



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VZNIK KAVITACE AKCELERACÍ KAPALINY

CAVITATION ONSET BY LIQUID ACCELERATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Mračko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Patrik Mračko**
Studijní program: Strojirenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/2020

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

Vznik kavitace akcelerací kapaliny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitace, tj. náhlé vypaření kapaliny vlivem poklesu tlaku, lze vyvolat urychlením kapaliny až na hodnoty, při kterých lokálně klesá hodnota tlaku na tlak sytých par. Dochází k tomu při proudění v hydraulických strojích nebo v některých zařízeních s úzkými průtočnými kanály (např. ložiskové spáry, Venturiho trubice ap.). Kavítaci lze vyvolat i v klidné kapalině uzavřené v nádobě, pokud bude nádoba dostatečně akcelerována. Po vypaření následuje kondenzace doprovázená velmi rychlým kolapsem kavitačních bublin.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provedení rešerše v oblasti vzniku kavitace akcelerací kapaliny a provedení analýzy možnosti vzniku kavitace akcelerací na základě základních rovnic mechaniky tekutin. Dále bude proveden návrh experimentu a základní vizualizace. Bude navržena možnost využití pro výzkum eliminace patogenních mikroorganismů a chemických reziduí při čištění vody.

Seznam doporučené literatury:

PAN, Zhao, Akihito KIYAMA, Yoshiyuki TAGAWA, David J. DAILY, Scott L. THOMSON, Randy HURD a Tadd T. TRUSCOTT. Cavitation onset caused by acceleration. Proc Natl Acad Sci U S A. 2017, 32(114), 8470-8474.

DAILY, Jesse, Jonathon PENDLEBURY, Ken LANGLEY, Randy HURD, Scott THOMSON a Tadd TRUSCOTT. Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation. Physics of Fluids. 2014, 26.

MANTIČ-LUGO, Vladislav, A CAYRON, P-T BRUN a F GALLAIRE. Beer tapping: dynamics of bubbles after impact. Journal of Physics Conference Series. 2015, 1(656).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/2020

V Brně, dne:

L. S.

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

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

Abstrakt

Hlavným cieľom bakalárskej práce je popis komplexného javu kavitácie spôsobenej akceleráciou a návrh experimentu sústredeného na jeho pozorovanie. Práca pozostáva z dvoch častí. Z teoretickej rešerše, zameranej na základné informácie o kavitácii, jej vzniku a význame. Druhá časť pozostáva z návrhu experimentálneho pozorovania kavitácie za pomoci vysokorýchlostnej kamery, vyhodnotenia vzniknutých problémov a ich riešenia. Na záver je navrhnutá možnosť využitia pre výskum čistenia odpadových vôd.

Kľúčové slová:

kavitácia, akcelerácia, dutina, kolaps, podtlak, experiment, pozorovanie, výskum

Abstract

The main goal of bachelor's thesis is description of complex phenomenon of cavitation caused by acceleration and design of experiment focusing on its observation. Thesis consist of two parts. Theoretic research focusing on basic information about cavitation, its formation and significance. Second part is design of experimental observation with help of high-speed camera, evaluation of possible complications which may occur and their solution. Conclusion proposes possible application for research in area of wastewater treatment.

Keywords

cavitation, acceleration, cavity, collapse, vaccum, experiment, observation, research

Bibliografická citácia

MRAČKO, Patrik. *Vznik kavitace akcelerací kapaliny* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125080>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

Čestné prehlásenie autora

Čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne a použil iba literatúru, ktorú som uviedol v zozname.

V Brne dňa:

.....

Patrik Mračko

Pod'akovanie

Rád by som sa touto cestou poďakoval doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za vytvorenie zaujímavej témy bakalárskej práce a za pomoc pri jej vypracovaní. Taktiež by som chcel poďakovať Ing. Martinu Hudcovi za jeho pomoc s laboratórnym pozorovaním.

Obsah

1 Úvod	9
2 Kavitácia	10
2.1 História výskumu kavitácie	10
2.2 Kavitačná oblasť	11
2.3 Druhy vzniku kavitácie.....	11
2.4 Kavitačné jadro	12
2.5 Rast kavitačnej bubliny a vývoj kavitácie	13
2.6 Luminiscentné a tepelné javy v kavitácii	13
2.7 Negatívne účinky kavitácie.....	14
2.8 Praktické využitie kavitácie	16
3 Kavitácia spôsobená akceleráciou kvapaliny	17
3.1 Priebeh a výskyt	17
3.2 Teoretické vysvetlenie.....	17
3.3 Vhodná definícia kavitačného čísla	19
3.4 Deštruktívne účinky	21
4 Experimentálne pozorovanie kavitácie vyvolanej akceleráciou	22
4.1 Návrh experimentu	22
4.2 Použitá meracia technika	25
4.3 Postup merania a možné problémy	25
4.4 Optimalizácia experimentu	28
5 Uplatnenie pre praktický výskum.....	30
5.1 Štandardný proces čistenia odpadových vôd	30
5.2 Možnosti využitia kavitácie	30
5.3 Využitie kavitácie spôsobenej akceleráciou pre výskum	31
6 Záver	32
7 Zoznam použitých zdrojov	33
8 Zoznam použitých symbolov	35

1 Úvod

Kavitácia je zložitý fyzikálny jav prepojený s prudkými zmenami tlaku v kvapaline. V bežnej praxi je kavitácia považovaná za nepriaznivý dej, pretože spôsobuje zníženie účinnosti a opotrebenie hydraulických strojov. Z tohto dôvodu sa snažíme kavitácii väčšinou zabrániť, alebo aspoň zmierniť jej následky. Existuje avšak aj úžitkové využitie kavitácie, predovšetkým v biologickom a chemickom čistení.

Vznik kavitácie môže byť podnietený rôznymi spôsobmi. Jedným z nich je aj akcelerácia pri náhlom spomalení, alebo uvedení kvapaliny do pohybu. A práve takto vzniknutá kavitácia je hlavnou témou tejto bakalárskej práce. Práca pozostáva z teoretického popisu kavitačného javu, návrhu experimentálneho pozorovania kavitácie spôsobenej akceleráciou a popisu využitia podobného experimentu pre praktický výskum.

2 Kavitácia

Názov kavitácia popisuje jav, pri ktorom dochádza k vzniku a následnému zániku vzduchových dutín v prúdiacej kvapaline. Kavítácia vzniká pri znížení tlaku v kvapaline na úroveň tlaku nasýtených pár pre danú teplotu. Dochádza k náhlemu vyparovaniu kvapaliny, čo vedie k tvorbe a následnému rastu kavitačných bublín. V prúdiacej kvapaline sú kavitačné bubliny unášané v smere prúdu. Po prechode do oblasti s vyšším tlakom, dochádza ku kondenzácii pary vo vnútri bublín a vytvoreniu kavitačných dutín. Do týchto dutín veľkou rýchlosťou vniká okolitá kvapalina. Zaplnením bubliny dochádza k veľkým rázom a kolapsu dutiny. V prípade, že ku kolapsu došlo na povrchu pevného materiálu, dochádza k jeho namáhaniu, prípadne poškodeniu. Takto vzniknuté opotrebenie materiálu sa nazýva kavitačné napadnutie alebo rozrušenie. [1]

2.1 História výskumu kavítácie

Prvé zmienky o problémoch spôsobených kavítáciou sa vyskytli už v roku 1894 pri testovaní anglického torpédoborca Daring. Kavítácia spôsobila, že torpédoborec nedosahoval predpokladanú rýchlosť a na povrchu lodnej skrutky došlo k poškodeniu. Samotný kavitačný jav bol v literatúre prvýkrát popísaný S.W.Barnabym v roku 1895. V svojej práci pripisuje pokles výkonu lodných skrutiek tvorbe bublín naplnených vodnou parou. Pri nízkych otáčkach skrutka pracuje bez problémov, ale pri zvýšení otáčok dochádza k zníženiu jeho ťažnej sily a výkonu. Taktiež po pomerne krátkom čase dochádza k značnému poškodeniu povrchovej vrstvy lopatiek.

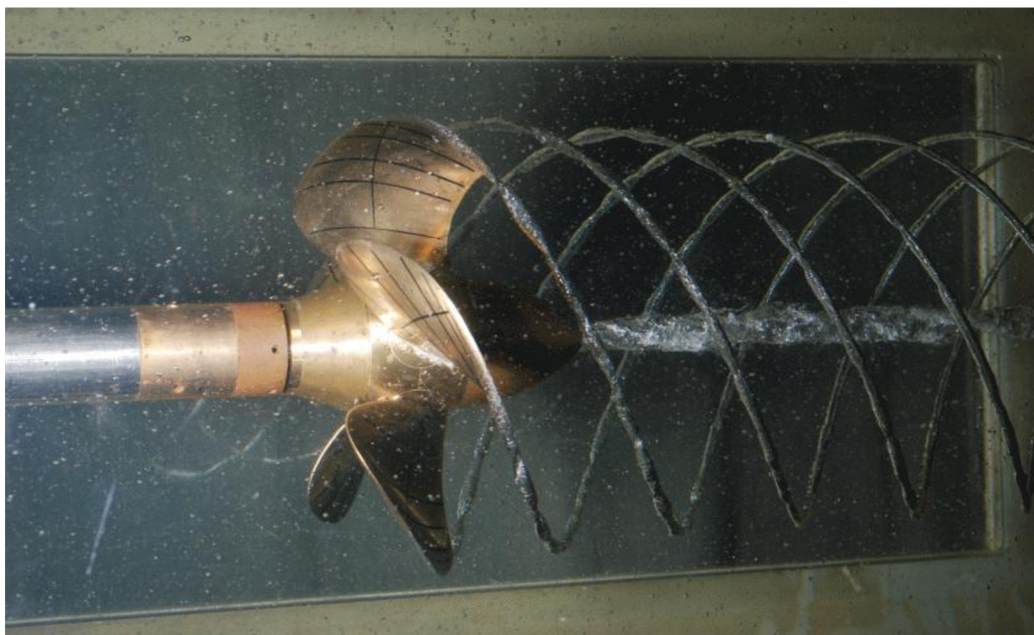
Problém kavítácie bolo potrebné vyriešiť z dôvodu zavedenia rýchlobežných vodných turbín do praxe. Snaha o modernizáciu bola hlavným podnetom k štúdiu a presnejšiemu výskumu kavítácie. Experimenty s kavítáciou boli zo začiatku sústredené prevažne na podmienky jej vzniku a možnú prevenciu. Kavítáciu je pri laboratórnych podmienkach najjednoduchšie možné vyvolať v tryskách. O.Reynolds uskutočnil experiment s kavítáciou v priehľadnej tryske v roku 1901. Pozoroval pri ňom, že v najužšom mieste trysky dochádza k vzniku bublín vodnej pary, ktoré následne v širšej časti mizli (*obr. 2.1*). Z tohto experimentu bolo jasne dokázateľné prepojenie medzi poklesom tlaku a vznikom kavítácie. Výskum sa v neskorších rokoch sústredil na presnejší popis kavítácie a jej vplyvu na chod hydraulických strojov. [1]



Obr. 2.1 Kavítácia v priehľadnej venturiho trubici [2]

2.2 Kavitačná oblasť

Časť prúdiacej kvapaliny, ktorá je vyplnená kavitačnými bublinami sa nazýva kavitačná oblasť. Kavitačné oblasti môžeme rozdeliť podľa ich tvaru, miesta výskytu a stálosti. Podľa tvaru rozlišujeme oblasti kapsovité, kde kavitačné bubliny vyplňujú určitý priestor alebo vláknové, kde kavitačné bubliny tvoria spojitý reťazec v tvare vlákna (*obr. 2.2*). Kapsovité kavitačné oblasti vznikajú prevažne v tryskách, potrubiach a na lopatkách vodných strojov. Vláknová kavitačná oblasť, nazývaná tiež spárová kavitácia, vzniká na konci lopatiek vodných turbín alebo lodných skrutičiek. [1]



Obr. 2.2 Vláknová kavitácia vytvorená na konci lopatiek lodnej skrutičky [3]

Podľa miesta výskytu môže byť kavitácia vo vnútri prúdu kvapaliny alebo v jeho blízkosti, prípadne na obtekanej ploche. Kavitácia vzniknutá na obtekanej ploche sa taktiež nazýva plošná kavitácia. Je spôsobená znížením tlaku pri obtekaní povrchu, ako napríklad v prípade lopatiek vodných čerpadiel, alebo turbín. Z hľadiska stálosti môžeme povedať, že každá kavitačná oblasť je nestála, pretože v nej neustále dochádza k opakovanému vzniku a zániku kavitačných bublín. V určitých prípadoch je možné pozorovať pravidelnosť výskytu bublín a aj kavitačná oblasť ako celok sa mení len minimálne. V takomto prípade hovoríme o ustálenej kavitácii. Za ustálenú považujeme napríklad plošnú kavitáciu. [1]

Kavitačná oblasť môže vzniknúť aj odtrhnutím prúdu od obtekaného povrchu. Takto vytvorená kavitácia má rovnaký tvar ako kapsovité, ale je nestála. Príčinou jej vzniku je vírenie medzi hlavným prúdom kvapaliny a obtekaným povrchom. [1]

2.3 Druhy vzniku kavitácie

Vznik kavitácie je úzko prepojený s náhlym poklesom tlaku v kvapaline. Spôsob akým dôjde ku poklesu tlaku sa môže v rôznych prípadoch líšiť. Podľa príčiny zníženia tlaku rozdeľujeme kavitáciu na tri druhy: hydrodynamická, akustická a kavitácia spôsobená akceleráciou.

Hydrodynamická kavitácia je najčastejším sa vyskytujúcim druhom kavitácie v technickej praxi. Môžeme sa s ňou stretnúť v podstate všade kde dochádza k prúdeniu kvapaliny, napríklad v potrubiach, čerpadlách, turbínach atď. Príčina poklesu tlaku sa dá pomerne jednoducho vysvetliť pomocou zjednodušenej Bernoulliho rovnice. Za predpokladu, že sa jedná o ideálnu kvapalinu pri stacionárnom prúdení, kde nedochádza k zmene potenciálnej energie a

pri zanedbaní strát, dostáva Bernoulliho rovnica tvar (2.1).

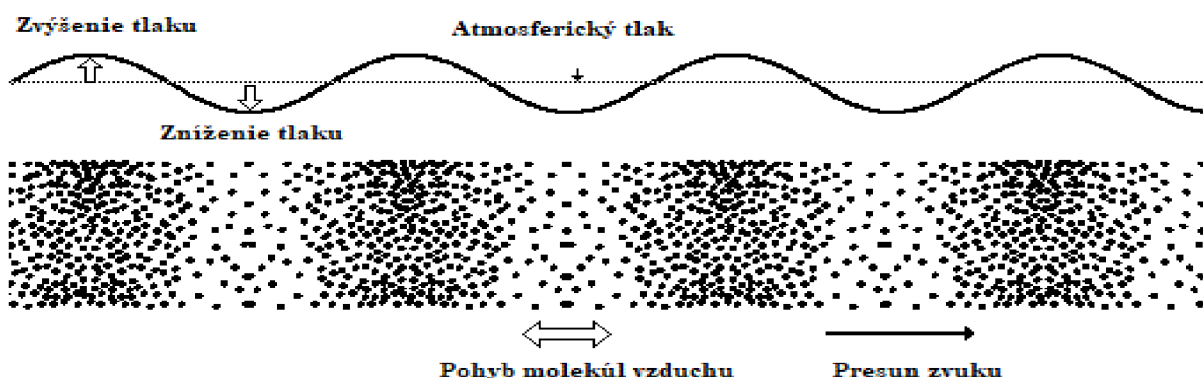
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (2.1)$$

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst \quad (2.2)$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (2.3)$$

Potom ak platí (2.2), tak musí platiť, že zo zvyšujúcou sa rýchlosťou dochádza ku zníženiu tlaku. Dôsledkom tejto závislosti tlaku na rýchlosti je vznik kavitácie v hydraulických strojoch, v ktorých dochádza k náhlemu zrýchleniu kvapaliny. Z rovnice kontinuity (2.3) vyplýva, že pri zmenšení prierezu ktorým preteká tok kvapaliny, dochádza ku zvýšeniu jeho rýchlosti. Z tohto dôvodu sa hydrodynamická kavitácia často objavuje v zúžených miestach potrubia alebo v mieste z ventilom. [1,4]

Ďalším druhom je akustická kavitácia, pri ktorej je vznik bublín podnietený zvukovým pôsobením. Zvuk sa šíri v kvapaline rovnako ako aj vo vzduchu, pomocou pozdĺžneho vlnenia molekúl a častíc. Dôsledkom toho vznikajú v priestore, ktorým sa šíri zvuk, miesta s väčšou a miesta s menšou hustotou molekúl (*obr. 2.3*). Rozloženie týchto miest sa periodicky opakuje a spolu so zmenou hustoty je prepojená aj zmena tlaku na jednotlivých miestach. V mieste kde dôjde k zníženiu hustoty, sa taktiež zníži aj tlak. A naopak v mieste so zvýšenou hustotou, sa tlak zvýši. V prípade, že je zvukové pôsobenie dostatočne silné, tak tlak kvapaliny v mieste zápornej amplitúdy môže klesnúť až na úroveň sýtych pár. Akustická kavitácia je často vyvolávaná úmyselne za použitia ultrazvukových prístrojov. Moderné špecializované prístroje dokážu presne ovládať miesto vzniku, ale aj veľkosť kavitáčnych bublín. Takto vzniknutú kavitáciu je možné využiť na množstvo rozličných účelov. [1,4]



Obr. 2.3 Pozdĺžne vlnenie molekúl vzduchu pri prenose zvuku (upravené podľa[5])

Posledným druhom je kavitácia spôsobená akceleráciou kvapaliny. Tento druh je priemyselne najmenej vyskytovaný a aj najmenej využívaný. Práve na tento druh kavitácie je zameraná táto bakalárska práca a s ňou spojený experiment, z tohto dôvodu je podrobnejšie rozobraná v neskoršej kapitole.

2.4 Kavitačné jadro

Pre vznik kavitáčnych bublín je nutné, aby došlo k prerušeniu spojitosti medzi molekulami kvapaliny. Molekuly sú k sebe navzájom priťahované pomerne značnými silami. Veľkosť týchto síl a napätie potrebné na ich prerušenie vyjadruje ťahová pevnosť kvapaliny. Táto veličina je experimentálne zisťovaná roztrhnutím stĺpca kvapaliny v trubici počas rotačného pohybu. Ťahová pevnosť dokonale homogénnej kvapaliny môže teoreticky dosiahnuť hodnoty až 10^9 N/m².

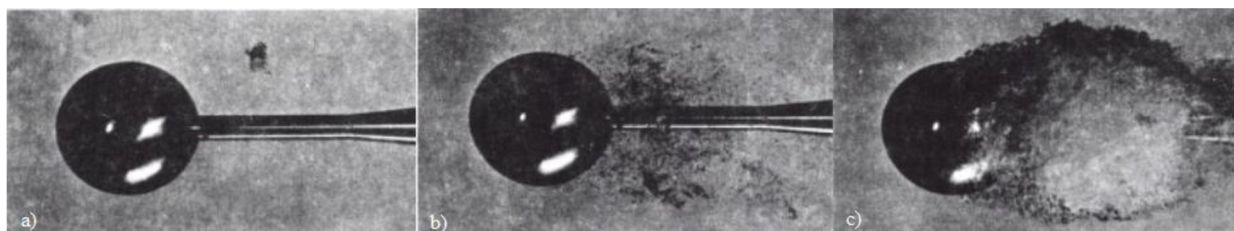
V skutočnosti ale žiadna kvapalina nie je úplne homogénna. Ak by ale dokonale homogénna kvapalina existovala aj v skutočnosti, tak by v nej nemohla vzniknúť kavitácia, pretože by bola schopná preniesť napätie vytvorené poklesom tlaku pod tlak nasýtených pár. [1]

Každá kvapalina obsahuje rozpustené alebo nerozpustené plyny a nespočetné množstvo mikroskopických častíc. Tieto elementy môžu narušovať spojitosť medzi molekulovými vrstvami a tak znižovať celkovú pevnosť kvapaliny. Rozpustené plyny a pevné častice, ktoré majú s kvapalinou dobrú zmäčavosť, ovplyvnia pevnosť kvapaliny iba minimálne. [1]

Najväčší podiel na narušení homogenity kvapaliny majú bublinky nerozpustených plynov a pevné častice zo zlou zmäčavosťou. Pôsobia v kvapaline ako zárodoky kavitácie, taktiež známe ako jadrá kavitácie. Majú pri kavitácii podobný význam ako kryštalizačné zárodoky pri kryštalizácii. Za určitých podmienok dosiahne kavitačné jadro kritickú veľkosť, čo vedie k jeho rastu až na veľkosť pozorovateľnú voľným okom, kedy ho už považujeme za kavitačnú bublinu. [1]

2.5 Rast kavitačnej bubliny a vývoj kavitácie

V kvapaline obsahujúcej kavitačné jadrá dochádza k ich rastu pôsobením zníženého tlaku. Pričom kavitačné jadrá rovnakých veľkostí expandujú súčasne. Najskôr sa pri malom poklese pod tlak nasýtených pár vytvára počiatková kavitácia. Má charakter neustálenej kavitačnej oblasti s malými tlakovými pulzáciami. Po ďalšom znížení tlaku sa kavitačná oblasť zväčší a ustáli. Keď je kavitácia natoľko veľká, že môže ovplyvňovať energetické parametre hydraulických strojov, hovoríme o plne vyvinutej kavitácii. Čiastočne vyvinutá kavitácia popisuje stav medzi počiatkom kavitácie a plne vyvinutou kavitáciou. [1]



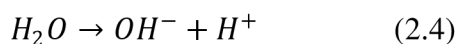
Obr. 2.4 Postupný vývin kavitácie: a) počiatok kavitácie, b) čiastočne vyvinutá kavitácia, c) plne vyvinutá kavitácia (upravené podľa [1])

Rast kavitačnej bubliny môže byť uskutočnený pomerne pomalou difúziou plynu rozpusteného v kvapaline, alebo prudkým zväčšením podobným malej explózií. Pomalý rast spôsobený difúziou plynu, najčastejšie vzduchu, sa nazýva plynová alebo vzduchová kavitácia. Pri rýchlej, takmer okamžitej expanzii, sa bublina naplní prevažne parou, preto sa tento dej nazýva parná kavitácia. Za bežných podmienok je kavitačný jav vytvorený pôsobením oboch druhov kavitácie. [1]

2.6 Luminiscentné a tepelné javy v kavitácii

Pri zániku kavitačnej bubliny je možné za určitých okolností sledovať svetelné záblesky. Existuje niekoľko teoretických vysvetlení tohto javu.

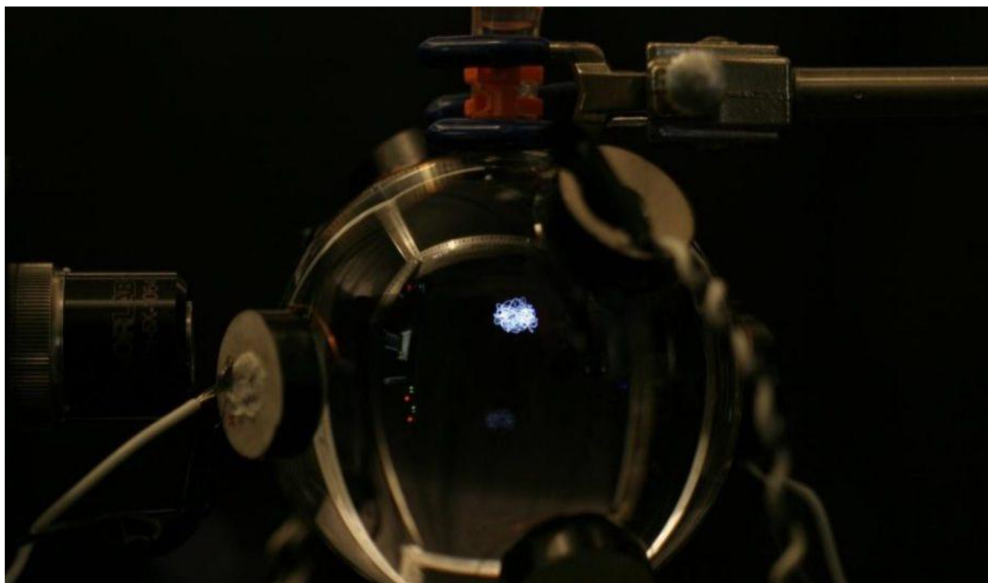
Podľa jednej teórie je vzduch vo vnútri bubliny počas kolapsu stlačený, čo spôsobuje zvýšenie teploty až na 10^4 K, na veľmi krátky okamih. Pri kavitácii vytvorenej ultrazvukom bolo prevedené experimentálne pozorovanie pomocou spektroskopu, v ktorom bolo zistené že spektrum kavitačnej luminiscencie odpovedá teplote približne 5000 K. Vo vode po kavitácii bola zistená prítomnosť peroxidu vodíku. To naznačuje, že pri extrémne zvýšenej teplote počas kavitácie dochádza k rozpadu molekúl vody na hydroxidový anión a vodíkový kation (2.4).



Takto vzniknuté ióny sú nestabilné a veľmi rýchlo dochádza k ich rekombinácii a vytvoreniu peroxidu vodíku (2.5). [6]

Ďalším možným vysvetlením je, že záblesky sú spôsobené elektrickými výbojmi. Podľa tohto predpokladu elektrické náboje vznikajú z iónov rozpustených látok, ktoré sa usadzujú na povrchu vznikajúcej bubliny. [7]

Luminiscencia môže byť teoreticky spôsobená aj rázom plynových molekúl pri kolapse bubliny. K tomu môže dôjsť, ak zánik kavitačnej bubliny dosiahne kritickú rýchlosť plynu. [1]

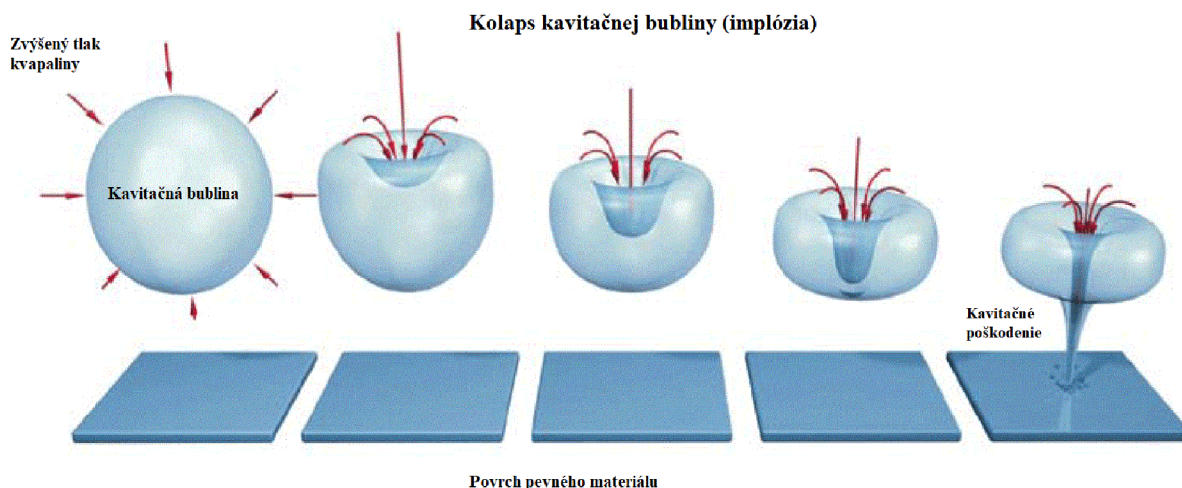


Obr. 2.5 Luminiscencia vytvorená kavitáciou ultrazvukom v kyseline sírovej. Pre lepšie zviditeľnenie bola fotka zhotovená za použitia dlhej expozície.[8]

2.7 Negatívne účinky kavitácie

Kavitácia je v technickej praxi považovaná za nepriaznivý dej. Znižuje účinnosť a prietok v hydraulických strojoch a potrubiach. Ale hlavným negatívom je poškodenie povrchu materiálu spôsobené kavitáciou, ktoré vzniká napríklad na lopatkách vodných turbín, lodných skrutiek, vo vodných čerpadlách alebo na stenách potrubia.

Zvýšením tlaku dochádza v kavitačnej bubline ku kondenzácii pary a vzniká dutina s veľmi nízkym tlakom, blížiacim sa vákuu. Následne do kavitačnej dutiny vniká okolitá kvapalina, ktorá je po zaplnení dutiny zastavená rázom. V prípade, že kavitačná dutina bola na povrchu obtekaného materiálu, sa vnikajúca kvapalina zastaví rázom na materiál (Obr.2.6). Veľkosť rázu vytvoreného pri zániku kavitačnej bubliny je závislá od veľkosti dutiny, druhu kvapaliny, teploty a ďalších činiteľoch. Ráz kvapaliny spôsobuje značné mechanické namáhanie materiálu, ktoré vedie k jeho opotrebeniu. Kavitačné rozrušenie vzniká na mieste zániku kavitačných bublín, čiže na konci kavitačnej oblasti. Prejavuje sa tvorbou trhlin a mikroskopických jamiek. Pokročilé kavitačné rozrušenie spôsobuje vydrobovanie materiálu a povrch nadobúda hubovitý tvar. [1,9]



Obr. 2.6 Kolaps kavitačnej bubliny v blízkosti pevného povrchu (upravené podľa[10])

Pri kavitácii nie je materiál namáhaný iba mechanický, ale aj tepelne. Po prechode do oblasti vyššieho tlaku kavitačná bublina niekoľkokrát opakovane zanikne a znova vznikne, predtým než sa úplne rozpadne. Periodický vznik a zánik kavitačnej bubliny prebieha vo veľmi krátkom časovom intervale, rádovo niekoľko mikrosekúnd. Pritom platí, že zánik kavitačnej bubliny je nepomerne rýchlejší, ako jej vznik. Pri každom opätovnom vzniku má bublina čoraz menší a menší polomer. Počas tohto deju je z kavitačnej bubliny odvádzané teplo do okolitej kvapaliny, prípadne materiálu. Teplo sa v kavitačnej bubline uvoľňuje ako produkt viacerých procesov, napríklad stlačovanie plynov, kondenzácia pár, rozpúšťanie vzduchu v kvapaline, trenie kvapaliny atď. Takto uvoľnené teplo v blízkosti materiálu môže spôsobiť tepelné opotrebenie povrchu a elektrochemickú koróziu(obr. 2.7). [1,9]

Veľkosť kavitačného rozrušenia sa určuje podľa úbytku materiálu. Z laboratórnych pokusov, je možné povedať, že k úbytku materiálu nedochádza hneď po vystavení materiálu kavitácii. Existuje časový interval, počas ktorého je úbytok materiálu nulový alebo iba minimálny. Nazýva sa inkubačná doba. Počas inkubačnej doby dochádza k deformačnému spevňovaniu, posuvom a sklzom v mriežke materiálu. Dĺžka inkubačnej doby je odlišná pre rôzne materiály. Inkubačná doba slúži ako hodnotiaci parameter pri porovnávaní kavitačnej odolnosti materiálov. [1]



Obr. 2.7 Poškodenie spôsobené kavitáciou na obežnom kolese vodnej pumpy[11]

2.8 Praktické využitie kavitácie

Aj napriek svojmu nestabilnému charakteru a deštruktívnym vlastnostiam má kavitácia veľkú škálu využití v priemysle, medicíne ale aj kozmetike. Najčastejšie sa využíva pre svoju schopnosť ničiť anorganický alebo organický materiál.

Jedno z možných využití je odstránenie povrchových usadenín a korózie zo zariadení, ktoré sú dlhodobo ponorené pod vodnou hladinou. Čistenie je prevedené koncentrovaným prúdom kavitačných bublín, ktorý je spomalený nárazom na čistený materiál, Následný zánik kavitačných bublín má za účinok rozrušenie nečistôt a nežiaducich oxidov na povrchu. [12]

Kavitácia sa taktiež využíva na čistenie odpadových vôd. Podmienky vznikajúce pri kolapse kavitačných bublín sú schopné zapríčiniť rozpad organických a anorganických látok. Mnohé z týchto látok sú toxické alebo inak problematicky odstrániteľné. Jedná sa o ťažko rozložiteľné zložky liečiv, odpadové látky chemickej výroby, niektoré pesticídy a polyméry. Kavitácia dokáže spôsobiť rozpad molekúl týchto látok a ich postupnú degradáciu. V iných prípadoch môže byť kavitácia použitá ako katalyzátor chemických reakcií látok, ktoré sú za bežných podmienok málo reaktívne, alebo spolu nereagujú vôbec. [13,14]

Ďalším využitím kavitácie, je napríklad aj dezinfekcia. Za týmto účelom sa využíva v medicíne. Lekárske nástroje sú ponorené do roztoku izopropylalkoholu, v ktorom je ultrazvukom vyvolaná kavitácia. Táto metóda dezinfekcie je rýchla a pomerne šetrná k nástrojom. Medicínsky význam kavitácie nekončí pri dezinfekcii, využíva sa taktiež pri odstraňovaní zubného kameňa a má svoj podiel aj na odstraňovaní obličkových kameňov ultrazvukovou metódou (Lithotripsia). [14,15]

Kavitácia vyvolaná ultrazvukom sa taktiež používa na mletie keramických materiálov. Počas tzv. mokrého mletia je zmes vody a keramickej drvininy vystavená kavitácii v mlecej komore. Dochádza k rozpadu keramických zrníek a postupnému zjemneniu zmesi. V porovnaní z mechanickým mletím sú potrebné oveľa menšie a energeticky úspornejšie prístroje. [16]

V kozmetike sa kavitácia využíva na neinvazívnu liposukciu, kde spôsobuje rozrušovanie podkožného tuku.

3 Kavítacia spôsobená akceleráciou kvapaliny

Kavítacia nemusí vznikáť výhradne v prúdiacej kvapaline. Pokles tlaku dostatočne veľký na spustenie kavítacie, môže byť vyvolaný aj náhlou zmenou rýchlosti neprúdiacej kvapaliny.

3.1 Priebeh a výskyt



Obr. 3.1 Kavitačné bubliny vzniknuté v sklenenej nádobe po náraze[17]

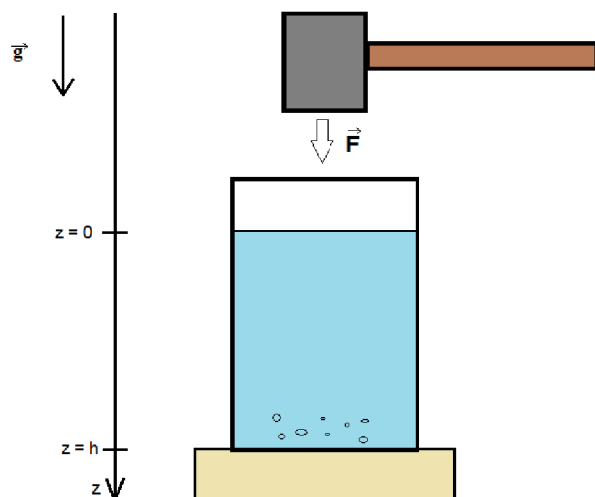
Najjednoduchším príkladom takto vzniknutej kavítacie, je nádoba naplnená kvapalinou voľne držaná v priestore. Keď na vrh nádoby pôsobí náhly silový impulz, napríklad úder rukou, dôjde k veľmi prudkému uvedeniu kvapaliny do pohybu. To spôsobí náhly pokles tlaku v spodnej časti nádoby a vytvorenie kavitačných bublín. Pri následnom spomalení nádoby dochádza k vyrovnaniu tlaku a rýchlemu kolapsu kavitačných bublín. V prípade, že nádoba nie je vyrobená z odolného materiálu a vzniknuté kavitačné bubliny sú dostatočne veľké, tak pri ich zániku môže dôjsť k rozbitiu nádoby.[18,19]

K vzniku kavítacie akceleráciou môže dôjsť aj vo vnútri ľudského tela, predovšetkým v mozgovej tekutine. Ľudská lebka je v podstate uzatvorená nádoba naplnená kvapalinou, v ktorej je uložený mozog. Ak dôjde k náhlejšiemu zrýchleniu, buď silovým impulzom pri údere alebo prudkým spomalením, v lebke vznikajú kavitačné bubliny. Zánik týchto bublín môže spôsobiť poškodenie mozgového tkaniva. Z tohto dôvodu je kavítacia nebezpečná pri zraneniach hlavy, prevažne pri autonehodách ale aj športoch (americký futbal, box atd.).[14]

3.2 Teoretické vysvetlenie

Zmena tlaku v kvapaline pri akcelerácii sa dá matematicky vyjadriť na základe Navier-Stokesovej rovnice (3.1). Odvodenie je riešené pre typovú situáciu s kvapalinou v nádobe, na ktorú pôsobí silový impulz. Silový impulz je vytvorený úderom tupým predmetom v smere gravitačného zrýchlenia.

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \operatorname{grad} \vec{v} = -\operatorname{grad} p + \rho \vec{g} + \mu \Delta \vec{v} \quad (3.1)$$



Obr. 3.2 Schéma typovej situácie použitej pre odvodenie vzorcov (upravené podľa [18])

Za predpokladu že sa kvapalina po náraze pohybuje ako jeden celok, dochádza v nej iba k minimálnemu alebo nulovému prúdeniu. To znamená, že v Navier-Stokesovej rovnici je možné zanedbať konvektívne zrýchlenie a viskózne účinky, takže dostáva tvar (3.2). [18]

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\text{grad } p + \rho \vec{g} \quad (3.2)$$

Pretože v danom prípade všetky dôležité sily a zrýchlenia pôsobia iba v jednej ose (osa rovnobežná s vektorom gravitačného zrýchlenia), je možné danú situáciu riešiť ako jednorozmerný problém (3.3).

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \quad (3.3)$$

Po zintegrování podľa zvislej osi z vznikne rovnica s tvarom (3.5). Kde c je integračná konštanta, ktorá v danom prípade odpovedá tlaku na povrchu kvapaliny p_0 (3.6).

$$\int \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} dz = \int -\frac{\partial p}{\partial z} dz + \int \rho g dz \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} z = -p + \rho g z + c \quad (3.5)$$

$$\text{pre } z = 0 : \quad c = p_0 \quad (3.6)$$

Po vyjadrení tlaku v kvapaline, vzniká finálny výraz (3.7). V danej situácii veličina z popisuje hĺbku ľubovoľného miesta v kvapaline a preto je ďalej značená ako h . (3.8) [18]

$$p(z, t) = p_0 - \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} z + \rho g z \quad (3.7)$$

$$p(h, t) = p_0 - \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} h + \rho g h \quad (3.8)$$

Význam jednotlivých členov rovnice:

$p(h, t)$	→	tlak v kvapaline vyjadrený ako funkcia hĺbky a času
p_0	→	referenčná hodnota tlaku na hladine kvapaliny
$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} h$	→	zmena tlaku v kvapaline spôsobená zrýchlením
$\rho g h$	→	hydrostatický tlak

Z výslednej rovnice je možné určiť časovú zmenu tlaku v ľubovoľnom mieste kvapaliny. Na základe rovnice (3.8) je možné taktiež prehlásiť, že tlak $p(h, t)$ v kvapaline je lineárne závislý na hĺbke h a zrýchlení $\frac{\partial v_z}{\partial t}$. [18]

Z rovnice (3.8) je možné jednoduchou úpravou vyjadriť ako neznámu zrýchlenie $\frac{\partial v_z}{\partial t}$, ďalej značené už iba ako a .

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = a \quad (3.9)$$

Po odvodení bude mať výsledná rovnica pre zrýchlenie tvar (3.12).

$$p = p_0 - \rho a h + \rho g h \quad (3.10)$$

$$\rho h(a - g) = p_0 - p \quad (3.11)$$

$$a = \frac{p_0 - p}{\rho h} + g \quad (3.12)$$

Platí, že ku kavitácii dochádza, keď tlak v kvapaline dosiahne úroveň tlaku nasýtených pár p_{np} (3.13). Zahrnutím tohto predpokladu do predchádzajúcej rovnice vznikne rovnica (3.14), ktorá popisuje kritické zrýchlenie potrebné na vyvolanie kavitácie v hĺbke h pri tlaku nasýtených pár p_{np} .

$$p = p_{np} \quad (3.13)$$

$$a_k(h, p_{np}) = \frac{p_0 - p_{np}}{\rho h} + g \quad (3.14)$$

Práve podľa tohto vzorca je možné určiť približnú hodnotu minimálneho zrýchlenia, ktoré je potrebné k vytvoreniu prvých kavitačných bublín v reálnej situácii.

3.3 Vhodná definícia kavitačného čísla

Experiment podobný tomu čo je navrhnutý v tejto práci, bol už prevedený a spracovaný v niekoľkých vedeckých prácach. Podrobnejšie sa kavitácii vytvorenej akceleráciou venoval hlavne prof. Tadd T. Truscott, Ph.D. z Utah State University (USU).

V spolupráci s výskumníkmi z Tokyo University of Agriculture and Technology (TU-AT), vytvoril prácu s názvom *Cavitation onset caused by acceleration*. V tejto práci popisuje kavitačný dej vytvorený akceleráciou v niekoľkých kvapalinách. Hlavným cieľom práce bolo zavedenie alternatívneho kavitačného čísla a overenie jeho správnosti. [20]

Kavitačné číslo σ je bezrozmerné podobnostné číslo, ktoré je určené ako pomer tlakového rozdielu potrebného pre vznik kavitácie a poklesu tlaku spôsobeného rýchlosťou prúdenia. Najčastejšie je vyjadrené výrazom (3.15). Kde veličina p_r popisuje referenčný tlak v danom mieste kvapaliny, p_{np} je tlak nasýtených pár, ρ je hustota kvapaliny a v jej rýchlosť.

$$\sigma = \frac{p_r - p_{np}}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (3.15)$$

Kavitačné číslo v tejto forme sa najčastejšie používa na určenie kritického bodu vzniku hydrodynamickej kavitácie v hydraulických strojoch. V prípade že $\sigma < 1$, je pokles tlaku dostatočne veľký a vznik kavitácie je veľmi pravdepodobný. Ak $\sigma > 1$, tak pokles tlaku nie je dostatočne veľký a vznik kavitácie je iba málo pravdepodobný. Kavitačné číslo môže byť doplnené o ďalšie koeficienty, aby sa docielil presnejší popis vzniku kavitácie pre rôzne geometrie prúdenia. [20]

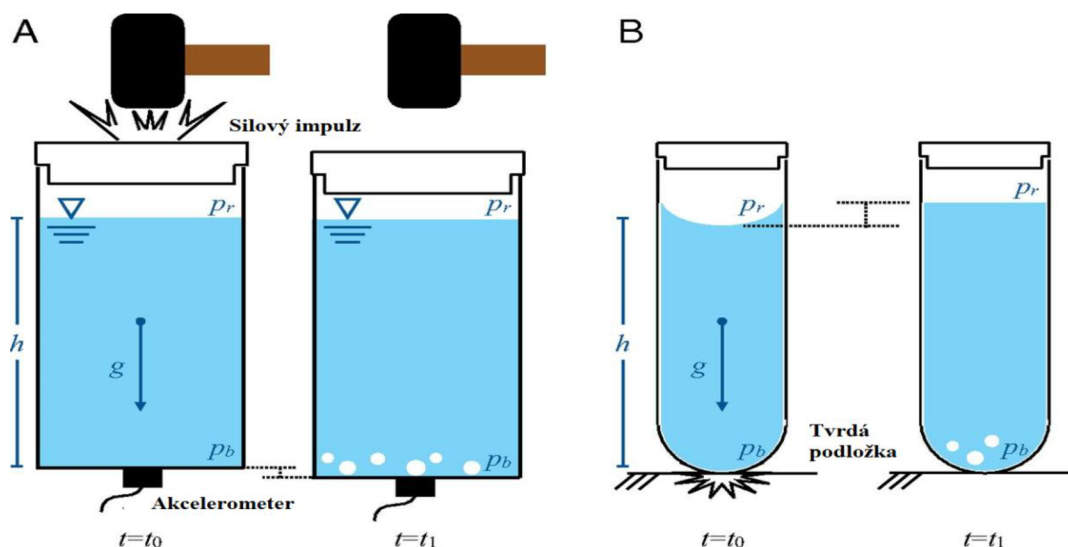
Výraz (3.15) pomerne presne popisuje kritický bod vzniku hydrodynamickej kavitácie pre rôzne druhy prúdenia, ale nanešťastie je odvodení ako funkcia rýchlosti. Pretože pri kavitácii spôsobenej zrýchlením dochádza k veľkým zmenám rýchlosti kvapaliny vo veľmi malých časových intervaloch, nie je toto kavitačné číslo úplne vyhovujúce. [20]

Práve z tohto dôvodu bolo nutné zaviesť kavitačné číslo, ktoré je založené na zrýchlení namiesto rýchlosti. V práci *Cavitation onset caused by acceleration* bolo navrhnuté kavitačné číslo v tvare (3.16). Kde veličina h popisuje hĺbku daného miesta kvapaliny. Po zahrnutí gravitačného zrýchlenia g , dostáva tvar (3.17).

$$\sigma_a = \frac{p_r - p_{np}}{\rho a h} \quad (3.16)$$

$$\sigma_a = \frac{\frac{(p_r - p_{np})}{\rho g h}}{\frac{a}{g}} \quad (3.17)$$

Následne bola dvomi nezávislými skupinami prevedená séria experimentov, na overenie platnosti alternatívneho kavitačného čísla σ_a [20]. V experimentoch boli použité rozličné kvapaliny, od vody až po etanol a silikónový olej. Experimenty boli prevedené pre rôzne množstvá kvapaliny a rozmery testovacích nádob. Taktiež boli použité dva rôzne spôsoby vyvolania kavitácie (obr. 3.3). Prvým bola uzavretá valcovitá nádoba naplnená kvapalinou, na ktorú zhora pôsobil úder gumového kladiva. Na dne nádoby bol z vonkajšej strany pripevnený akcelerometer na záznam zrýchlenia pri náraze. V druhom spôsobe bola použitá skúmavka s oblým dnom, ktorá bola uvedená do voľného pádu z predom určenej výšky. Ku kavitácii dochádza pri dopade skúmavky na pevnú podložku a jej následnom odraze. Zrýchlenie bolo v tomto prípade určené zo snímkov vysokorýchlostnej kamery. [20]



Obr. 3.3 Nákres použitých metód vyvolania kavitácie. Čas t_0 popisuje moment iniciačného úderu a čas t_1 popisuje moment vzniku kavitačných bublín. Tlak p_r je referenčný tlak na povrchu kvapaliny a tlak p_b je tlak v mieste vzniku kavitačných bublín. (upravené podľa [20])

Rôznorodosť podmienok pri jednotlivých experimentoch zabezpečila dôkladne preverenie

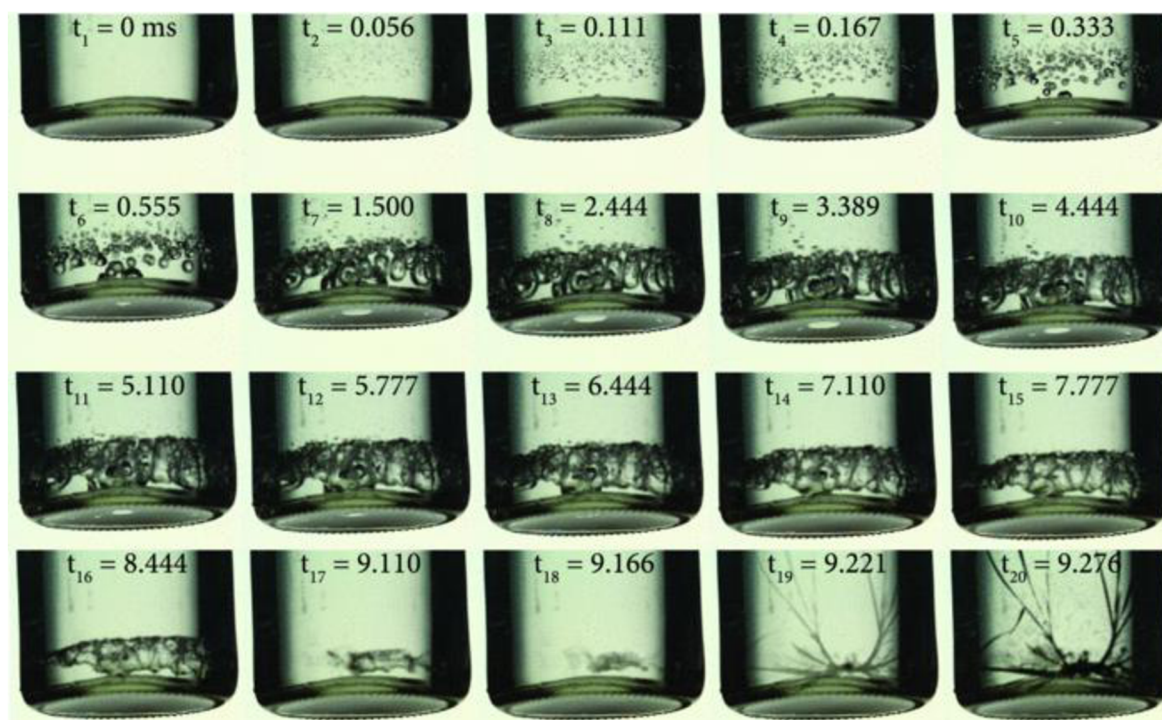
správnosti navrhovaného kavitačného čísla σ_a . Ale taktiež spôsobila, že zrýchlenie potrebné na vyvolanie kavitácie sa naprieč experimentmi výrazne líšilo. Pre vodu sa pohybovalo v rozmedzí 50 – 750 násobku gravitačného zrýchlenia g . [20]

Po vyhodnotení výsledkov zo všetkých experimentov bolo overené, že kavitačné číslo σ_a (3.16) popisuje kavitáciu spôsobenú zrýchlením presnejšie ako bežne používané kavitačné číslo σ (3.15). [20]

3.4 Deštruktívne účinky

Cavitation onset caused by acceleration nie je jediná práca v ktorej sa prof. Tadd T. Truscott, Ph.D. venoval kavitácii spôsobenej akceleráciou. Spolu s kolegami z Utah State University vytvorili taktiež prácu s názvom *Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation*. Hlavným cieľom tejto práce bolo vyvolanie a pozorovanie kavitácie dostatočne veľkej na rozbitie testovacej nádoby.

Kavitácia bola vyvolaná podobne ako v predchádzajúcej práci, úderom gumového kladiva na voľne držanú nádobu. Zmena zrýchlenia kvapaliny bola počas celého experimentu zaznamenávaná pomocou akcelerometru pripevneného na testovacej nádobe. Akcelerácia potrebná na vyvolanie dostatočne veľkej kavitácie sa pohybovala v rozmedzí 500 – 800 násobku gravitačného zrýchlenia g . Pri takto vzniknutej kavitácii bolo docieľené rozbitie nádoby. Pretože celý proces prebieha vo veľmi krátkom časovom intervale, tak by sa na prvý pohľad mohlo zdať, že rozbitie nádoby bolo spôsobené samotným úderom kladiva. Ale pri pohľade na jednotlivé snímky vysokorýchlostnej kamery je zreteľné, že ku poškodeniu nádoby došlo až v momente kolapsu kavitačných bublín (obr. 3.4). [17]



Obr. 3.4 Postupný vývoj kavitácie zachytený vysokorýchlostnou kamerou. Veličina t popisuje časový interval od momentu úderu, vyjadrený v milisekundách. [17]

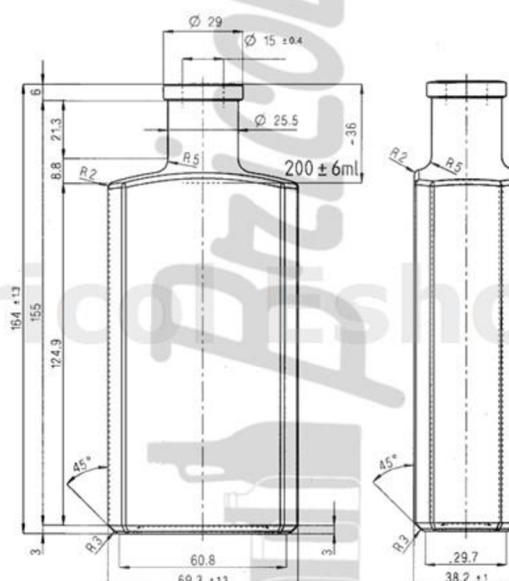
Na zázname je taktiež viditeľné, že kolaps kavitačných bublín (snímka t_{13} až t_{19}) je oveľa rýchlejší ako ich vznik a rast (snímka t_2 až t_{12}). Kavitačné bubliny vznikajú z viacerých bodov v kvapaline a ich rast prebieha približne rovnakou rýchlosťou. Ich kolaps je naopak nerovnomerný a sústredený do jedného miesta na stene nádoby. Práve koncentrácia veľkej zmeny tlaku na malú plochu nádoby je príčinou jej porušenia. Potvrdením toho je aj fakt, že trhlinka v stene nádoby sa začne šíriť práve z bodu, kde bol zánik kavitačných bublín sústredený. [17]

4 Experimentálne pozorovanie kavitácie vyvolanej akceleráciou

Hlavným cieľom tejto kapitoly je návrh experimentu, v ktorom za pomoci akcelerácie dôjde k vytvoreniu kavitačných bublín v pozorovanej nádobe. Pozorovanie a záznam vzniknutých bublín je prevedený pomocou vysokorýchlostnej kamery. Ďalšou úlohou je zhodnotiť prípadné problémy, ktoré pri danom pozorovaní môžu nastať a navrhnúť postačujúce riešenia.

4.1 Návrh experimentu

Najjednoduchším spôsobom ako v laboratórnych podmienkach vyvolať kavitáciu spôsobenú zrýchlením, je uviesť nádobu naplnenú kvapalinou do pohybu náhlym silovým impulzom. Silový impulz je vytvorený úderom pevným predmetom na vrchnú časť nádoby. V okamihu ihneď po údere môže byť zrýchlenie nádoby niekoľko násobne väčšie ako gravitačné zrýchlenie. Pôsobenie vzniknutej kavitácie, rovnako ako aj samotný úder môžu spôsobiť poškodenie alebo rozbitie testovacej nádoby. Preto je dôležité, aby nádoba vybraná pre experiment bola dostatočne odolná. Pri použití plastovej nádoby by elastická deformácia materiálu spôsobila tlmenie úderu v stenách nádoby, čo by v danom prípade bolo nežiaduce. Najvhodnejšia je hrubostenná sklenená nádoba alebo fľaša. Pre vytvorenie čo najlepších podmienok na pozorovanie bublín vo vnútri nádoby je nutné, aby steny nádoby boli priehľadné, bezfarebné a pokiaľ možno rovné. Zaoblené steny spôsobujú lom svetla, ktorý by pri zázname kamerou skresľoval tvar a veľkosť pozorovaných bublín.



Obr. 4.1 Technický náčrt fľašky použitej pre experiment (prevzatý z internetovej stránky výrobcu)[21]

Z ohľadom na požadované vlastnosti bola vybraná sklenená fľaša s objemom 200 ml od výrobcu Bricol s.r.o. (obr. 4.1). Fľaša je počas experimentu umiestnená na pružnej gumovej podložke. V prípade použitia tvrdej podložky, by po náraze nebol umožnený pohyb fľašky a nedošlo by k vzniku kavitácie. Vhodný je napríklad materiál vyrobený kompresiou recyklovaných pneumatík. Pre ešte efektívnejšie pohltenie nárazu je taktiež použitá penová vrstva nalepená medzi gumovou podložkou a dnom fľašky.

Na meranie a záznam vzniknutého zrýchlenia je použitý akcelerometer, ktorý je pripevnený na hornej časti testovacej nádoby. Akcelerometer zaznamenáva zrýchlenie iba v smere normály na plochu, na ktorú je pripevnený. Pri danom experimente prebiehajú všetky dôležité zmeny zrýchlenia iba v smere vertikálnej osi. Údaje z akcelerometra sú zaznamenávané a vyhodnocované pomocou aplikácie LabVIEW. Za pomoci danej aplikácie je možné získať závislosť zrýchlenia na čase a následne vykresliť jej priebeh.



Obr. 4.2 Základné zostavenie pomôcok pre experiment:

1. testovacia nádoba
2. akcelerometer
3. penová vrstva
4. gumová podložka
5. gumové kladivo

Silový podnet ktorý vedie k vzniku kavitačných bublín je vytvorený pomocou kladiva s gumenou hlavou. Použitím gumeného kladiva sa minimalizuje riziko, že pri údere dôjde k prasknutiu alebo odštiepeniu hrdla testovacej fľašky. Približné zrýchlenie potrebné k vzniku kavitácie vo vybranej nádobe je možné určiť podľa rovnice (3.14), odvodené v predchádzajúcej kapitole.

$$a_k(h, p_{np}) = \frac{p_0 - p_{np}}{\rho h} + g \quad (3.14)$$

Pre správne doplnenie do rovnice je potrebné určiť hodnotu niekoľkých veličín. V experimente je použitá bežná voda z vodovodnej siete s odhadovanou teplotou $T = 288,15 \text{ K}$. Pre vodu o tejto teplote platí $\rho = 999,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ a $p_{np} = 1704,2 \text{ Pa}$ [22]. Fľaška je vodou naplnená do výšky $h = 11 \text{ cm}$ a je počas celého experimentu otvorená, takže tlak na hladine sa rovná atmosférickému tlaku okolitého prostredia $p_0 = p_{atm} = 101325 \text{ Pa}$. Gravitačné zrýchlenie je $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

$$a_k(h, p_{np}) = \frac{101325 - 1704,2}{999,06 * 0,11} + 9,81 = 916,31 \text{ ms}^{-2} \quad (4.1)$$

$$a_k = 93,41 * g \quad (4.2)$$

Po dosadení vychádza kritická hodnota zrýchlenia $a_k = 916,31 \text{ ms}^{-2}$ alebo $a_k = 93,41 g$. Veličina a_k popisuje teoretickú hraničnú hodnotu, pri ktorej prekročení začne dochádzať k vzniku prvých zárodokov kavitačných bublín. V reálnych podmienkach má na vznik kavitácie vplyv nespočetné množstvo faktorov, ktoré nie sú v rovnici (3.13) zohľadnené. Medzi inými aj rozpustené plyny a pevné častice prítomné v kvapaline. Z tohto dôvodu hodnota a_k slúži skôr na

vytvorenie približnej predstavy o veľkosti zrýchlenia potrebného pre vznik kavitácie.

Pre dosiahnutie kvalitného záznamu z pozorovania je potrebné, aby použitá kamera mala dostatočné osvetlenie. Preto je testovacia nádoba počas experimentu umiestnená medzi kamerou a reflektorom s difúzorom. Pri takto vytvorených svetelných podmienkach dosahuje použitá kamera rýchlosť záznamu pre celý záber okolo 130fps, čo sa zhoduje s hodnotou uvedenou výrobcom. Ku vzniku a kolapsu kavitačných bublín dochádza vo veľmi krátkom časovom intervale, pohybujúcom sa vo výške niekoľkých milisekúnd. Takže pre podrobnejšie pozorovanie vývinu kavitačnej bubliny je nutná oveľa vyššia rýchlosť záznamu. To je možné doceliť zmenšením pozorovanej oblasti. Sústredením kamery na malú oblasť záberu sa znižuje počet pixelov, ktoré musí systém vykresliť a teda aj množstvo informácií, ktoré musí každú sekundu spracovať. Týmto spôsobom je možné dosiahnuť rýchlosť záznamu až 2000fps.



Obr. 4.3 Finálne zostavenie experimentu spolu s pozorovacou technikou

Kamera spolu s akcelerometrom sú pripojené k počítaču, v ktorom sa údaje z nich zaznamenávajú pomocou časovej slučky. To znamená, že systém uchováva posledných 10 sekúnd záznamu a všetky staršie údaje sú priebežne odstraňované. Vďaka tomu je docielené šetrenie miesta na pevnom disku počítača. Časovú slučku je možné kedykoľvek zastaviť a následne zobrazíť posledných 10 sekúnd záznamu. Takto získaný záznam je možné potom uložiť a spracovať

podľa potreby.

4.2 Použitá meracia technika

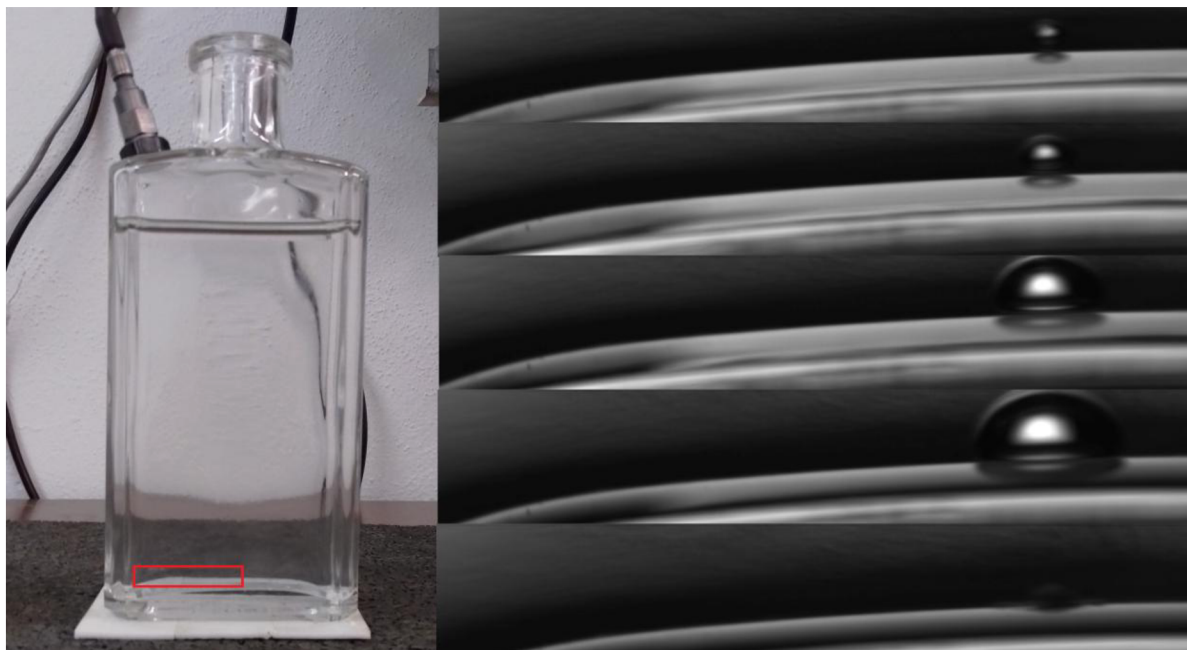
1. Kamera XIMEA CB120MG-CM-X8G3, výrobca XIMEA s.r.o., senzor CMOSIS CMV12000, rozlíšenie 4096×3072 pixel pri obrazovej frekvencii 330 fps, uzávierka od 19 μ s až 3,5 s
2. Akcelerometer, PCB, typ 352B70, citlivosť 1 mV/g, rozsah \pm 5000 g, frekvenční rozsah 0,7-9000 Hz s presnosťou \pm 5%, rezonančnej frekvencie \geq 55 kHz, výr. č. 180447

Spracovanie meraných charakteristík je prevedené s využitím programového prostredia LabVIEW 2019 a programu XIMEA CamTool 4.19.

4.3 Postup merania a možné problémy

Pred začiatkom pozorovania je testovacia nádoba naplnená sýtenou vodou. Experiment je možné previesť aj s bežnou nesýtenou vodou, ale zvýšený obsah rozpustených plynov (v tomto prípade CO_2) uľahčuje plynovú kavitáciu, ktorá prebieha difúziou daných plynov. Mikrobubliny vzniknuté v kvapaline difúziou následne slúžia ako kavitačné zárodky. Použitím sýtenej vody je možné zmenšiť zrýchlenie potrebné k vzniku kavitačných bublín a tým zväčšiť pravdepodobnosť ich výskytu.

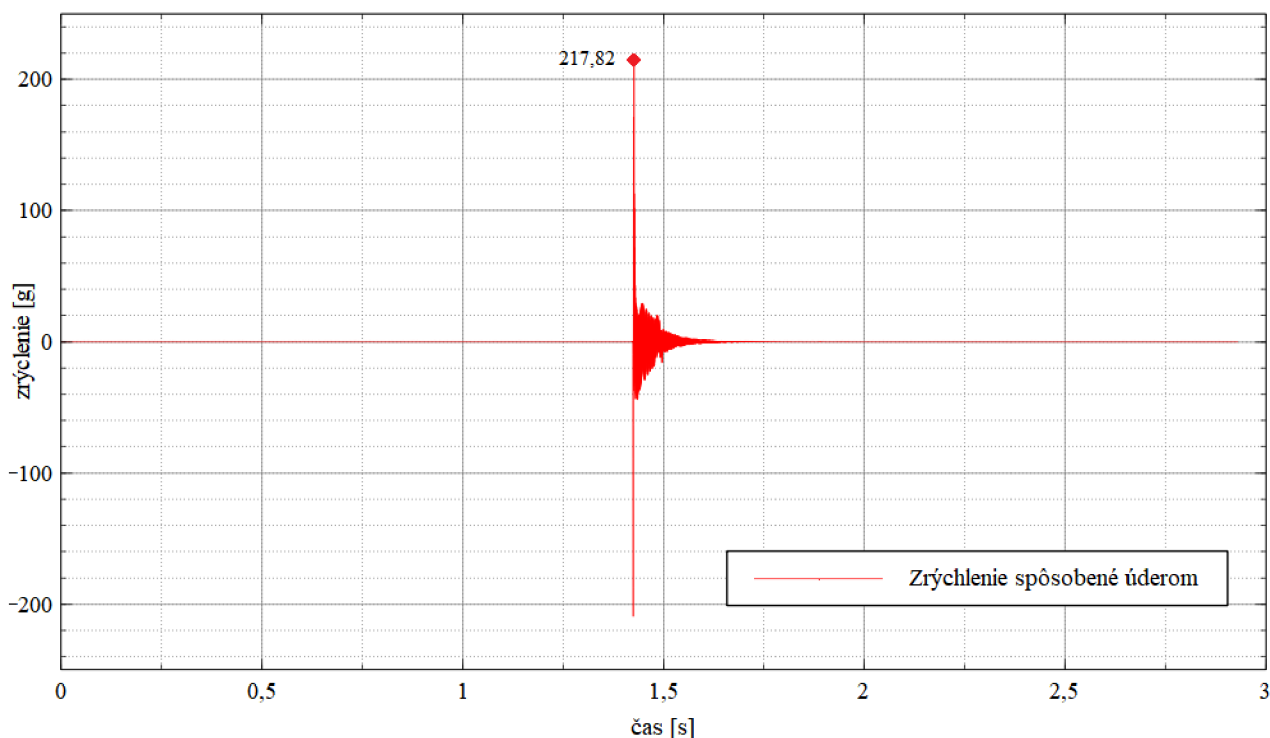
Naplnená nádoba je umiestnená na gumenú podložku medzi vysokorýchlostnú kameru a reflektor. Následne je pozorovacia technika spolu s reflektorom spustená a je skontrolovaná jej funkčnosť. V prostredí programu XIMEA CamTool je ohraničená konkrétna oblasť vo vnútri fľašky, na ktorú bude pozorovanie sústredené (*obr.4.4*).



Obr. 4.4 Približný rozmer vybranej pozorovanej oblasti odpovedajúci rýchlosti záznamu 2000 fps a vzhľad výsledných záberov

Orezaním záberu iba na danú oblasť je docielený záznam s dostatočným počtom snímok za sekundu. Pre dané svetelné podmienky je nastavená clona a zaostrenie objektívu. Po nastavení daných parametrov je spustené nahrávanie do časovej slučky. Obrazový záznam je ukladaný do slučky v programe XIMEA CamTool a údaje z akcelerometra v LabView.

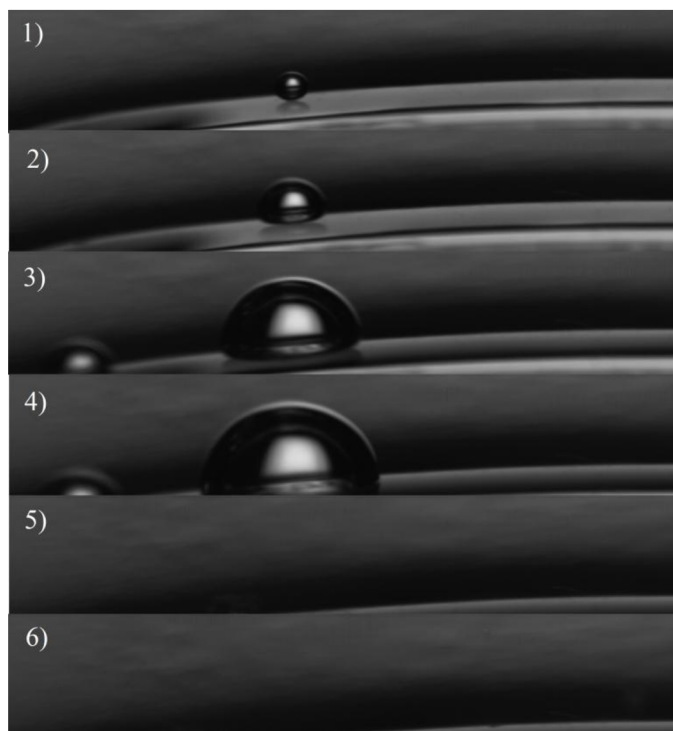
Následne je prevedený samotný experiment. Kavitácia je iniciovaná rázom gumového kladiva na hrdlo fľašky v smere gravitačného zrýchlenia. Úder kladiva je vytvorený voľnou rukou, takže silový impulz pôsobiaci na fľašku pri opakovaných pokusoch nie je konštantný. Po údere je záznam manuálne zastavený a je možné ihneď zobrazit' výsledky. Zmena zrýchlenia v závislosti na čase zaznamenaná akcelerometrom je vykreslená do grafu (*obr. 4.5*) a kamerový záznam je zobrazený vo forme videa.



Obr. 4.5 Na grafe je viditeľný úder gumovým kladivom v smere gravitačného zrýchlenia, okamžitý odraz od podložky a časový interval ustálenia fľašky. Zrýchlenie dosiahlo maximum v momente úderu o hodnotu 217,82g.

Kontrolou obrazového záznamu je nutné overiť, či počas experimentu došlo k vzniku kavitačných bublín a taktiež či bol ich vývin zachytený v dostatočnej kvalite. Dôležité je predovšetkým správne zaostrenie počas celého vzniku a zániku bubliny. Ak je záznam dostatočne kvalitný, je možné ho uložiť do internej pamäte počítača ako jednotlivé snímky vo formáte BMP. V prípade, že záznam nie je dostatočne ostrý alebo je vývin kavitačných bublín iným spôsobom skreslený, je záznam odstránený a experiment je možné opakovať podľa potreby.

Na záberoch ktoré dosahujú dostatočnú kvalitu je možné pozorovať priebeh života kavitačných bublín. Od ich vzniku, postupného rastu až po konečný kolaps. Pri pevne stanovenom počte 2000 snímok za sekundu a čase záznamu 10 sekúnd je výsledkom každého merania 20000 snímok. Pričom každá snímka odpovedá časovej zmene 0,5 ms. Priemerná dĺžka života jednej kavitačnej bubliny sa pohybuje v rozsahu 4 až 6 snímok. Čo odpovedá reálnemu času o dĺžke 2 ms až 3 ms. Toto číslo sa samozrejme mení vplyvom veľkosti zrýchlenia, ktoré kavitáciu vyvolalo ako aj množstva iných faktorov (obsah rozpustených plynov, veľkosť počiatočného zárodok atď.). Počas svojho rastu kavitačná bublina niekoľkonásobne zväčší svoj objem a následne ho pri kolapse rapídne zmenší (*obr.4.6*). Na zachytených záberoch je taktiež očividný rozdiel medzi časovým intervalom nutným k rastu kavitačnej bubliny a jej kolapsom. Pričom je viditeľné, že kolaps kavitačnej bubliny je omnoho rýchlejší ako jej expanzia.



Obr. 4.6 Na sérii snímok z experimentu je vidieť rast a následný kolaps kavitáčnej bubliny. Časový rozdiel Δt medzi jednotlivými snímkami je 0,5 ms. Za predpokladu, že počiatočná bublina na snímke 1) má priemer d_1 , tak sa jej rozmer mení nasledovne:

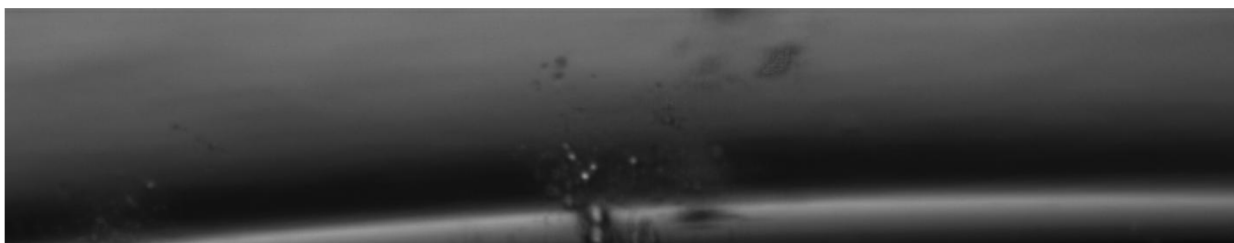
$$2) \Delta t_{1-2} = 0,5 \text{ ms}, d_2 = 2,05 * d_1$$

$$3) \Delta t_{1-3} = 1 \text{ ms}, d_3 = 4,15 * d_1$$

$$4) \Delta t_{1-4} = 1,5 \text{ ms}, d_4 = 5,25 * d_1$$

$$5) \Delta t_{1-5} = 2 \text{ ms}, \text{ nastal kolaps}$$

Problémy, ktoré môžu počas experimentu vzniknúť sú predovšetkým spojené so správnym zaostrením. Nastavenie zaostrenia objektívu je prevedené ešte pred vyvolaním kavitácie, ale presné miesto vzniku kavitáčnych bublín nie je možné vopred presne určiť. Takže vybraná pozorovaná oblasť a zaostrenie sú nastavené na predpokladané miesto vzniku kavitácie. Či bolo dané miesto správne, je možné overiť až z výsledného kamerového záznamu. V prípade, že k vzniku kavitáčnych bublín došlo mimo pozorovanú oblasť alebo mimo poľa zaostrenia (obr.4.7), je záznam z experimentu nepoužiteľný.



Obr. 4.7 Fotka vzniknutej kavitácie, kde veľká časť kavitáčnych bublín vznikla mimo poľa zaostrenia.

Miesto vzniku kavitácie je ovplyvnené nespočetným množstvom faktorov a preto ho nie je možné vopred presne určiť. S ohľadom na rovnicu (3.14) odvodenú v kapitole 3 je ale možné prehlásiť, že s rastúcou hĺbkou klesá zrýchlenie potrebné k vytvoreniu kavitácie. Z toho vyplýva, že najvyššia pravdepodobnosť vzniku kavitácie je v blízkosti dna nádoby. Z tohto dôvodu je pozorovaná oblasť vždy vybraná v okolí dna testovacej fľašky.

$$a_k(h, p_{np}) = \frac{p_0 - p_{np}}{\rho h} + g \quad (3.14)$$

Ďalším sťažujúcim faktorom je, že testovacia nádoba rovnako ako aj pozorované bubliny sú počas experimentu v pohybe. Testovacia fľaška je po údere uvedená do pohybu v smere gravitačného zrýchlenia, následne vďaka elasticite podložky dochádza k jej spätnému odrazu a pohybu v opačnom smere. Tento pohyb spolu s malým rozmerom pozorovanej oblasti môže

spôsobiť, že časť vývinu kavitačnej bubliny prebehne mimo záber kamery. Aj samotné kavitačné bubliny sa počas svojho vzniku a zániku voľne pohybujú v objeme nádoby. To môže spôsobiť, že sa dostanú mimo záber alebo mimo pola ostrosti. Spoločným pôsobením všetkých týchto faktorov dochádza k znehodnoteniu veľkej časti výsledkov pozorovania, čo vedie k jeho niekoľko násobnému opakovaniu.

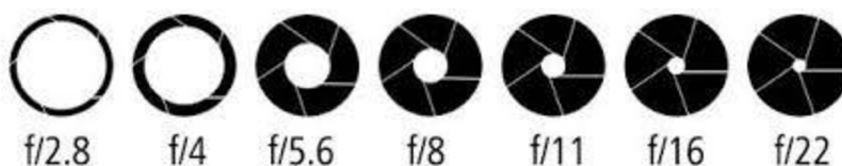


Obr. 4.8 Na záberoch z vysokorýchlostnej kamery je zachytený rast kavitačnej bubliny, ale kvôli pohybu fľašky ku kolapsu bubliny došlo mimo záber. Medzi jednotlivými snímkami je konštantný časový rozdiel 0,5 ms.

4.4 Optimalizácia experimentu

Najjednoduchším spôsobom ako minimalizovať problémy pri pozorovaní, je použitie výkonnejšej vysokorýchlostnej kamery. Kamera schopná udržať dostatočne vysoký počet snímok za sekundu aj pri zábere väčšej časti fľašky, by experiment výrazne uľahčila. Zaobstaranie tak výkonnej kamery, ale nie je z finančného ani technického hľadiska jednoduché. Preto je hlavným cieľom tejto podkapitoly riešenie problémov pri pozorovaní s rovnakou kamerou, aká je uvedená v podkapitole 4.2.

Hlavným problém predstavuje správne zaostrenie. Tento problém je možné aspoň čiastočne vyriešiť správnym nastavením clony. Výraz clona popisuje mechanický prvok objektívu, ktorý vytvára otvor premenlivej veľkosti, cez ktorý vstupuje svetlo na šošovku kamery. Nastavením clony je možné meniť veľkosť daného otvoru a tým ovplyvniť množstvo svetla prechádzajúce objektívom. Veľkosť clony je prakticky popísaná clonovým číslom κ . Clonové číslo je pomer ohniskovej vzdialenosti objektívu f a priemeru vstupnej šošovky D . Z rastúcim clonovým číslom sa znižuje veľkosť otvoru v objektíve a na šošovku dopadá menej svetla (*obr.4.9*). [23]



Obr.4.9 Rozličné hodnoty clonového čísla a im odpovedajúci rozmer efektívneho priemeru clony [23]

Hodnota nastaveného clonového čísla má taktiež priamy vplyv na zaostrenie a hĺbku poľa zaostrenia. Hĺbka poľa zaostrenia popisuje rozsah vzdialeností od kamery, v ktorých sa zaznamenávajú objekty zobrazia prijateľne ostro. Zvýšením clonového čísla dochádza k zväčšeniu hĺbky poľa objektívu. Týmto spôsobom kamera zachytí ostro väčšiu časť objemu fľašky. Nanešťastie zvýšením clonového čísla dochádza k vytvoreniu nového problému. Pretože na šošovku objektívu dopadá menšie množstvo svetla, je výsledný záznam viac tmavý a menej zreteľný. Na kompenzáciu tohto problému je možné použiť k osvetleniu fľaše reflektor s vyššou svietivosťou. Pri dodaní väčšieho množstva svetla je možné nastaviť vyššie clonové číslo a tým zväčšiť hĺbku poľa zaostrenia kamery.[23]

Ohľadom pohybu testovacej nádoby počas experimentu je nutné, aby bol fľaške umožnený posun ako reakcia na úder kladiva. Ak by bol tento pohyb zamedzený, nemuselo by dôjsť k vytvoreniu kavitácie a taktiež by hrozilo rozbitie samotnej fľašky. Ale následný odraz fľašky od podložky je možné ovplyvniť, napríklad použitím predmetu z pružného materiálu. Vhodný predmet k tomuto použitiu je gumový valec, ktorý je priložený na hrdlo testovacej fľašky a počas experimentu je držaný na mieste voľnou rukou. Úder kladiva je následne smerovaný na povrch gumového valca. Pružnosť materiálu zabezpečí prenos silového impulzu na testovaciu nádobu, ale spätný odraz fľašky je tlmený prítomnosťou valca.

5 Uplatnenie pre praktický výskum

Experiment založený na veľmi podobnom princípe, ako ten uvedený v tejto práci, by bolo možné využiť pre výskum čistenia odpadových vôd. Pozorovanie vzniku a vývinu kavitáčných bublín by už ale nebolo hlavným cieľom experimentu. Dôraz by bol kladený hlavne na spoľahlivý spôsob opakovaného vyvolania kavitácie v testovacej vzorke a následné zmeny kvality testovanej vody.

5.1 Štandardný proces čistenia odpadových vôd

Čistenie odpadových vôd je potrebné k ochrane životného prostredia a zdravia obyvateľstva. Po dôkladnom odstránení nebezpečných látok z odpadovej vody, je možné jej vypustenie do prírody alebo využitie ako úžitková voda v mestách a priemyselných podnikoch. Aby bolo zaručené, že voda je po čistení naozaj nezávadná, je nutná dôsledná kontrola jej kvality počas celého procesu.[24]

V súčasnosti používa väčšina čističiek odpadových vôd rovnaký spôsob spracovania vody. Voda je najskôr podrobená mechanickému čisteniu, pri ktorom dochádza k odstráneniu mechanických nečistôt. Táto časť procesu sa nazýva taktiež primárne čistenie a pozostáva z dvoch etáp. V prvej je voda filtrovaná za použitia filtrov rôznych veľkosti, týmto spôsobom sú odstránené pevné častice väčších rozmerov. Druhá etapa prebieha v usadzovacích nádržiach, kde sú usadeniny zostávajúcich nečistôt postupne odstraňované z dna nádoby. Po dokončení mechanického čistenia je voda podrobená biologickému, teda sekundárnemu čisteniu. Do vody sú pridané baktérie schopné požívať a metabolizovať rozpustené organické nečistoty. Baktérie potrebujú k životu a spracovaniu organických nečistôt dostatočný prísun kyslíku. Množstvo baktérií vo vode postupne rastie a konzumáciou organických nečistôt dochádza k uvoľneniu vedľajších anorganických produktov (hlavne CO_2 , NH_3 a H_2O). Po vyčerpaní potravy vo forme organických nečistôt dochádza k postupnému odumieranu kolónie baktérií. Mŕtve baktérie vytvárajú kal na povrchu vodnej hladiny, ktorý je odstraňovaný a po vysušení je ho možné použiť ako hnojivo pre technické plodiny. Následne je voda podrobená ešte chemickému, čiže terciálnemu čisteniu. Počas terciálneho čistenia sú do vody pridané chemické látky za účelom vyvolania reakcie s kontaminantmi, ktoré zostali vo vode po sekundárnom čistení. Ide hlavne o zlúčeniny dusíku, fosforu a ťažké kovy. Chemickou reakciou s pridanými látkami je možné dosiahnuť ich neutralizáciu. Kvalita vyčistenej vody je ešte posledný krát overená a ak splňuje všetky podmienky je možné jej vypustenie. [24]

5.2 Možnosti využitia kavitácie

Neustály vývoj priemyslu má za dôsledok, že odpadová voda obsahuje čoraz väčšie množstvo látok, ktoré sú ťažko odstrániteľné štandardným spôsobom čistenia. Ide predovšetkým o komplexné chemické zlúčeniny obsiahnuté v liečivách, farbivách alebo pesticídoch. Veľká časť daných látok je toxická a samovoľne ťažko rozložiteľná. Pri ich vypustení do prírody spôsobujú znečistenie a hrozbu pre životné prostredie. Práve z tohto dôvodu je dôležitá snaha o zlepšenie procesu čistenia odpadových vôd. Možným zlepšením je aj použitie riadenej kavitácie k likvidácii škodlivých látok. [13]

Použitie kavitácie pri čistení odpadových vôd ovplyvní výsledný proces dvomi spôsobmi. Pri kolapse kavitáčných bublín dochádza k extrémnym zmenám teploty a tlaku počas veľmi krátkeho časového intervalu. Pôsobenie týchto prudkých zmien v kvapaline vedie k rozpadu niektorých znečisťujúcich látok. Ďalej je možné spoločné použitie kavitácie a oxidačných činidiel, ako je napríklad peroxid vodíka, ozón alebo Fentonovo činidlo (peroxid vodíka zmiešaný s kovovým katalyzátorom). V tomto prípade slúži kavitácia ako inhibítor chemickej reakcie medzi daným činidlom a škodlivými látkami v čistenej vode. Vzájomným pôsobením kavitácie a chemických činidiel je možné urýchliť degradáciu aj inak odolných kontaminantov. Výskumu

účinnosti kavitácie na odstránenie nebezpečných látok sa venovala už rada odborníkov, ale stále je potrebné ďalšie overenie možností jej použitia.[13]

5.3 Využitie kavitácie spôsobenej akceleráciou pre výskum

Pre presnejšie určenie účinnosti kavitácie k ničeniu nebezpečných látok vo vode je potrebný podrobnejší výskum. Práve pre tento výskum by kavitácia spôsobená akceleráciou našla svoje uplatnenie.

Existuje snaha o vytvorenie mechanizmu, ktorý umožní uvedenie nádoby so znečistenou vodou do kmitavého pohybu s periodicky sa meniacou rýchlosťou a zrýchlením. Na systéme s touto funkciou už v súčasnosti pracuje doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. Po úspešnom dokončení, bude systém schopný vo vode opakovane vyvolať vznik a zánik kavitačných bublín aj počas dlhších časových intervalov. Využitím daného mechanizmu je možné testovať vplyv kavitácie na ničenie kontaminantov extrémnymi podmienkami počas kolapsu bublín, ale aj reakciou chemických činidiel. Taktiež je možné zistiť, aký vplyv má na čistenie doba vystavenia kavitácii a určiť minimálnu dobu potrebnú k dosiahnutiu dostatočne čistej vody.

Experimentálna časť výskumu je na rozdiel od pokusu navrhnutom v tejto práci, sústredená predovšetkým na vplyv kavitácie na znečisťujúce látky vo vode. Do vzorky vody sú pred experimentom pridané kontaminanty a je určený ich percentuálny obsah. Následne je ešte možné pridať chemických činidiel (napr. H_2O_2 , O_3), pre overenie vzájomného vplyvu kavitácie a chemickej reakcie. Vzorka je vystavená opakovanej kavitácii vytvorenej akceleráciou počas experimentu. Vo vzorke po experimente je zistená prítomnosť kontaminantov. Zmena v obsahu kontaminantov v testovacej vzorke je zaznamenaná a ďalej spracovaná. Porovnaním s pôvodným obsahom znečisťujúcich látok vo vode je možné určenie účinnosti kavitácie na čistiaci proces. Zmenou podmienok počas experimentu (obsah chemických činidiel, doba vystavenia kavitácii, druh kontaminantu, veľkosť zrýchlenia) je možné vyjadriť vplyv jednotlivých faktorov na čistenie vody a určiť podmienky potrebné pre maximalizáciu jeho efektivity.

6 Záver

Kavitácia je jav vyskytujúci sa takmer vo všetkých strojov a procesoch, ktoré k svojej činnosti využívajú kvapaliny. Jej vznik je pomerne komplexný dej, ktorý môže vzniknúť za množstva rozličných okolností, ale vždy je spojený s výrazným poklesom tlaku v kvapaline. Kavitácia je kvôli svojim deštruktívnym vlastnostiam všeobecne považovaná za nepriaznivý jav. Veľká časť jej výskumu je sústredená predovšetkým na obmedzenie jej výskytu a zmiernenie ňou spôsobeného poškodenia. Na druhú stranu ale kavitácia našla radu prospešných využití v rozličných odvetviach priemyslu. Pre určenie čo najefektívnejšieho spôsobu využitia priaznivých účinkov kavitácie v praxi, je ešte stále nutný podrobnejší výskum.

V tejto práci bol vytvorený návrh jednoduchého experimentu, ktorého cieľom bolo vytvorenie kavitácie pôsobením akcelerácie a následné pozorovanie vzniknutých kavitačných bublín. Pri príprave pozorovania sa rovnako ako pri akomkoľvek inom experimente vyskytlo niekoľko komplikácií. Preto boli navrhnuté možnosti optimalizácie experimentu, ktoré riešia vzniknuté problémy alebo aspoň zmierňujú ich dopad na výsledky pozorovania. Po implementácii daných riešení, je možné pomocou navrhnutého experimentu získať dostatočne kvalitný záznam vzniku kavitačných bublín. Na tomto zázname je možné sledovať napríklad aj zmenu rozmeru kavitačnej bubliny počas jej rastu, rozdiel medzi dobou expanzie a kolapsu kavitačnej bubliny alebo priemernú dĺžku života kavitačnej bubliny.

Kavitácia spôsobená akceleráciou je zo všetkých druhov kavitácie v praxi najmenej uplatnená. Ale práve experiment založený na opakovanej kavitácii vytvorenej akceleráciou by mohol slúžiť ako užitočný nástroj pre výskum čistenia odpadových vôd kavitáciou. Systém umožňujúci pôsobením akcelerácie periodicky vytvoriť kavitáciu v testovacej nádobe je už v súčasnosti vo vývoji. Využitím tohto systému, by bolo možné experimentálne overiť efektivitu kavitácie na čistenie vody od rozličných, bežne ťažko odstrániteľných látok. Použitím rovnakého experimentu by bolo možné určiť vzájomné pôsobenie kavitácie a pridaných oxidačných činidiel na čistiaci proces. Úspech daného výskumu, by mohol viesť k zavedeniu kavitácie do bežne zaužívaného procesu čistenia odpadových vôd. Docielilo by sa tým zvýšenie účinnosti čistenia a jeho celková modernizácia.

7 Zoznam použitých zdrojov

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969. 280s
- [2] AutomationForum.co [online]. [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://automationforum.co/different-problems-in-control-valve-cavitation-flashing/>
- [3] Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam [online]. [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://www.sva-potsdam.de/en/cavitation-test/>
- [4] CAUPIN, Frédéric a Eric HERBERT. *Cavitation in water: a review*. Comptes Rendus Physique. 2006, 7(9-10), 1000-1017
- [5] HyperPhysics [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/tralon.html>
- [6] SUSLICK, Kenneth S. a David J. FLANNIGAN. Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation. *Annual Review of Physical Chemistry*. 2008, 59(1), 659-683
- [7] FRENKEL', ĪA. I. *Kinetic theory of liquids*. Oxford: The Clarendon Press, 1946. 488s
- [8] Dr. Alexander Bataller [online]. [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://alexbataller.com/sonoluminescence/>
- [9] BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-509409-3.
- [10] Massflow [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <http://massflow.ir/2018/08/14/post002/>
- [11] Crane Engineering [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://blog.craneengineering.net/what-is-pump-cavitation>
- [12] DiveWise Equipment [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://www.divewise-equipment.com/en/cavitation-cleaning/>
- [13] DINDAR E., *An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: A Review*. Innov Ener Res, 2016, 5: 137.
- [14] BRENNEN, Christopher Earls. Cavitation in medicine. *Interface focus*. The Royal Society, 2015/10/06, 5(5), 20150022-20150022
- [15] Infection Control Today [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: <https://www.infectioncontrolday.com/environmental-hygiene/benefits-ultrasonic-cleaning>
- [16] Hielscher Ultrasound Technology [online], [cit. 2019-20-11]. Dostupné z: https://www.hielscher.com/mill_01.htm

- [17] DAILY Jesse, Jonathon PENDLEBURY, Ken LANGLEY, Randy HURD, Scott THOMSON a Tadd TRUSCOTT. *Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation*, Physics of Fluids. 2014, 26 (9), 091107
- [18] MANTIČ-LUGO, Vladislav, A CAYRON, P-T BRUN a F GALLAIRE. *Beer tapping: dynamics of bubbles after impact*. Journal of Physics Conference Series. 2015, 1(656).
- [19] KIYAMA, A., TAGAWA, Y., ANDO, K., & KAMEDA, M., *Effects of a water hammer and cavitation on jet formation in a test tube*, Journal of Fluid Mechanics, 2016, 787, 224-236.
- [20] PAN, Zhao, Akihito KIYAMA, Yoshiyuki TAGAWA, David J. DAILY, Scott L. THOMSON, Randy HURD a Tadd T. TRUSCOTT. *Cavitation onset caused by acceleration*, Proceedings of the National Academy of Science, U S A, 2017, 32(114), 8470-8474.
- [21] Bricol spol s r.o. [online] [cit. 2020-19-3]. Dostupné z: <https://eshop.bricol.sk/flasa-razna--0-20-bezfarebna/>
- [22] VÍTĚZ, Tomáš, Tomáš KOUTNÝ a Petr TRÁVNÍČEK. *Tabulky pro termomechaniku a mechaniku tekutin*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2016. ISBN 978-80-7509-402-5.
- [23] Lonewolf online [online] [cit. 2020-7-4]. Dostupné z: <https://lonewolfonline.net/exposure-triangle/>
- [24] PESCOD M.B. *Wastewater treatment and use in agriculture*. FAO irrigation and drainage paper 47, 1992. ISBN 92-5-103135-5

8 Zoznam použitých symbolov

Symbol	Veličina	Jednotka
p	tlak v kvapaline	Pa
p_n	tlak kvapaliny v konkrétnom mieste n	Pa
p_0	tlak na hladine kvapaliny	Pa
p_b	tlak v mieste vzniku kavitačných bublín	Pa
p_r	referenčný tlak v konkrétnom mieste kvapaliny	Pa
p_{np}	tlak nasýtených pár	Pa
T	teplota	K
v	rýchlosť kvapaliny	m/s
v_n	rýchlosť kvapaliny v konkrétnom mieste n	m/s
v_z	rýchlosť kvapaliny v smere osi z	m/s
μ	dynamická viskozita	$kg/m \cdot s$
S_n	prierez toku kvapaliny v bode n	m^2
t	čas	s
t_n	časový interval od iniciácie kavitácie na snímke n	ms
t_{n-m}	časový interval medzi snímkami n a m	ms
d_n	priemer kavitačnej bubliny na snímke n	-
ρ	hustota kvapaliny	kg/m^3
g	gravitačné zrýchlenie	m/s^2
a	zrýchlenie kvapaliny	m/s^2
a_k	minimálne zrýchlenie potrebné k vyvolaniu kavitácie	m/s^2
σ	kavitačné číslo	-
σ_a	alternatívne kavitačné číslo (navrhnuté v [20])	-
h	hlbka kvapaliny	m
κ	clonové číslo	-
f	ohnisková vzdialenosť objektívu	mm
D	priemer vstupnej šošovky	mm