je možné díky velké radiační ploše zavést do kapaliny podstatně větší množství ultrazvukové energie. Současně se na vnitřním povrchu prstenců netvoří kavitační vrstva, která absorbuje a rozptyluje ultrazvukovou energii, a slabá kavitační eroze emitujícího vnitřního povrchu prstenců zajišťuje trvanlivost kavitační komory. V kavitační komoře je pohyb tekutiny konstrukčně zajištěn pouze podél osy komory, tj. přes oblast s maximální intenzitou ultrazvukových vibrací.

#### 4.5 Hodnocení účinnosti kavitačních reaktorů pomocí modelových reakcí

Rozmanitost zařízení používaných pro generování akustické a hydrodynamické kavitace je obrovská a v literatuře chybí jednotná kritéria pro srovnání těchto zařízení. Vzhledem k tomu, že použití kavitačních reaktorů pro vyvolání chemické přeměny založené na kavitačních jevech má zásadní význam, je žádoucí porovnávat různá zařízení pomocí modelových reakcí. Jednou modelovou reakcí se zabýval Gogate (Gogate et al.; 2000). Specificky se jednalo o rozklad jodidu draselného za uvolnění jódu. Gogate se pokusil o srovnání různých zařízení obecně používaných pro kavitační přeměny, jako jsou ultrazvukový roh, ultrazvuková lázeň, hydrodynamické kavitační zařízení využívající více otvorů a vysokorychlostní a

vysokotlaký homogenizátor, pomocí jednotného kritéria kavitačního výtěžku založeného na celkové spotřebě energie a energetické účinnosti systému.

Ke stanovení energetické účinnosti zkoumaného zařízení se mohou použít kalorimetrické metody. Gogate měřil nárůst teploty pevně stanoveného množství vody v izolované nádobě za danou dobu. Na základě těchto údajů byla vypočtena skutečná energie rozptýlená do kapaliny podle následující rovnice:

$$E = mC_p \left( \frac{dT}{dt} \right), \quad (4.1)$$

kde  $E$  je energie rozptýlená do kapaliny,  $C_p$  je tepelná kapacita rozpouštědla,  $m$  je hmotnost rozpouštědla,  $dT$  je teplotní rozdíl mezi počáteční teplotou a konečnou teplotou po určité reakční době a  $dt$  je čas.

Energetickou účinnost pak lze vypočítat takto:

Energetická účinnost = (výkon rozptýlený v kapalině změřený podle vztahu 4.1)/(elektrický výkon dodaný do systému). Energetická účinnost udává množství energie efektivně rozptýlené v systému, jejíž část je využita pro tvorbu kavit a měla by být pro dané zařízení co nejvyšší.

Druhým parametrem, který může být použit pro charakterizaci kavitačních reaktorů, je kavitační výtěžek, který je dán následujícím vztahem:

$$\text{Kavitační výtěžek} = \frac{\text{požadovaná chemická změna (výtěžek jódu)}}{\text{hustota energie}}, \quad (4.2)$$

kde hustota energie je definována jako energie dodaná médiu (skutečná elektrická energie) na jednotku objemu média. Kavitační výtěžnost akustického/hydrodynamického zařízení udává schopnost zařízení vyvolat požadovanou změnu na základě elektrické energie skutečně použité pro generování kavitace.

Gogate a kol. ve své práci (Gogate et al.; 2000) zjistili, že zkoumané hydrodynamické kavitační reaktory mají vyšší účinnost a vyšší kavitační výtěžek než akustické kavitační reaktory pro danou modelovou reakci. Hlavní přínos jejich práce spočívá v zavedení metody pro srovnání (z hlediska energií) různých kavitačních reaktorů.

## 4.6 Závěry kapitoly

V moderních podmínkách umožňuje účinek kavitace na kapalinu získat vysoce kvalitní technologické, potravinářské a biologicky aktivní roztoky extraktů, emulzí a suspenzí (zeleninové a ovocné šťávy, pyré, pasty, majonézy, homogenizované a rekonstituované mléko, jogurty, masti, krémy, systémy obsahující biologicky aktivní látky; látky: pektin, tanin, aminokyseliny, extrakty), vodní a palivové emulze a suspenze, barvy a laky atd.

Kavitace se účinně využívá ke zintenzivnění procesů rozpouštění a extrakce, například pektinu, karotenu, taninu a dalších cenných látek z biomasy. Slouží jako účinný prostředek k získávání vodno-uhelných suspenzí a uhelných olejových past.

Kavitační účinek na ropu a ropné produkty umožňuje zvýšit výtěžek těkavých frakcí během atmosférické destilace, a generátory kavitace

Lze použít v čistících procesech od tvorby vodního kamene, různých usazenin a nečistot na vnitřních površích a na těžko přístupných místech technologických zařízení a potrubí. Kavitační úprava vody mění její fyzikální a chemické vlastnosti, zvyšuje pH vody, podporuje její aktivaci.

V průmyslu se pro kavitační působení na kapalinu používají hydrodynamické, elektrodynamické, piezoelektrické, magnetostrikční a mechanické generátory kavitace.

V ultrazvukovém rozsahu jsou nejběžnější piezoelektrické a magnetostrikční generátory kavitace.

Výsledky experimentální studie potvrzují proveditelnost použití technologie ultrazvukového kavitačního čištění k odstranění zatvrdlých nečistot a v podobě mastného filmu.

Bylo zjištěno, že kavitační ošetření snižuje pevnost tkaniny podobně jako při tradičním čištění v bubnu, tj. ne více než 23 % během 30 cyklů zpracování. Současně, na rozdíl od tradičního čištění bubnu, s kavitační technologií není tkáň mechanicky deformována, ale je ve statickém stavu, což umožňuje její použití při zpracování háčkových výrobků z tenkých tkání.



Studie prokázaly, že k dosažení vysoké účinnosti technologie čištění ultrazvukem kavitace je nutné zajistit přítomnost ultrazvukových vibrací střední a vysoké úrovně intenzity v technologické kavitační komoře, vytvářených ultrazvukovými rezonančními pohony s nízkou a vysokou amplitudou. Za tímto účelem se navrhuje použít ultrazvukový pohon se silným povrchem vyzařování.

Provedené studie potvrzují zosťrovací schopnosť prstencového emitoru provádějícího ultrazvukové radiální vibrace. Bylo zjištěno, že použití ultrazvukových pohonů s nožovým transformátorem oscilační rychlosti pro buzení vibrátoru umožňuje nejúčinnější zavedení ultrazvukové energie do vibrátoru při minimálním zkreslení radiální formy vibrací vibrátoru.

Zostřovací vlastnosti takového emitoru umožňují dosáhnout vysoké intenzity ultrazvuku, který zajišťuje inaktivaci široké škály mikroorganismů, když kapalina protéká centrální částí emitoru.

Je navržen směr vytváření průmyslových ultrazvukových technologických zařízení s vysokým výkonem a trvanlivostí.

Je ukázána metoda pro srovnání (z hlediska energií) různých kavitačních reaktorů.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 5.1 Cíl a popis experimentu

Cílem experimentální části diplomové práce bylo prokázat pozitivní využití způsobu interakce kavitačních bublinek s pevným povrchem. Též i dokázat, že kavitační procesy mohou urychlit i takové reakce, které jsou ve všeobecném povědomí ukotvené, jakožto velmi dlouhodobé, například výroba whisky. Vycházel jsem ze svého předpokladu, že při použití ultrazvuku, světla i tepla, mohou výrazně rychleji vytvořit onen známý nápoj s nezaměnitelnou chutí, na který se normálně potřebují roky.



Obr. 26 – Fotografie ultrasonické čističky použité v experimentu.

Pro experiment byl použit Ultrasonic cleaner na čištění zlatnických výrobků o výkonu 180 W a vlnové délce ultrazvuku cca 40 kHz (Obr. 26).



Obr. 27 – Fotografie analytických vah použitých v experimentu.

Navážky vzorků jsem provedl na analytických vahách (Obr. 27).

Vzorky jsem připravil ze suchého špalku dubu letního (*Quercus robur*), cca

50letého. Vytvořil jsem štěpky o velikosti cca  $1,5 \times 1$  cm a tloušťce cca 0,5 cm. Celková hmotnost štěpků byla cca 0,5 kg. Toto zásobní množství, jsem rozdělil přibližně na dvě poloviny. Jednu část jsem ožehl propan-butanovým hořákem do kávové barvy (Obr. 28), druhou část opálil do zuhelnatělého povrchu (Obr. 29).



Obr 28 – Fotografie dubových štěpků ožehnutých propan-butanovým hořákem do kávové barvy.



Obr. 29 – Fotografie dubových štěpků opálených do zuhelnatělého povrchu.

Vlastní rozpouštědla byla ethanol ve třech podobách:

- Ethanol (zkušební vzorky A) byla lacinější vodka (bez jakýchkoliv arom. doplňků).
- Ethanol (zkušební vzorky B) byla drahá vodka (též bez jakýchkoliv arom. doplňků).
- Ethanol (zkušební vzorky C) byl laboratorní ethanol absolutní, p.a (per analysis); 99,8%

Vzorek C jsem naředil, dle směšovací rovnice  $V_1 \times C_1 + V_2 \times C_2 = (V_1 + V_2) \times C_3$ , na výslednou koncentraci alkoholu, jakou měly vzorky A a B; tzn. 40% alkohol.

Nutno podotknouti, že všechny 3 vzorky měly potravinářský kolek.

Tabulka 1 Přehled vzorků

A1 navážka 8,2721 g	B1 navážka 8,4469 g	C1 navážka 8,2721 g
A2 navážka 1,6898 g	B2 navážka 1,8100 g	C2 navážka 1,7764 g
A3 navážka 1,5219 g	B3 navážka 1,2427 g	C3 navážka 1,2142 g

Vzorky řady 1 i 2 byly vzorky s použitými dubovými štěpkami kávové barvy (tzn. jen lehce ožehnuté)

Vzorky řady 3 byly vzorky s použitými dubovými štěpkami opálenými do zuhelnatělého povrchu

## 5.2 Vlastní laboratorní proces

Určité navážené množství konkrétně připravených vzorků štěpků jsem postupně převáděl do vymytých baněk. Pak i postupně zaléval odměřeným množstvím (250 ml odměrným válcem) konkrétního alkoholu. Baňky jsem postupně vkládal do předem přehřáté (cca 40°C vodní lázně) vany ultrazvukového čističe (zvýšená teplota = rychlejší průběh reakce). Postupnost v celém procesu jsem volil z důvodu přesnějšího měření času. Každá baňka byla podrobena procesu působení kavitace stejných 20 min. Každých cca 5 min jsem provedl ostré protřepání baňky se záměrem dostatečné aerace.

Jako zajímavé pozorování bych uvedl, že již po zalití štěpků rozpouštědlem (ethanolem) se barva roztoku měnila poměrně rychle v závislosti na použitém rozpouštědle. V baňce kde jsem použil lacinější vodku docházelo výrazně rychleji ke zbarvení. Domnívám se, že je to způsobeno přítomností přiboudlin. Např. methanolem, který se vždy nachází v určitém množství, v destilátech.

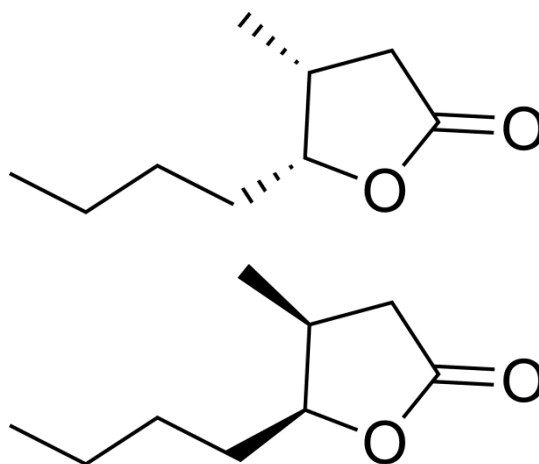
V kvalitní (drahé vodce) nejde extrakce tak dobře, jako u levné vodky. Je asi lépe očištěná od přiboudlin. A už vůbec velmi velmi pomalu jde extrakce v EtOH (p.a). V každém případě dochází ke nesrovnatelně rychlejšímu zbarvení roztoku při použití vzorků řady 3, tzn. silně zuhelnatělý povrch štěpků.

Po spuštění ultrazvukového přístroje se začínají vytvářet pavučinky z kavitačních bublinek. Tyto bublinky se vytvářejí nejen ve vaně, ale i přímo v nádobě, kde je EtOH s dubovými štěpkami. Kavitační bublinky působí na dubové štěpky, tím rozměkčují tento přírodní materiál (štěpky) a dovolují EtOH lépe extrahovat látky, které způsobují typický aromatický zápach/vůně pro tento druh nápoje. Konkrétně se

jedná o látky obsažené v opálených štěpkách: tzn. laktony, aldehydy, fenoly, estery.

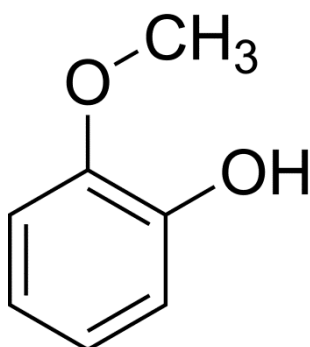
Vzorce látek obsažených v opálených štěpkách:

- Laktony

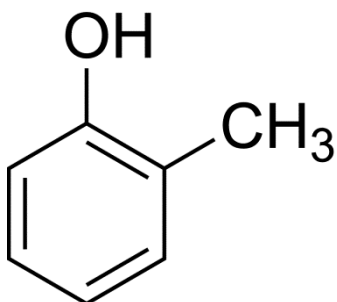


Obr. 30– *cis*-3-methyl-4-oktanolid

- Fenoly

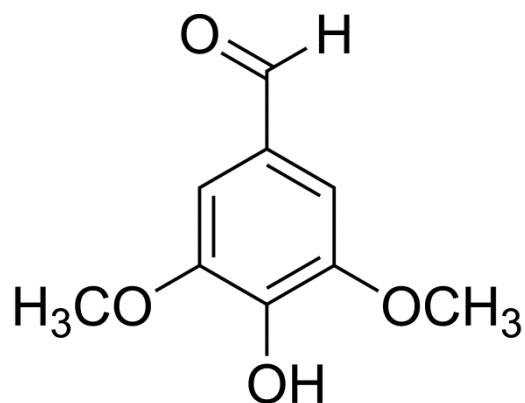


Obr. 31 – guajakol (systematicky 2-methoxyfenol nebo *o*-methoxyfenol)

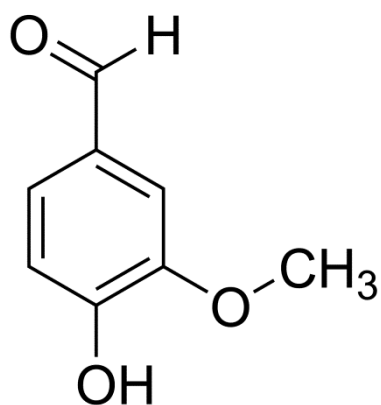


Obr. 32 – *o*-kresol (systematicky 2-methylfenol)

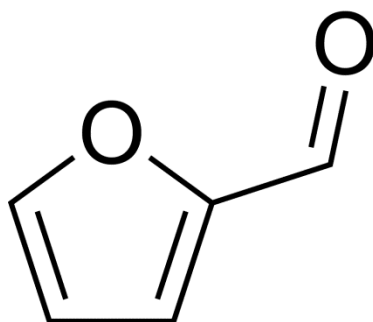
- Aldehydy



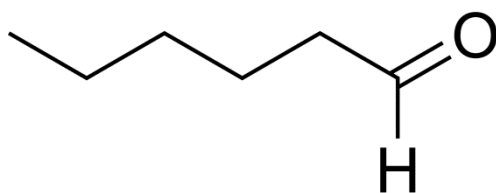
Obr. 33 – systematicky 4-hydroxy-3,5-dimethoxybenzaldehyd



Obr. 34 – vanilin (systematicky 4-hydroxy-3-methoxybenzaldehyd)

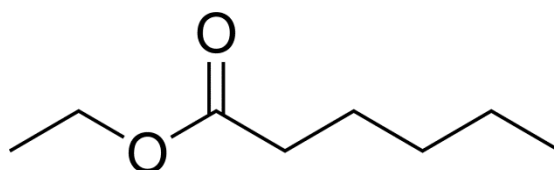


Obr. 35 – furfural (systematicky furan-2-karbaldehyd)

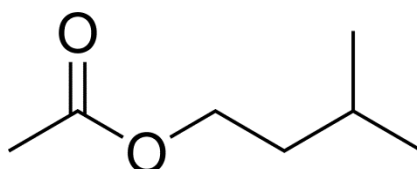


Obr. 36 – hexanal

- Estery



Obr. 37 – ethyl-hexanoát



Obr. 38 – isoamyl-acetát (systematicky 3-methylbutyl-acetát)

Domnívám se, že do whisky přecházejí stovky možná i tisíce různých org. chemických látek, které mění zápach i barvu alkoholu. Tedy nejen ty výše zmíněné.

Udělat kompletní analýzu takové složité směsi je zřejmě nemožné, ale organolepticky to člověk vnímá, i když to není schopen analyticky stanovit.

Při obyčejném procesu výrobu whisky, proniká v průběhu mnoha let, do dubových sudů i kyslík. Kyslík oxiduje aromatické látky v roztoku EtOH. Proto jsem každých 5 minut sytil kyslíkem (aerace) roztok alkoholu s dubovými štěpkami cestou ostrého protřepávání celé baňky. Touto cestou se některé látky v roztoku okysličují a dodávají nápoji chuť staré whisky, tzn. whisky zrající několik mnoho let v sudu.

Organoleptické zkoušky jsem provedl s lidmi (6 lidí, muži i ženy; kuřáci i nekuřáci), kteří nevěděli, jaké procesy byly provedeny s alkoholem.

Z výše uvedených vzorků byl nejčastěji uváděn na prvním místě (tzn. nepříjemnější na chuť i nejvíce se blížíící chuti whisky) vzorek A3.

### 5.3 Závěr experimentu:

Na základě výsledků tohoto experimentu si dovoluji vytvořit předpoklad, který se může s velkou pravděpodobností blížit jistotě. Tzn. že pomocí kavitačních bublinek mohou výrazně urychlit procesy (jinak časově velmi náročné), a to beze změny kvality výsledného produktu.

## 6 DISKUSE

V současné době je při studiu kavitace hlavní pozornost soustředěna na otázku možnosti predikce kavitace a eroze u strojů a mechanismů pro dané materiály a podmínky proudění kapaliny.

Nepochybné vyhlídky otevírá vývoj metod pro získávání materiálů odolnějších proti erozi (jako je chrom-manganová ocel), které kombinují tvrdost a plasticitu. Zřejmě se zde otevírá také velká budoucnost pro plasty, i když jejich možnosti nebyly dostatečně prozkoumány.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat studiu průmyslových odvětví, kde kavitace hraje pozitivní roli a její využití je účelné. Využívání kavitace v čistících procesech a pro výrobu emulzí se rozšiřuje a možná se kavitační metoda stane hlavní v povrchové úpravě mnoha průmyslových výrobků. V tomto ohledu má problém regulace kavitace velký význam. Hydraulická kavitace běží nepravidelně: Ultrazvuková kavitace může být do jisté míry řízena, ale existují i určité výzvy, jako například rovnoměrná distribuce ultrazvukové energie v objemu.

Velmi důležitou (z praktického hlediska) vlastností kapalin je jejich schopnost odolávat vysokým tlakům. Nutnost kvalitního vyčištění kapaliny a její předběžné úpravy tlakem bohužel zatím omezuje použití na laboratorní prostředí.

Taková vlastnost kapalin může najít cenné uplatnění v malých hydraulických obvodech používaných v raketách, protože zde může být kapalina předem upravena. Takové systémy jsou však velmi drahé z důvodu vysokých nákladů na čištění a filtraci.

Na základě studia vlivu akustických parametrů a charakteristik na kavitační procesy bylo potvrzeno, že účinnost všech procesů spojených s kavitačními procesy závisí na akustickém tlaku v kapalině vznikajícím při zhroucení kavitačních bublin a na jejich počtu. Všeobecně je hodnota akustického tlaku určena parametry obsahu plynu a tak i teplota kapaliny má vliv.

Akustický tlak v kapalině ovlivňuje erozivní aktivitu kavitace, která se bude zvyšovat s nižší rozpustností plynu v kapalině.

Studie také ukázaly, že zvýšením hydrostatického tlaku kapaliny je možné významně zvýšit akustický tlak, což umožňuje řídit procesy kavitační eroze.



Dnes se pulzní akce v kavitačním režimu často používá pro velmi dlouhodobý provoz ultrazvukového zařízení. Příkladem je prevence usazenin na stěnách teplosměnných ploch. V některých případech může impulsní akce dokonce zvýšit erozivní účinnost kavitace.

Obecně lze říci, že počet studií o erozi akustické kavitace v průběhu času neustále roste. Tento zájem je na jedné straně spojen se škodlivými účinky způsobenými kavitací v hydraulických strojích a na druhé straně s příznivými účinky při použití akustické kavitace v řadě technologických procesů, například při odstraňování otřepů a vyhlazování ostrých hran na povrchu pevných látek, při získávání materiálů s vysokou disperzí a při ultrazvukovém čištění od povrchových filmů atd. V současné době je obrovské množství prací věnováno využití kavitace pro technologické účely, které mohou mít praktické využití.

V moderních podmínkách umožňuje účinek kavitace na kapalinu získat vysoce kvalitní technologické, potravinářské a biologicky aktivní roztoky extraktů, emulzí a suspenzí (zeleninové a ovocné šťávy, pyré, pasty, majonézy, homogenizované a rekonstituované mléko, jogurty, masti, krémy, systémy obsahující biologicky aktivní látky jako jsou pektin, tanin, aminokyseliny, různé extrakty), vodní a palivové emulze a suspenze, barvy a laky atd.

Kavitace se účinně využívá ke zintenzivnění procesů rozpouštění a extrakce, například pektinu, karotenu, taninu a dalších cenných látek z biomasy. Slouží jako účinný prostředek k získávání vodnouhelných suspenzí a uhelných olejových past. Jako příklad zintenzivnění procesů rozpouštění a extrakce je také prezentovaná experimentální část předkládané práce (část 5), zabývající se přípravou whisky.

Kavitační účinek na ropu a ropné produkty umožňuje zvýšit výtěžek těkavých frakcí během atmosférické destilace; vodní generátory lze použít v procesech čištění od tvorby vodního kamene, různých usazenin a nečistot na vnitřních površích a na těžko přístupných místech technologických zařízení a potrubí. Kavitační úprava vody mění její fyzikální a chemické vlastnosti, zvyšuje pH vody, podporuje její aktivaci.

V průmyslu se pro kavitační působení na kapalinu používají hydrodynamické, elektrodynamické, piezoelektrické, magnetostrikční a mechanické generátory kavitace.

V ultrazvukovém rozsahu jsou nejběžnější piezoelektrické a magnetostrikční generátory kavitace.

Výsledky experimentální studie potvrzují proveditelnost použití technologie ultrazvukového kavitačního čištění k odstranění ztužených a mastných nečistot.

Bylo zjištěno, že kavitační ošetření snižuje pevnost tkaniny podobně jako tradiční čištění bubnu, tj. ne více než 23 % po dobu 30 cyklů zpracování. Současně, na rozdíl od tradičního čištění bubnu, s kavitační technologií není tkanina mechanicky deformována, ale je ve statickém stavu, což umožňuje její použití při zpracování prolamovaných výrobků z tenkých tkanin.

Kavitaci založenou na využití ultrazvukové energie lze využít k intenzifikaci chemických procesů. V případě reakcí v homogenní kapalně fázi by se daly očekávat dva podstatné účinky. Za prvé, vzniklá dutina obsahující páry z kapalného prostředí bude při svém kolapsu měnit své stavové veličiny (podstatné zvýšení teploty a tlaku). To má za následek fragmentaci molekul a vznik reaktivních radikálů (část 2.5). Tyto radikály pak mohou reagovat buď uvnitř kolabující bubliny, nebo po migraci do objemové kapaliny. Za druhé, rychlý kolaps bubliny vede k přívalu kapaliny, která vytvoří v okolní objemové kapalině smykové síly schopné alespoň částečně rozpojit chemické vazby materiálů rozpuštěných v kapalině. Proto při zvažování reakčních podmínek pro kavitační proces jsou významnými faktory volba rozpouštědla a provozní teplota objemové kapaliny (vzhledem k fázovému diagramu daného rozpouštědla). Jakékoli zvýšení tlaku par rozpouštědla snižuje maximální teplotu a tlak při kolapsu bublin. Je pravděpodobně důležité posoudit řídicí mechanismus při intenzifikaci chemických reakcí v kavitačním reaktoru a pak vhodně zvolit provozní parametry. Někdy, když je při zintenzivnění chemické reakce limitujícím krokem pouze přenos hmoty, nemusí být použití kavitačních reaktorů nutné a podobných účinků lze dosáhnout pomocí mechanického míchání. Mechanické účinky kavitační aktivace se uplatní především v heterogenních systémech.

## 7 ZÁVĚR

Předkládaná práce zahrnuje teoretické základy vzniku kavitace a kavitačních procesů, včetně stručné historie objevu kavitace a zájmu o jev kavitace, analyzuje vliv akustických parametrů a fyzikálních vlastností kapaliny na kavitační procesy a v neposlední řadě se zabývá způsoby praktické aplikace účinků kavitace.

Co se týče teoretických základů vzniku kavitace a kavitačních procesů, byla kavitace definována jako generování, následný růst a kolaps dutin uvolňujících velké množství energie na velmi malém místě, což může vést k velmi vysokým hustotám energie. Bylo zdůrazněno, že kavitace probíhá na milionech míst v kapalině současně a vytváří podmínky vysokých teplot a tlaků (tlak několik tisíc atmosfér a teplota několik tisíc kelvinů) lokálně. V práci byly rozlišeny vývojové fáze a typy kavitace, zmíněny negativní a pozitivní projevy kavitace a vysvětleny účinky kavitace k zintenzivnění různých chemických reakcí, z nichž některé by bez působení kavitace ani neproběhly.

Co se týče vlivu akustických parametrů a fyzikálních vlastností kapaliny na kavitační procesy, byly demonstrovány různé modely vývoje velikosti sférické kavity v závislosti na proměnném externím tlaku při působení ultrazvuku v kapalině. Byl zaveden parametr obsahu plynu důležitý pro posouzení účinků kavitace. Na základě analýzy vlivu akustických parametrů a charakteristik na kavitační procesy bylo dedukováno, že účinnost všech procesů provázejících kavitaci závisí na akustickém tlaku v kapalině vznikajícím při zhroucení kavitačních bublin a na jejich počtu. Bylo ukázáno, že obecně je hodnota akustického tlaku určena parametry obsahu plynu a závisí také na teplotě kapaliny.

Co se týče způsobů praktické aplikace účinků kavitace, kavitační reaktory jsou novou a slibnou formou vícefázových reaktorů, založených na principu uvolňování velkého množství energie v důsledku prudkého kolapsu dutin. V předkládané práci je dokumentováno využití kavitačních reaktorů pro různé aplikace v textilním, potravinářském, energetickém a chemickém průmyslu, v oblasti zpracování vody, čištění povrchů a jinde. V předkládané práci je také uveden vlastní experiment jako příklad praktické aplikace účinků kavitace. Tímto vlastním experimentem je příprava whisky s využitím kavitačního působení. Praktický experiment naznačuje, že je možné

urychlit a zintenzivnit proces přípravy whisky pomocí použití běžně dostupné ultrasonické čističky.

Různé studie prokázaly, že k dosažení vysoké účinnosti technologie čištění ultrazvukem kavitace je nutné zajistit přítomnost ultrazvukových vibrací střední a vysoké úrovně intenzity v technologické kavitační komoře, vytvářených ultrazvukovými rezonančními pohony s nízkou a vysokou amplitudou. Za tímto účelem se navrhuje použít ultrazvukový pohon s širokým povrchem vyzařování.

Provedené studie potvrzují zaostřovací schopnost prstencového vibrátoru provádějícího ultrazvukové radiální vibrace. Bylo zjištěno, že použití ultrazvukových pohonů s nožovým transformátorem oscilační rychlosti pro buzení vibrátoru umožňuje nejúčinnější zavedení ultrazvukové energie do vibrátoru při minimálním zkreslení radiální formy vibrací vibrátoru.

Ostřicí vlastnosti takového vibrátoru umožňují dosáhnout vysoké intenzity ultrazvuku, který zajišťuje inaktivaci široké škály mikroorganismů, když kapalina protéká centrální částí vibrátoru.

Celosvětově je patrný směr k vytváření průmyslového ultrazvukového technologického zařízení charakterizovaný vysokou produktivitou a vyznačující se i trvanlivostí vytvářených produktů.

## 8 POUŽITÁ LITERATURA

- ABLAEV A.R., GUMEROV F.M., 2006: Proizvodstvo i primenenie biodizelja: spravočnoe posobie. M.: APK i PPRO (in Russian).
- ADEWUYI Y.G., 2001: Sonochemistry: environmental science and engineering applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40.22: 4681-4715.
- AGRANAT B.A., BAŠKIROV V.I., KITAJGORODSKIJ Ju.I., 1964: Sposob povyšeniya èffektivnosti vozdejstvija ul'trazvuka na processy protekajušie v židkostjah. Ul'trazvukovaja tehnika.–M.: CINTIAM, 3: 28-35. (in Russian)
- AGRANAT B.A., BAŠKIROV V.I., BRONIN, F.A., 1968: Vlijanie statičeskogo davlenija na èffekt sdviga vo vremeni processa zahlopyvanija kavitacionnoj polosti // Tr. VI Vsesojuz. akust. konf. M., Dokl. D12. (in Russian)
- AGRANAT B.A., et al., 1974: Ul'trazvukovaja tehnologija. M.: Metallurgija, 503. (in Russian)
- AGRANAT B.A., et al., 1987: Osnovy fiziki i tehniki ul'trazvuka. M.: Vysšaja škola, 352: 1. (in Russian)
- AKULIČEV V.A., 1968: Pul'sacii kavitacionnyh polostej. Č. IV. Fizika i tehnika mošnego ul'trazvuka. (in Russian)
- ANBAR M., PECHT I., 1964: On the sonochemical formation of hydrogen peroxide in water. *The Journal of Physical Chemistry*, 68.2: 352-355.
- ASNAGHI A., 2015: *Developing computational methods for detailed assessment of cavitation on marine propellers*. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology (Sweden), ISSN 1652-9189.
- BARSUKOV R.V., 2005: Issledovanie processa ul'trazvukovogo vozdejstvija na tehnologičeskie sredy i povyšenie èffektivnosti tehnologičeskich apparatov. dis. kand. tehn. nauk. (in Russian)
- BEBČUK A.S., 1957: K voprosu o kavitacionnom razrušenii tverdyh tel. Akust. ž, 3.1: 90-91. (in Russian)
- ÈPŠTEJN L.A., 1970: Metody teorii razmernostej i podobija v zadačah gidromehaniki sudov. L.: Sudostroenie. (in Russian)
- FEDOTKIN I.M., GULYJ I.S., 2000: Kavitacija, kavitacionnaja tehnika i tehnologija, ih ispol'zovanie v promyšlennosti. Kiev: OKO, 898. (in Russian)
- GAITAN D.F., et al., 1992: Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91.6: 3166-3183.
- GOGATE P.R., et al., 2001: Cavitation reactors: efficiency assessment using a model reaction. *AIChE journal*, 47.11: 2526-2538.
- GONG C., HART D.P., 1998: Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104.5: 2675-2682.
- GORŠKOV A.S., RUSECKIJ A.A., 1962: Kavitacionnye trubny, Sudpromgiz, L. (in Russian)

- GRIŠKO I.A., LUGOVSKOJ A.F., KRIVOŠEEV V.S., 2011: Ul'trazvukovaja protočnaja kavitacionnaja ustanovka dlja povyšeniya èffektivnosti tehnologičeskikh processov. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, 63. (in Russian)
- HART E.J., HENGLEIN A., 1987: Sonochemistry of aqueous solutions: hydrogen-oxygen combustion in cavitation bubbles. *Journal of Physical Chemistry*, 91.13: 3654-3656.
- HENGLEIN A., 1987: Sonochemistry: historical developments and modern aspects. *Ultrasonics*, 25.1: 6-16.
- HENGLEIN A., 1993: Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields. *Advances in Sonochemistry*, 3: 17-83.
- HMELEV V.N., et al., 2007: Ul'trazvukovye mnogofunkcional'nye i specializirovannye apparaty dlja intensivizacii tehnologičeskikh processov v promyšlennosti, sel'skom i domašnem hozjajstve. (in Russian)
- HMELEV, V.N., et al., 2021: Summation of high-frequency Langevin transducers vibrations for increasing of ultrasonic radiator power. *Ultrasonics*, 114: 106413.
- HUA I., HOFFMANN M.R., 1997: Optimization of ultrasonic irradiation as an advanced oxidation technology. *Environmental Science & Technology*, 31.8: 2237-2243.
- JaHNO O.M., LUGOVSKAJA E.A., MOVČANJuK A.V., 2010: Issledovanie vozmožnostej tehnologii ul'trazvukovoj kavitacionnoj očistki èlastičnyh poverhnostej. (in Russian)
- KAMATH V., PROSPERETTI A., EGOLFOPOULOS F.N., 1993: A theoretical study of sonoluminescence. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94.1: 248-260.
- KARDAŠEV G.A., 1990: Fizičeskie metody intensivizacii processov himičeskoj tehnologii. Himija. (in Russian)
- KNÈPP R., 1974: Dejli Dž. Hèmmitt F. Kavitacija.–M.: Mir, 678: 4. (in Russian)
- KUDIMOV Ju.N., KAZUB V.T., GOLOV E.V., 2002: Èlektrozrjadnye processy v židkosti i kinetika èkstragirovanija biologičeski aktivnyh komponentov čast' 1. Udarnye volny i kavitacija. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 8.2. (in Russian)
- LUGOVSKOJ A.F., MOVČANJuK A.V., GRIŠKO I.A., 2008: Ocenka metodov obezzaraživanja vody. Vest. Nac. tehn. un-ta Ukrainy «Kiev. politehn. in-t»: serija «Mašinostroenie, 52: 103-111. (in Russian)
- LUGOVSKOJ A.F., GRIŠKO I.A., 2009: Problemy sozdanija tehnologičeskogo oborudovanija dlja ul'trazvukovogo kavitacionnogo obezzaraživanja vody. Promislova gidravlika i pnevmatika, 4: 26. (in Russian)
- LIN C.J., CHEN K.C., HE J.L., 2006: The cavitation erosion behavior of electroless Ni–P–SiC composite coating. *Wear*, 261.11-12: 1390-1396.
- MASON T.J., LORIMER J.P., 1988: Kinetics and Mechanisms. Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry, 139-182.

- MATSUMOTO Y., TAKEMURA F., 1994: Influence of internal phenomena on gas bubble motion: effects of thermal diffusion, phase change on the gas-liquid interface and mass diffusion between vapor and noncondensable gas in the collapsing phase. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 37.2: 288-296.
- NESTERENKO A.I., BERLIZOV Ju.S., 2007: Vozmožnost' krekinga uglevodorodov pod dejstviem kavitacii. Količestvennaja ènergetičeskaja ocenka. Himija i tehnologija topliv i masel, 6: 43-44. (in Russian)
- PIRSOL I., 1975: Kavitacija. Ripol Klassik. (in Russian)
- PLESSET M.S., 1963: The pulsation method for generating cavitation damage.
- PROHAS'KO L.S., 2009: Primenenie gidrodinamičeskikh kavitacionnyh ustrojstv dlja processov vodoočistki. Meždunarodnaja naučno-praktičeskaja konferencija «Čistaja voda – 2009»: sb. nauč. tr. Kemerovo: KTIPP, S. 460-464. (in Russian)
- PROMTOV M.A., 2001: Pul'sacionnye apparaty rotornogo tipa: teorija i praktika. M.: Mašinstroenie, 260. (in Russian)
- PROMTOV M.A., 2008a: Kavitacionnaja tehnologija ulučšenija kačestva uglevodorodnyh topliv. Himičeskoe i neftegazovoe mašinstroenie, 2: 6-8. (in Russian)
- PROMTOV M.A., 2008b: Perspektivy primenenija kavitacionnyh tehnologij dlja intensivizacii himiko-tehnologičeskikh processov. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 14.4. (in Russian)
- PROMTOV M.A., AKULIN V.V., 2006: Mehanizmy generirovanija tepla v rotornom impul'snom apparate. Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 12.2. (in Russian)
- REYNOLDS O., 1873: The causes of racing of the engines of screw steamers, investigated theoretically and by the experiment-Tr. Inst. Naval Arch. V14 Sc. Papers, 1, 56-57.
- ROZENBERG L.D. (ed.), 1968: Mošnye ul'trazvukovye polja. Nauka. (in Russian)
- ROZENBERG L.D. (ed.), 1970: Fizičeskie osnovy ul'trazvukovoj tehnologii. Nauka. (in Russian)
- ROZENBERG L.D., SIROTJuK M.G., 1959: Ustanovka dlja polučenija fokusirovannogo ul'trazvuka vysokoj intensivnosti. Akust. ž, 5.2: 206-211. (in Russian)
- ROŽDESTVENSKIJ V.V., 1977: Kavitacija. (in Russian)
- SANTA J.F., et al., 2009: Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. *Wear*, 267.1-4: 160-167.
- SCHMITT F.O., JOHNSON C.H., OLSON A.R., 1929: Oxidations promoted by ultrasonic radiation. *Journal of the American Chemical Society*, 51.2: 370-375.
- SIROTJuK M.G., 2008: Akustičeskaja kavitacija. (in Russian)
- SMORODOV E.A., GALIAHMETOV R.N., IL'GAMOV M.A., 2008: Fizika i himija kavitacii. (in Russian)

- SUSLICK K.S., 1988: Ultrasound: its chemical, physical, and biological effects. VCH Publishers.
- SUSLICK K.S., 1990: Sonochemistry. *Science*, 247.4949: 1439-1445.
- ŠESTAKOV S.D., 2001: Osnovy tehnologij kavitacionnoj dezintegracii. M.: Eva-Press, 173: 3. (in Russian)
- ŠESTAKOV S.D., 2010: Mnogopuzyr'kovaja akustičeskaja kavitacija: matematičeskaja model' i fizičeskoe podobie. *Tehničeskaja akustika*, 10.10. (in Russian)
- VINTOVKIN A.A., 2005: Tehnologičeskoe sžiganie i ispol'zovanie topliva. (in Russian)
- VITEN'KO T.N., GUMNICKIJ Ja.M., 2007: Mehanizm aktivirujušego dejstvija gidrodinamičeskoj kavitacii na vodu. *Himija i tehnologija vody*, 29.5: 422-432. (in Russian)
- WEISSLER A., COOPER H.W., SNYDER S., 1950: Chemical effect of ultrasonic waves: oxidation of potassium iodide solution by carbon tetrachloride. *Journal of the American Chemical society*, 72.4: 1769-1775.
- WEISSLER A., 1959: Formation of hydrogen peroxide by ultrasonic waves: free radicals. *Journal of the American Chemical Society*, 81.5: 1077-1081.



## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1– KAVITAČNÍ EROZE NA LOPATKÁCH LODNÍHO ŠROUBU (ASNAGHI, 2015). .....	17
OBR. 2– SCHÉMA KULOVÉ BUBLINY V NEKONEČNĚ ROZLEHLÉ KAPALINĚ.....	25
OBR. 3 – ZÁVISLOST KAVITAČNÍ EROZE VE VODĚ (KROUŽKY) A ETHYLALKOHOLU (KŘÍŽKY) NA KOEFICIENTU ROZPUSTNOSTI PLYNU (SIROTIJUK, 2008).....	31
OBR. 4 – KAVITAČNÍ EROZE JAKO FUNKCE TEPLoty KAPALINY (ZNIČENÝ VZOREK JE MENŠÍ NEŽ VELIKOST KAVITAČNÍ OBLASTI): 1 - OBSAH PLYNU $A \approx 22 \text{ cm}^3/\text{L}$ ; 2 - $A \approx 6,8 \text{ cm}^3/\text{L}$ (SIROTIJUK, 2008). .....	32
OBR. 5 – VYPOČÍTANÉ ZVÝŠENÍ TLAKU V KAVITAČNÍ BUBLINĚ, KDYŽ SE ZHROUTÍ V ODPLYNĚNÉ VODĚ, VE SROVNÁNÍ S TLAKEM V USAZENÉ VODĚ (PŘÍMKA) A POMĚREM STUPNĚ EROZE (BODY) (SIROTIJUK, 2008).....	33
OBR. 6 – KAVITAČNÍ EROZE JAKO FUNKCE TEPLoty KAPALINY (ZNIČENÝ VZOREK JE VĚTŠÍ NEŽ KAVITAČNÍ OBLAST): 1 - VODA; 2 - PETROLEJ; 3 - BENZÍN; 4 - ALKOHOL; 5 - ACETON (SIROTIJUK, 2008).....	33
OBR. 7 – ZÁVISLOST EROZE KAVITACE NA $P_M$ PŘI RŮZNÝCH HYDROSTATICKÝCH TLACÍCH $P_0$ , V MPA (UVEDENO NA KŘIVKÁCH) (SIROTIJUK, 2008). .....	35
OBR. 8 – ZMĚNA VLNOVÉHO ODPORU VODY BĚHEM KAVITACE, V ZÁVISLOSTI NA HYDROSTATICKÉM TLAKU $P_0$ PŘI RŮZNÝCH AMPLITUDÁCH OSCILACE POVRCHU EMITORU $\varepsilon$ : 1 - 6 MM, 2 - 18 MM (SIROTIJUK, 2008). .....	36
OBR. 9 – EROZE OCELI (4340 - NORMA USA) BĚHEM KONTINUÁLNÍ KAVITACE (PLNĚ KŘIVKY) A IMPULZOVÁ KAVITACE (PŘERUŠOVANÉ ČÁRY) ( $T = 12 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ , $T \approx 216 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ ): 1 - VE 3 % ROZTOKU SOLI; 2 - V DESTILOVANÉ VODĚ PŘI PH 8; 3 - V DESTILOVANÉ VODĚ (SIROTIJUK, 2008). .....	38
OBR. 10 – ROZLOŽENÍ VZORKŮ TKANIN V KAVITAČNÍ LÁZNI: 1 - VZOREK TKANINY; 2 - VODA S ROZPUŠTĚNÝM PRACÍM PRÁŠKEM; 3 - RÁM S PEVNÝMI VZORKY TKÁNĚ; 4 - ZDROJ ULTRAZVUKOVÝCH VIBRACÍ; 5 - OBLAST EXPOZICE KAVITAPIONU (JAHNO ET AL., 2010). .....	53
OBR. 11 – ULTRAZVUKOVÁ PŮVLVNNÁ REZONANČNÍ PIEZOELEKTRICKÁ JEDNOTKA S NÍZKOU AMPLITUDOU (JAHNO ET AL., 2010).....	53
OBR. 12 – SCHÉMA TESTOVÁNÍ VZORKŮ TKÁNĚ NA PEVNOST: 1 - ZKUŠEBNÍ VZOREK; 2 - ZACHYCEÁNÍ; 3 - VLNITĚ DESKY ZABRAŇUJÍCÍ POŠKOZENÍ VZORKU (JAHNO ET AL., 2010). .....	54
OBR. 13 – SCHÉMA VZORKŮ CHINTZŮ PO 30 CYKLECH TECHNOLOGICKÉHO ZPRACOVÁNÍ: P - TAŽNÁ SÍLA V TAHU; $\Delta L$ JE PRODLOUŽENÍ VZORKU (JAHNO ET AL., 2010).....	55
OBR. 14 – ZÁVISLOST PEVNOSTI V TAHU VZORKŮ TKÁNÍ NA POČTU CYKLŮ ZPRACOVÁNÍ (ZPRACOVÁNÍ TEXTILIE S TRADIČNÍ TECHNOLOGIÍ ČIŠTĚNÍ V BUBNOVÉM STROJI: 1 KALIKO; 3 - CAMBRIC; 5 - HEDVÁBÍ; 7 - CHINTZ; OŠETŘENÍ TEXTILIE POMOCÍ ULTRAZVUKOVÉ KAVITAČNÍ TECHNOLOGIE: 2 - KALIKO; 4 - CAMBRIC; 6 - HEDVÁBÍ; 8 – CHINTZ (JAHNO ET AL., 2010).....	55
OBR. 15 – STRUKTURA VZORKŮ HRUBÉHO KALIKA: A - PŘED OŠETŘENÍM KAVITACÍ; B - PO KAVITAČNÍM OŠETŘENÍ (JAHNO ET AL., 2010). .....	55
OBR. 16 – STRUKTURA VZORKŮ Z CAMBRIKU: A - PŘED KAVITACÍ; B - PO KAVITAČNÍM OŠETŘENÍ (JAHNO ET AL., 2010). .....	56
OBR. 17 – VZORKY LÝKOVÉ PŘÍZE: A - PŮVODNÍ VZOREK; B - PO 30 CYKLECH ZPRACOVÁNÍ STROJNÍHO BUBNU; C - PO 30 CYKLECH KAVITAČNÍHO OŠETŘENÍ (JAHNO ET AL., 2010). .....	56
OBR. 18 – KAVITAČNÍ OBLAST VYTVOŘENÁ BĚHEM ČINNOSTI ULTRAZVUKOVÉHO EMITORU S NÍZKOU AMPLITUDOU INSTALOVANÉHO NA SPODNÍM POVRCHU KAVITAČNÍ KOMORY (JAHNO ET AL., 2010).....	57
OBR. 19 – KAVITAČNÍ OBLASTI VYTVOŘENÉ ULTRAZVUKOVÝM Pohonem S VYVINUTÝM RADIČNÍM POVRCHEM (JAHNO ET AL., 2010).....	58
OBR. 20 – ULTRAZVUKOVÝ REZONANČNÍ EMITOR Pohonu S VYVINUTÝM RADIČNÍM POVRCHEM (GRIŠKO ET AL., 2011) .....	59
OBR. 21 – JEDNODÍLNÉ A VÍCEDÍLNÉ PRŮTOKOVÉ SILNOSTĚNNÉ KAVITAČNÍ KOMORY (GRIŠKO ET AL., 2011). .....	60
OBR. 22 – TVAR ULTRAZVUKOVÉHO POLE V KAPALINĚ PO EXCITACI RADIČNĚ-OHYBOVÝCH VIBRACÍ (GRIŠKO ET AL., 2011).....	60
OBR. 23 – TVAR ULTRAZVUKOVÉHO POLE VE VÁLCOVÉ KOMOŘE PŘI EXCITACI REŽIMU RADIČNÍCH VIBRACÍ (GRIŠKO ET AL., 2011).....	61
OBR. 24 – EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ PRO STUDIUM ČINNOSTI ULTRAZVUKOVÉHO RO VYŠETŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO TRUBKOVÉHO KAVITÁTORU (GRIŠKO ET AL., 2011). .....	61
OBR. 25 – ZAŘÍZENÍ PRO ÚPRAVU PRŮTOKU ULTRAZVUKOVÉ KAVITACE: 1 - PRSTENCOVÉ ULTRAZVUKOVÉ ZAŘÍZENÍ VYTVAŘEJÍCÍ RYTMICKÉ OSCILACE.; 2 - ULTRAZVUKOVÝ EMITOR; 3 - SACÍ POTRUBÍ; 4 - VÝSTUPNÍ POTRUBÍ; 5 - UTAHOVACÍ KOLÍK; 6 - TĚLO ZAŘÍZENÍ (GRIŠKO ET AL., 2011).....	62
OBR 26 – FOTOGRAFIE ULTRASONICKÉ ČISTIČKY POUŽITÉ V EXPERIMENTU. ....	66
OBR. 27 – FOTOGRAFIE ANALYTICKÝCH VAH POUŽITÝCH V EXPERIMENTU. ....	66
OBR 28 – FOTOGRAFIE DUBOVÝCH ŠTĚPKŮ OŽEHNUÝCH PROPAN-BUTANOVÝM HOŘÁKEM DO KÁVOVÉ BARVY. ....	67

OBR. 29 – FOTOGRAFIE DUBOVÝCH ŠTĚPKŮ OPÁLENÝCH DO ZUHELNATĚLÉHO POVRCHU. ....	67
OBR. 30– <i>CIS</i> -3-METHYL-4-OKTANOLID .....	69
OBR. 31 – GUAJAKOL (SYSTEMATICKY 2-METHOXYFENOL NEBO O-METHOXYFENOL).....	69
OBR. 32 – <i>O</i> -KRESOL (SYSTEMATICKY 2-METHYLFENOL).....	69
OBR. 33 – SYSTEMATICKY 4-HYDROXY-3,5-DIMETHOXYBENZALDEHYD .....	70
OBR. 34 – VANILIN (SYSTEMATICKY 4-HYDROXY-3-METHOXYBENZALDEHYD) .....	70
OBR. 35 – FURFURAL (SYSTEMATICKY FURAN-2-KARBALDEHYD).....	70
OBR. 36 – HEXANAL .....	70
OBR. 37 – ETHYL-HEXANOÁT.....	71
OBR. 38 – ISOAMYL-ACETÁT (SYSTEMATICKY 3-METHYLBUTYL-ACETÁT).....	71

## 10 SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 PŘEHLED VZORKŮ .....	68
--------------------------------	----