



Experimentální studium vzplývání kavitačních bublin

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Adam Štěpánek

Vedoucí práce:

Ing. Jan Hujer, Ph.D.

Katedra energetických zařízení





Zadání diplomové práce

Experimentální studium vzplývání kavitačních bublin

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Štěpánek**
Osobní číslo: S19000343
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávající katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce bude experimentálně studován vliv sil působících na kavitační bublinu v kapalině ve smyslu stanovení vzplývavého pohybu kavitační bubliny.

Práce bude vypracována v těchto krocích:

- 1) Rešerše na téma diplomové práce a analýza problému.
- 2) Návrh experimentu pro studium vzplývání kavitačních bublin.
- 3) Sestavení experimentální trati a provedení experimentu v laboratoři.
- 4) Vyhodnocení experimentu.
- 5) Diskuze získaných výsledků.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

Dle potřeby
60
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- Nožička, J. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
- Samek, L., Taraba, O., Brdička, M. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981.
- Vokurka, K. Experimental study of the zeroth order acoustic radiators buoyancy in liquids. The 93rd Acoustic Seminar, Mikulov na Moravě, 18.-20.10.2016 (conference proceedings: České vysoké učení technické v Praze, Česká akustická společnost, October 2016, editors: M. Brothánek, R. Svobodová, ISBN: 978-80-01-06025-4, pp. 57-62, in Czech).
- A. M. Zhang, P. Cui, J. Cui, Q. X. Wang. Experimental study on bubble dynamics subject to buoyancy. *J. Fluid Mech.* 776, 137-160, 2015.
- R. H. Cole. *Underwater explosions*. Dover, New York, 1948.

Vedoucí práce:

Ing. Jan Hujer, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce:
Předpokládaný termín ode-
vzdání:

1. listopadu 2021
30. dubna 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. ledna 2022

Bc. Adam Štěpánek

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Janu Hujerovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, trpělivost a vstřícnost při konzultacích. Dále bych rád poděkoval všem ostatním za podporu během studia, zejména rodině, přítelkyni a kamarádům.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2020-5028.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na experimentální výzkum vzplývání kavitačních bublin v kapalině. Bubliny byly generovány metodou přechodového odporu (tzv. zkratu) a zaznamenávány vysokorychlostní kamerou pomocí stínové metody. Jednotlivé snímky byly podrobeny rozměrové analýze. Na základě této analýzy byla vyhodnocena míra vzplývání kavitačních bublin. Parametry jednotlivých měření byly řízeny změnou elektrického napětí a koncentrací soli ve vodě. Výstupem této práce je sada tabulek a diagramů znázorňujících průběh života bublin a závislosti jejich parametrů na el. napětí a slanosti.

Klíčová slova

Kavitace, vzplývání, bublina, metoda přechodového odporu, solný roztok

Abstract

The thesis is focused on experimental investigation of cavitation bubble buoyancy in a liquid. The bubbles were generated by the transient resistance method (so-called short circuit) and recorded by a speed camera using the shadow method. The individual images were put to the dimensional analysis. Based on this analysis, the buoyancy rate of the cavitation bubbles was evaluated. The parameters of individual measurements were controlled by the change of electrical voltage and salt concentration in water. The output of this work is a set of tables and diagrams showing the lifetime of bubbles and the dependence of their parameters on voltage and salinity.

Keywords

Cavitation, buoyancy, bubble, method of short circuit, salt solution

Obsah

1	Úvod.....	15
1.1	Kavitace.....	15
1.1.1	Názvosloví a okénko do historie.....	15
1.1.2	Teorie vzniku bublin.....	16
1.1.3	Dělení kavit.....	17
1.2	Způsoby tvorby umělých bublin.....	18
1.2.1	Hydrodynamická kavitace.....	18
1.2.2	Hydrostatická kavitace.....	20
1.3	Vzplývání kavitačních bublin.....	23
1.4	Vliv okolí na chování kavity.....	25
1.4.1	Vliv tepelné vodivosti, povrchového napětí a viskozity kapaliny.....	25
1.4.2	Vliv tlaku.....	25
1.4.3	Vliv hranic kapaliny.....	26
2	Cíle práce.....	28
3	Experiment.....	29
3.1	Teorie.....	29
3.2	Praxe.....	30
3.2.1	Postup měření.....	31
4	Naměřená data.....	36
4.1	První sada experimentů.....	36
4.2	Druhá sada experimentů.....	38
4.3	Třetí sada experimentů.....	41
4.4	Porovnání výsledků z kohoutkové vody.....	43
4.5	Čtvrtá sada experimentů.....	45
4.6	Pátá sada experimentů.....	47

4.7	Šestá sada experimentů.....	49
4.8	Sedmá sada experimentů.....	51
4.9	Porovnání různých slaností vody	53
4.9.1	Vliv slanosti na velikost bubliny.....	54
4.9.2	Vliv slanosti na velikost vzplývání.....	54
4.9.3	Bezrozměrný parametr vzplývání.....	56
4.9.1	Vliv slanosti na vztlakovou sílu.....	58
4.9.2	Reálný versus Rayleighův čas.....	59
4.9.3	Vliv slanosti na čas prvního maxima	60
5	Závěr.....	62

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – fázový diagram [6]	17
Obrázek 1.2 – hydrodynamická kavitace, pohybující se kapalina [7]	19
Obrázek 1.3 – hydrodynamická kavitace, pohybující se vzorek [8]	20
Obrázek 1.4 – laserová kavitace [10]	21
Obrázek 1.5 – ultrazvuková kavitace [11]	22
Obrázek 1.6 – kavitace jiskrovým výbojem [12]	22
Obrázek 1.7 – kavitace přechodovým odporem	23
Obrázek 1.8 – impakt kavity – jet [16]	26
Obrázek 3.1 – schéma uspořádání aparatury	31
Obrázek 3.2 – měřítko pro přepočítání pixelů na milimetry	33
Obrázek 3.3 – měření vzdáleností styku elektrod, horního okraje a dolního okraje bubliny od spodního okraje snímku	35
Obrázek 4.1 – život bubliny: el. napětí 50 V, kohoutková voda, frekvence snímání 10 kHz	37
Obrázek 4.2 – život bubliny: 60 V, kohoutková voda, frekvence snímání 26 kHz.....	39
Obrázek 4.3 – život bubliny: el. napětí 66 V, kohoutková voda, frekvence snímání 26 kHz	42
Obrázek 4.4 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (3,23 %hm), frekvence snímání 26 kHz	46
Obrázek 4.5 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (3,85 %hm), frekvence snímání 26 kHz	48
Obrázek 4.6 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (4,4 %hm), frekvence snímání 26 kHz	50
Obrázek 4.7 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (4,76 %hm), frekvence snímání 26 kHz	52

Seznam grafů

Graf 4.1 – průběh života bubliny v čase (1. sada experimentů)	38
Graf 4.2 – průběh života bubliny v čase (2. sada experimentů)	40
Graf 4.3 – průběh života bubliny v čase (3. sada experimentů)	43
Graf 4.4 – první maximální poloměr bubliny pro různá el. napětí	44
Graf 4.5 – průběh života bubliny v čase (4. sada experimentů)	47
Graf 4.6 – průběh života bubliny v čase (5. sada experimentů)	49
Graf 4.7 – průběh života bubliny v čase (6. sada experimentů)	51
Graf 4.8 – průběh života bubliny v čase (7. sada experimentů)	52
Graf 4.9 – závislost velikosti bubliny v prvním maximu na míře slanosti vody	54
Graf 4.10 – závislost velikosti vzplývání na slanosti vody	55
Graf 4.11 – závislost bezrozměrného parametru vzplývání na slanosti vody	56
Graf 4.12 – bezrozměrný parametr vzplývání v závislosti na poloměru prvního maxima bubliny	57
Graf 4.13 - Závislost vztahové síly na slanosti vody	58
Graf 4.14 – srovnání Rayleighova času s reálným časem v závislosti na slanosti	59
Graf 4.15 – závislost času dosažení prvního maxima bubliny na slanosti vody	61

Seznam příloh

Příloha A – referenční bublina pro 4,94 %hm soli	66
Příloha B – referenční bublina pro 5,30 %hm soli	67
Příloha C – referenční bublina pro 5,53 %hm soli.....	68
Příloha D – referenční bublina pro 5,84 %hm soli.....	69
Příloha E – referenční bublina pro 6,37 %hm soli.....	70
Příloha F – porovnání průběhů referenčních bublin jednotlivých slaností.....	71

Seznam zkratek a veličin

ČHMÚ	Český Hydrometeorologický Ústav
el.	elektrický (většinou ve spojitosti s elektrickým napětím)
KEZ	Katedra Energetických Zařízení
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (akronym) – zesilování světla stimulovanou emisí záření
LSP	Laser Shock Peening – Tepání pulzujícím laserem (technologie)
MS	MicroSoft – tvůrce softwaru
px	pixel – digitální obrazový bod
s. s.	souřadný systém
SW	Software (např. počítačový program)

veličina	název veličiny	jednotky
a	vzdálenost středu bubliny od překážky	[mm]
C	kapacita kondenzátoru	[μ F]
c	koncentrace soli	[%hm]
\check{c}_{M1}	číslo snímku prvního maxima bubliny	[-]
\check{c}_p	číslo snímku počátku tvorby bubliny	[-]
E_k	energie kondenzátoru	[J]
e_z	energetické ztráty	[$m^2 \cdot s^{-2}$]
f	frekvence	[Hz]
F_{vz}	vztlaková síla	[N]
F_o	síla hydrodynamického odporu	[N]
g	gravitační zrychlení (9,81)	[$m \cdot s^{-2}$]
h	velikost vzplývání	[mm]
I	elektrický proud	[A]
m_s	hmotnost soli	[kg]
m_v	hmotnost vody	[kg]
p	tlak	[Pa]

p_o	okolní tlak	[Pa]
p_s	tlak sytých par	[Pa]
R	poloměr	[mm]
R_d	dolní poloměr bubliny	[mm]
R_h	horní poloměr bubliny	[mm]
R_{M1}	1. maximální poloměr	[mm]
R_{m1}	1. minimální poloměr	[mm]
T	teplota	[K]
T_s	teplota sytých par	[K]
t_{M1}	čas dosažení prvního maxima bubliny	[s]
t_{Mm1}	čas mezi prvním maximem a minimem bubliny	[s]
t_{Ray}	Rayleighův čas	[s]
U	elektrické napětí	[V]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
V	Objem	[m ³]
x_0	délka obrazu měřítka	[px]
x_d	vzdálenost dolního okraje bubliny od spodního okraje obrázku	[px]
x_h	vzdálenost horního okraje bubliny od spodního okraje obrázku	[px]
x_x	vzdálenost bodu styku elektrod od spodního okraje obrázku	[px]
y_0	délka měřítka	[mm]
y_s	poloha středu bubliny v posunutém s. s.	[mm]
y_x	vzdálenost bodu styku elektrod od spodního okraje obrázku	[mm]
γ	bezrozměrná vzdálenost bubliny od překážky	[-]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
π	Ludolfovo číslo (3,1416...)	[-]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
σ_s	hmotnostní zlomek soli	[%hm]

1 Úvod

1.1 Kavítace

1.1.1 Názvosloví a okénko do historie

Pojem kavítace pochází z latinského slova „cavitas,“ které obecně označuje dutinu. Kavítace tedy znamená „tvorba dutin.“ V případě kapalin se tyto dutiny běžně nazývají bublinami či bublinkami. V technické praxi se lze setkat s označením „kavita“ například i ve slévárenství, kde se takto označuje dutina licí formy nebo dutina vzniklá stažením slitiny při chladnutí. Tato práce se ovšem nezabývá dutinami ve slévárenství.

První známý záznam pojednávající o kavítaci je z roku 1754 a to od Leonharda Eulera, který se mimo jiné zabýval vodními turbínami. Zmíněný vědec, se ve svém pojednání zamýšlel nad nesrovnalostmi mezi teorií a praxí a jeho závěry naznačují objevení kavítace.

V technické praxi byla tvorba bublin pozorována až v roce 1894 při testování torpédo-borců Daring a Turbinia poháněných rychloběžnými lodními šrouby. S čím návrháři rychloběžných lodních šroubů nepočítali, byla právě kavítace na lopatkách šroubů. V tomto případě tvorba bublin výrazně snižovala účinnost pohonu a ve značné míře poškozovala lodní šrouby a to do té míry, že zhruba po hodině provozu byly šrouby tak poškozené kavitační erozí, že bylo nutné je vyměnit za nové. Tento jev následně roku 1895 zkoumali a popsali Angličané John Isaac Thornycroft a Sydney Walker Barnaby [1].

S rozvojem vojenského průmyslu a zvyšující se účinnosti výbušnin se počala zkoumat i kavítace způsobená podmořským výbuchem. Jedná se o bublinu prudce vytvořenou rozpínáním produktů výbuchu a současným výparem okolní vody. Největší rozvoj tohoto odvětví se odehrál v druhé polovině druhé světové války a první polovině studené války. Významným dílem zabírajícím se touto tematikou je „Underwater Explosions“ od amerického autora R. H. Cole [2].

Kavítace a její projevy jsou obecně vnímány veskrze negativně, neboť způsobuje poškození strojních součástí a snižuje účinnost zařízení využívající nejrůznějšími způsoby

pohyb v kapalině. Výzkum zaobírající se kavitací slouží především k jejímu porozumění a vyvarování se jí při konstrukci, případně nalezení jejího využití. Existuje několik metod využívajících kavitaci ve svůj prospěch. Příkladem takovýchto procesů je využití v lékařství k rozbíjení ledvinových či žlučnickových kamenů¹ [3], či ultrazvuková (kavitační) liposukce². Dalším příkladem je metoda LSP (více viz kapitola 1.2.2). Kavitaci ve svůj prospěch rovněž využívají korýši strašci paví, kteří udeří svou oběť končetinami, které následně prudce stáhnou, a nastalým podtlakem vznikne bublinka, která impaktuje do těla oběti [5].

1.1.2 Teorie vzniku bublin

Pohledem na fázový diagram (

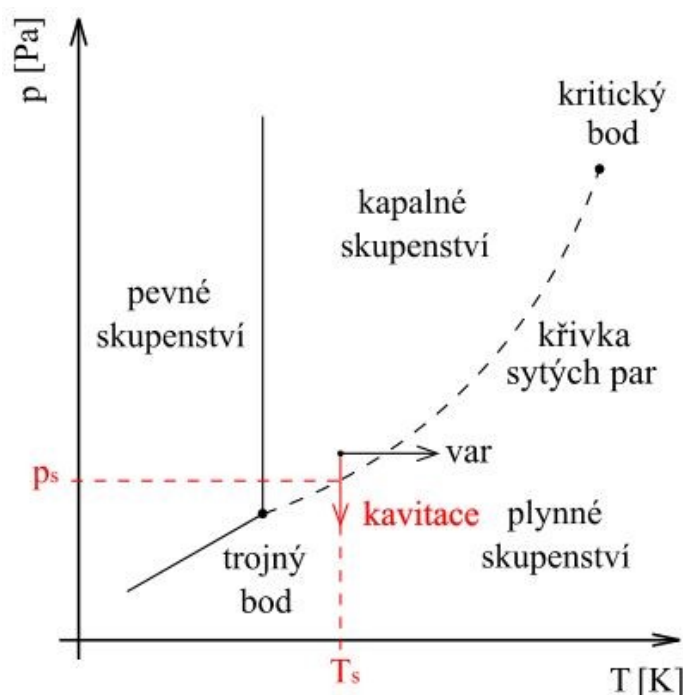
Obrázek 1.1) lze spatřit 3 způsoby tvorby dutin v kapalinách. V každém z případů se jedná o přechod mezi kapalnou a plynnou fází. Prvním ze způsobů je izobarický ohřev kapaliny (za stálého tlaku). Při dostatečném zahřívání kapaliny je dosaženo křivky sytosti³, při jejímž překračování se mění skupenství. Na jádrech obsažených kapalinou (např. nečistoty, nedokonale rozpuštěné plyny, atp.) se začnou tvořit bubliny syté páry. Tento přechod mezi stavy se nazývá var a lze se s ním setkat naprosto běžně v prostředí domácí kuchyně, například v rychlovarné konvici, mikrovlnné troubě, či při vaření polévky. Pokud se však děj v kapalině pohybuje po čáře izotermy (při neměnné teplotě) směrem k nižším hodnotám tlaku (jedná se o izotermickou expanzi) alespoň na tlak sytých par, tedy opět na křivku fázového rozhraní, nazývají se vzniklé dutiny kavitací. Třetí možností tvorby dutin je kombinace předchozích dějů. Pak se jedná o dosažení meze sytosti obecným poklesem tlaku a obecným nárůstem teploty. V reálných podmínkách se tvorby bublin vždy dosahuje třetím zmíněným způsobem, při němž se tyto děje mohou

¹ Tzv. Litotrypse extrakorporální rázovou vlnou

² Kavitační liposukce odbourá nejen přebytečná kila, ale zbaví vás i nevzhledné celulitidy. Celé tajemství spočívá v užití ultrazvuku, který je šetrnější k lidskému tělu než samotný chirurgický zákrok. Ultrazvukové vlny působí na oblast tukových buněk, které vytváří tzv. kavity (bubliny). Vnější tlak způsobí, že tukové buňky prasknou a vyplaví se z nich tuk a voda. Ty jsou následně odvedeny lymfatickým systémem do krevního oběhu a vyloučeny z těla.[4]

³ V diagramu tlak versus teplota (p - T diagram) se křivka sytých par překrývá s křivkou syté kapaliny. Stejně tak se v tomto diagramu překrývají meze sytosti na ostatních fázových rozhráních. Pro křivky sytosti v p - T diagramu se rovněž používá název křivka napětí.

blížít izotermickým či izobarickým dějům. Symboly p_s a T_s v diagramu výše značí popořadě tlak a teplotu sytých par.



Obrázek 1.1 – fázový diagram [6]

1.1.3 Dělení kavit

Kavity se vyskytují buď osamoceně, což odpovídá především experimentálnímu studiu bublin nebo v kavitačním mraku (seskupení mnoha bublin), který se vyskytuje jak v běžných aplikacích, tak v laboratorních podmínkách. Typickým příkladem osamocených kavit jsou bublinky v lahvi rychlých špuntů a kavitační oblaka mají na svědomí lodní šrouby torpédoorců Daring a Turbinia.

Dále se bubliny dělí na excitované a klidné. Klidné bubliny jsou stabilní a po vzniku zůstávají v klidu například uchycené na vnitřní stěně lahve s kapalinou, případně se uvolní a stoupají k hladině. Typické klidné bubliny jsou uvnitř lahví se sodovkou, kde jsou složeny především oxidem uhličitým, jímž je sodovka přesycená. Kdežto excitované kavity nejsou stabilní a jejich chování ovlivňuje ve značné míře okolní prostředí. Nestabilita se u bublin projevuje jejich pulzováním a po ztrátě energie rozpadem v mnoho klidných mikrobublin. Příkladem excitovaných bublin jsou opět dříve zmíněné torpédoorce

s nešťastným osudem a mimo jiné jsou i předmětem výzkumu vedoucímu k sepsání tohoto dokumentu.

1.2 Způsoby tvorby umělých bublin

Nezbytnou podmínkou výzkumu vlastností bublin, podmínek jejich vzniku a zániku, odolnosti materiálů vůči kavitační erozi atp. je nutné umět vytvořit v laboratorních podmínkách umělou kavitaci. Tomuto účelu slouží, mimo jiné, následující způsoby, jež jsou v laboratorní praxi nejběžnější. Jednotlivé metody tvorby bublin lze rozdělit na hydrodynamickou a hydrostatickou kavitaci, jinými slovy na případy nenulového a nulového relativního pohybu zdroje bublin vůči kapalině. Jako další způsob dělení se nabízí rozdělení na energetické a přirozené, přičemž energetické metody k tvorbě bublin využívají přenos elektrické, světelné, či jiné energie na bublinu⁴, kdežto přirozené využívají lokálního poklesu tlaku až na hranici sytosti přirozenými procesy, jako je obtékání překážek kapalinou.

1.2.1 Hydrodynamická kavitace

Pohybující se kapalina

V hydraulickém obvodu (tzv. kavitační tunel) proudí kapalina, která v měřicím prostoru obtéká překážku – testovací vzorek, který způsobuje lokální změny rychlosti proudu související i se změnami tlakových podmínek. Změny v proudění popisuje Bernoulliho rovnice.

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_z \quad (1.1)$$

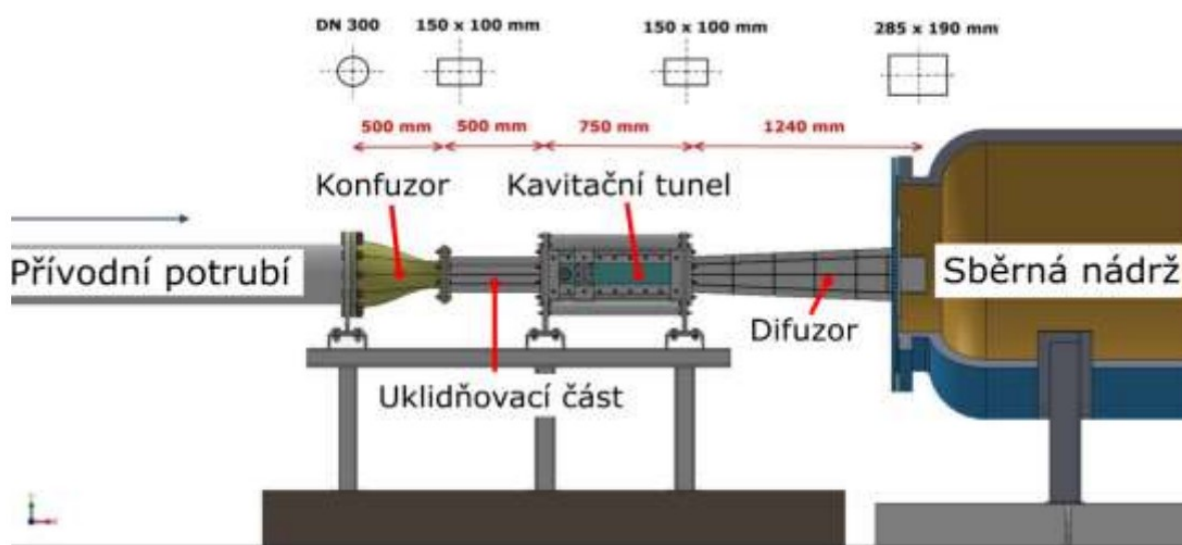
Rovnice (1.1) je v tzv. energetickém tvaru, její jednotlivé členy tím pádem představují složky energie⁵. Popořadě zleva doprava jsou to potenciální energie, tlaková energie a kinetická energie pro obě strany rovnice, přičemž na pravé straně jsou zahrnuty i energetické ztráty e_z mezi pozicemi 1 a 2. Písmeno g značí gravitační zrychlení, h je

⁴ Při tvorbě bublin energetickými metodami se zpravidla jedná o var, nikoliv kavitaci, neboť jde o izobarický ohřev.

⁵ Ve své podstatě se jedná o zákon zachování energie proudící nestlačitelné kapaliny.

výška proudu nad zvoleným počátkem souřadného systému, p a ρ odkazují na tlak a hustotu kapaliny⁶ a písmeno v zastupuje rychlost proudění.

Jelikož překážka v proudění představuje lokální zmenšení průřezného průřezu kanálu (což si lze představit jako konfuzor), musí proudící kapalina zvýšit svoji rychlost a tím pádem i snížit tlak. Díky těmto změnám tlaku vzniká kavitace (kavitační mrak). Tato metoda se využívá pro testování nejrůznějších hydraulických profilů, ke zkoumání kavitač-kavitační odolnosti materiálů, efektivity obtékání apod.



Obrázek 1.2 – hydrodynamická kavitace, pohybující se kapalina [7]

Stojící kapalina⁷

V nádrži s kapalinou se pohybuje předmět, na jehož rozhraní se mění tlakové podmínky, díky čemuž vzniká kavitace. Princip tvorby bublin je obdobný jako u předchozího způsobu. Největší rozdíl spočívá ve tvaru vzorku, jelikož v tomto případě se většinou jedná o rotační pohyb, díky čemuž je dosahováno rozdílné rychlosti obtékání profilu v různých vzdálenostech od osy otáčení a tedy i různým tlakovým podmínkám na různých poloměrech. Typickým příkladem je testování lodních šroubů a vodních turbín na odolnost vůči

⁶ Bernoulliho rovnice je v tomto tvaru použitelná pro nestlačitelné proudění, zjednodušeně řečeno pro proudění kapalin. Předpokládá se tedy, že hustota kapaliny se nemění.

⁷ Zde lze namítnout, že pokud stojí kapalina, nejedná se o hydrodynamickou kavitaci. Jde však o vzájemný relativní pohyb vzorku a kapaliny a ten je v tomto případě nenulový, je tedy i zde možné mluvit o hydrodynamické tvorbě bublin.

kavitační erozi. Běžně je testován zmenšený model, kvůli úspoře materiálu a finančních prostředků.



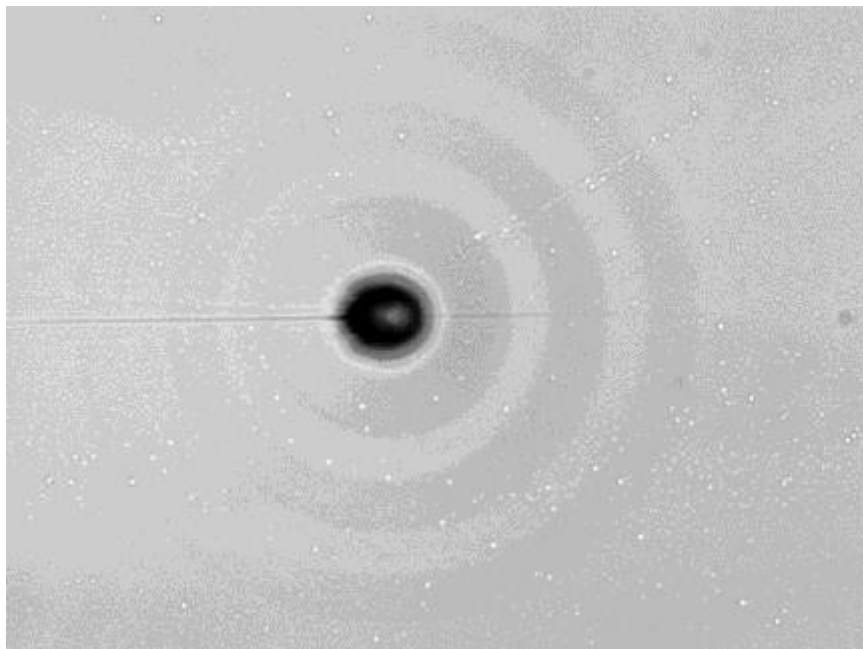
Obrázek 1.3 – hydrodynamická kavitace, pohybující se vzorek [8]

1.2.2 Hydrostatická kavitace

Kavitace laserem

Zaostřením laserového paprsku do určitého bodu v objemu nepohybující se kapaliny dochází k její ionizaci, čímž vznikne plasma, která prudce ohřívá kapalinu, jež se vypařuje a vzniká bublina. Ve své podstatě se jedná o var nikoli „pravou“ kavitaci ve smyslu popsaném v kapitole 1.1.2. Pomocí pulsujícího laseru lze vytvořit rovněž kavitační mrak. Zvláštností této metody je oválný tvar kavit způsobený nerovnoměrným rozprostřením intenzity energie v příčném řezu paprskem, tedy i v ploše ohniska. Při zaostření světelného svazku do jednoho bodu je na ploše tohoto bodu intenzita největší uprostřed a ke krajům klesá. Toto rozložení odpovídá Gaussovskému rozložení. Elipsoidní kavity nadále kmitají nejen v radiálním směru, ale i ve směru axiálním podle osy symetrie. Tvorba bublin za pomoci laseru je mimo experimentální výzkum využívána technologií LSP – Laser Shock Peening (tepání laserem). Velmi zjednodušeně se jedná o „ostřelování“ povrchu materiálu pokrytého vodou laserovým paprskem, čímž se voda ionizuje, vznikne plasma, která se velmi rychle rozpíná, naráží na povrch materiálu a tím ho zpevňuje. LSP lze připodobnit k balotinování (otryskání např. broky) s tím, že hloubka ovlivnění mate-

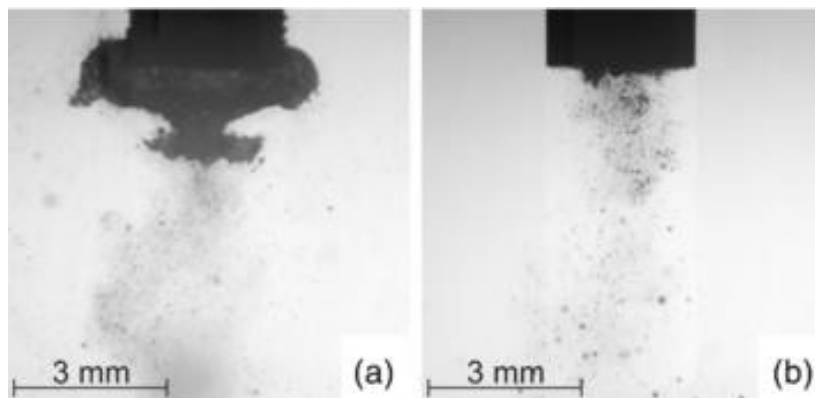
riálu u LSP je mnohonásobně větší. [9] Na následujícím obrázku je zachycena metodou multiexpozice postupující rázová vlna vytvořená laserovou kavitací. Tvar kavity (tmavá oblast) je zřetelně oválný.



Obrázek 1.4 – laserová kavitace [10]

Kavitace ultrazvukem

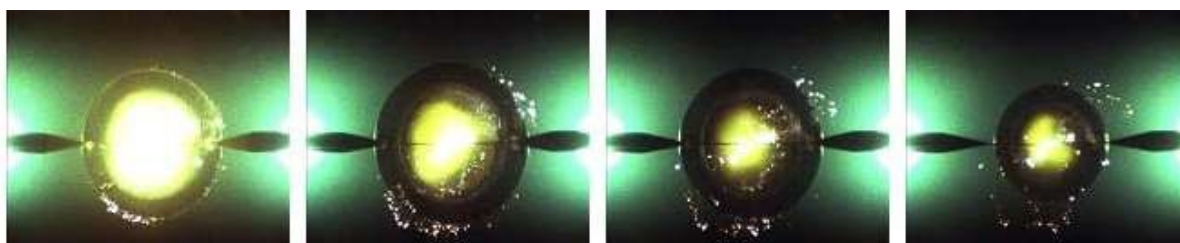
Trn (tzv. sonotroda) ponořený v kapalině je buzen ultrazvukovým zdrojem ($f \geq 20$ kHz), díky čemuž trn stojatě podélně kmitá. Sonotroda je navržena tak, aby její ponořený konec nebyl uzlem kmitání, nýbrž kmitnou. Kmitavým pohybem jsou způsobeny prudké změny tlaku vedoucí ke vzniku mraku bublin. Vzhledem k vysokým frekvencím tvorby bublin je tato metoda využívána především pro testování odolnosti různých povrchů a materiálů vůči kavitační erozi z dlouhodobého hlediska. Nespornou výhodou této metody je silná podobnost děje s hydrodynamickou kavitací vznikající např. na lopatkách vodních turbín, i přestože kapalina stojí. Nevýhodou je především relativně úzký interval velikostí bublin (reálně je interval rozměrů bublin značně široký). Rovněž trn je kavitací erodován, bývá však vyráběn z odolného materiálu a vydrží tak mnoho testovacích cyklů než je nutné jej vyměnit.



Obrázek 1.5 – ultrazvuková kavitace [11]

Kavitace jiskrovým výbojem

Přivedením elektrického impulzu na nedotýkající se elektrody ponořené v kapalině (tzv. jiskřiště) proběhne jiskrový výboj (jinými slovy vznikne mezi elektrodami ionizační kanál, doprovázený vznikem plazmatu), jenž lokálně prudce zahřeje kapalinu v blízkém okolí na vysoké teploty a ta se vypaří, čímž vznikne bublina. K provedení jiskrového výboje je nutné vysoké el. napětí, je to tedy energeticky poměrně náročný experiment. Tímto způsobem tvořili Vokurka a Buogo v [12] kavity o poloměru až cca 52 mm a zkoumali jejich vzplývání pomocí rychlokamery (viz kapitola 1.3).

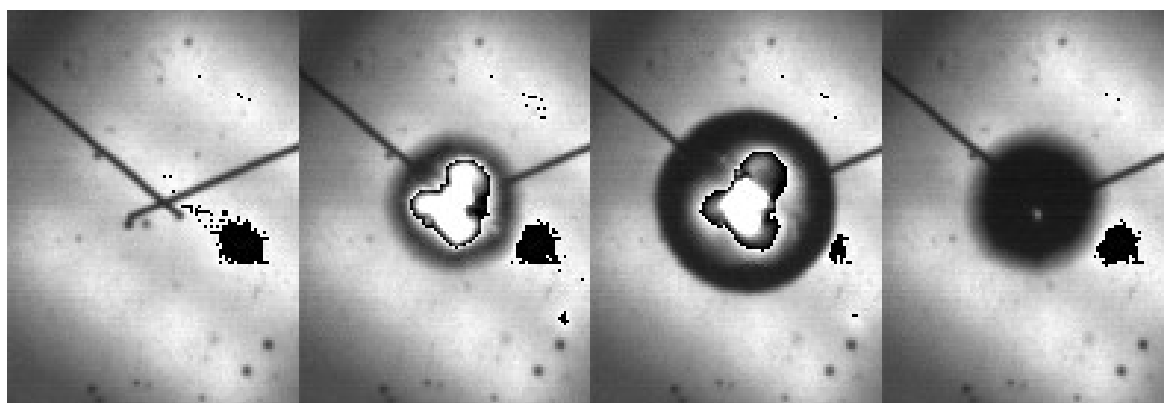


Obrázek 1.6 – kavitace jiskrovým výbojem [12]

Tvorba bublin přechodovým odporem

Pomocí metody přechodového odporu prováděli výzkum chování bublin v blízkosti překážek v [13]. Zkratová metoda byla rovněž využita při provádění experimentů pro tuto diplomovou práci. Elektrickým impulzem přivedeným na spojené ponořené drátkové elektrody vznikne zkrat, který lokálně prudce zahřeje okolní kapalinu, podobně jako

u ostatních energetických metod ji ionizuje za vzniku plazmatu, díky čemuž vznikne excitovaná bublina⁸. Více informací je k nalezení v kapitole 3.



Obrázek 1.7 – kavítace přechodovým odporem

Tvorba bublin trhavinou

Princip trhaviny spočívá ve velmi prudké změně objemu v důsledku chemické reakce, často doprovázené změnou skupenství, jehož produktem je plynná fáze a mnoho drobných, rozptýlených pevných částic. Pokud je trhavina ponořena v kapalině, vznikne výbuchem bublina. Vlastnosti takto vzniklé kavity se však mohou lišit od bublin vzniklých jinými metodami v důsledku rozdílného složení obsahu bubliny. U většiny ostatních technik tvoří vnitřek bubliny především sytá pára okolní kapaliny, případně plyny v této kapalině rozpuštěné a v případě bublin tvořených přechodovým odporem může kavita obsahovat i produkty materiálu elektrod. V případě trhaviny je kavita naplněna především plyny a pevnými produkty vyprodukovanými trhavinou. Tato metoda byla využívána především k armádnímu výzkumu podmořských výbuchů různých intenzit případně v měřítku pomocí malých množství trhaviny v laboratorních podmínkách (viz [2] a [14]).

1.3 Vzplývání kavitačních bublin

Výzkumem na toto téma se zabývali již Vokurka a Buogo v [12], jenž pro tvorbu bublin zvolili jiskrový výboj vybuzený vysokým el. napětím. Dle jejich výzkumu se pohyb bubliny uskutečňuje skokově během kolapsů. *Experimentálně bylo zjištěno, že vzplývavost*

⁸ I v tomto případě se jedná o vesměs izobarický nárůst teploty, tedy o var, nikoliv o „pravou“ kavítaci.

bublin roste s druhou mocninou velikosti bublin. [12] Důvodem vzplývání je vztlaková síla definovaná Archimedovým zákonem popsáným rovnicí (1.2) upravenou pro kulaté bubliny.

$$F_{vz} = V \cdot \rho \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot g \quad (1.2)$$

V této rovnici zastupuje symbol V objem ponořeného tělesa, π je Ludolfovo číslo, R je poloměr bubliny⁹, ρ značí hustotu okolního prostředí a g je gravitační zrychlení ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Rovnice (1.2) říká, že vztlaková síla má velikost odpovídající tíhové síle kulovitého tělesa o poloměru R s hustotou prostředí, ovšem její směr je opačný, tedy svisle vzhůru.

Proti vztlakové síle působí síla hydrodynamického odporu. Na rozdíl od vztlakové síly tato síla působí pouze při pohybu bubliny a to vždy směrem proti pohybu.

$$F_o = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v \quad (1.3)$$

Symbol η značí dynamickou viskozitu prostředí a v vyjadřuje rychlost pohybu.

Vzhledem k tomu, že vztlaková síla roste s třetí mocninou poloměru bubliny R , zatímco odporová síla jen s první mocninou poloměru bubliny R , je zřejmé, že bublina se do vertikálního pohybu uvádí vztlakovou silou především v okolí největšího poloměru R_{M1} , ale vlastní pohyb je nejvýraznější v okolí nejmenšího poloměru R_{m1} . [12]

Další silou působící na veškeré hmotné objekty na Zemi (i bubliny jsou hmotnými objekty) je gravitační síla působící směrem do středu země. Dle Vokurky v [15] lze bez výrazné chyby (menší než 1 %) vliv gravitace zanedbat až do velikosti prvního maximálního poloměru 0,3 m pro mírně oscilující bubliny a 0,1 m pro silně oscilující bubliny. Jelikož akvárium použité ke zkoumání vzplývání kavitačních bublin v této práci nemá nejmenší rozměr větší než 0,3 m a nepředpokládá se velikost prvního maximálního poloměru větší než malé desítky milimetrů, lze vliv gravitace zanedbat i v případě silně oscilujících bublin.

⁹ Předpokládá se, že bublina má čistě kulovitý tvar, což u zde použité metody odpovídá, u laserové kavitace však tvar bubliny odpovídá spíše rotačnímu elipsoidu.

1.4 Vliv okolí na chování kavity

Excitované bubliny v kapalině výrazně oscilují a chovají se tak jako akustické zářiče nul-tého řádu (bodové zdroje). Akustické vlny šířící se prostředím v radiálním směru od jejich zdroje je možné měřit hydrofonem (kapalinový mikrofon).

1.4.1 Vliv tepelné vodivosti, povrchového napětí a viskozity kapaliny

V [15] Vokurka zkoumá chování bublin různých velikostí v kapalině v závislosti na v nadpisu zmíněných vlastnostech. Stanovil zde hranici velikosti prvního maximálního poloměru bublin na 3 mm. Bubliny s rozměry většími, než tato hranice lze považovat za neovlivněné tepelnou vodivostí, povrchovým napětím a viskozitou kapaliny. Bublínky vytvořené pro účely tohoto spisu byly v téměř všech případech větší než zmíněná hrani-ce, proto tyto vlivy nebyly brány v potaz.

1.4.2 Vliv tlaku

Řídící veličinou velikosti bubliny je především okolní tlak, který je součtem aerostatic-kého tlaku nad hladinou kapaliny a hydrostatického tlaku v místě vzniku bubliny. Hydrostatický tlak se dá jednoduše řídit hloubkou umístění počátku bubliny a aerostatický lze řídit pouze v případě, že laboratoř disponuje přetlakovou či podtlako-vou komorou, ve které je možné experimenty provozovat. Tlak v okolí kavity určuje především její velikost. Pokud se zachovají všechny podmínky nastavené aparaturou a bude se měnit pouze tlak, jednoznačně platí, že čím vyšší je hladina tlaku, tím je vý-sledná bublina menší a naopak. Jednoduše si lze představit, že při menším protitlaku se bublina snadněji rozpíná a naopak. Pánové Zhang a spol. v [13] si snížením tlaku ve va-kuové komoře pomohli k tvorbě podstatně větších bublin, než by se jim povedlo při běžném atmosférickém tlaku. Jejich produkce dosahovala až 150 mm v průměru při ae-rostatickém tlaku 1,5 kPa. Větší bubliny netvořili pravděpodobně kvůli možnosti ovlivnění bublin okolními stěnami vakuové nádrže.

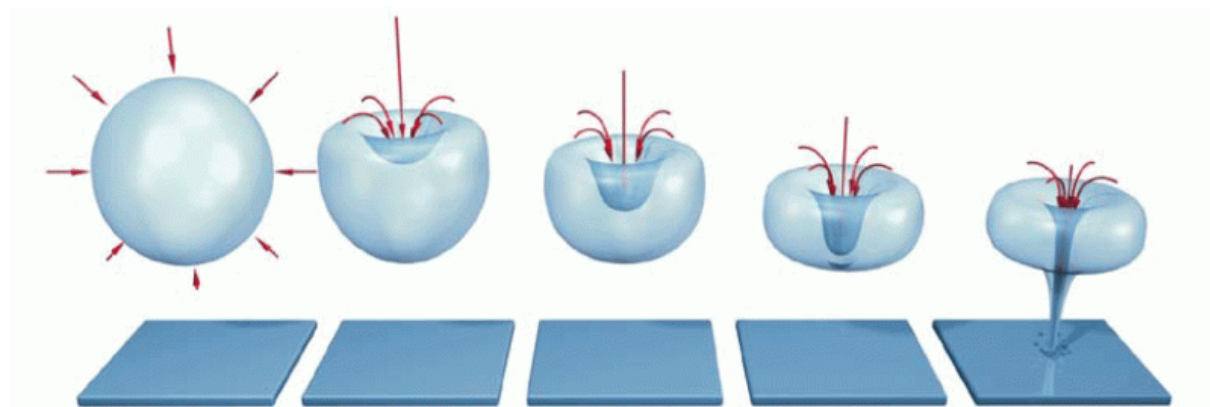
Další druh tlaku mající vliv na chování bubliny je tlak sytých par, který je závislý na tep-lotě, nelze ho tedy řídit zcela snadno, neboť je nutné ohřát nebo ochladit vodu v celém akváriu. Tlak sytých par působí opačným směrem než okolní tlak, čímž způsobuje rozpí-nání bubliny – čím vyšší tlak sytých par, tím větší bublina. Při běžném atmosférickém

tlaku se ohřevem či chlazením vody v akváriu lze pohybovat s tlakem sytých par v rozmezí cca 0,65-85 kPa. Při snaze získat vyšší tlak sytých par při atmosférickém tlaku by při dalším zvyšování teploty začala voda vřít, čímž by se experiment znehodnotil.

1.4.3 Vliv hranic kapaliny

Nejprve je nutné definovat pojem „hranice kapaliny.“ V této práci je tak označováno rozhraní kapalné fáze s jinou fází (mimo bublinky). Za hranice kapaliny lze považovat stěny akvária, volnou hladinu, případně i jiné překážky nacházející se ponořené v akváriu.

Nachází-li se bublinka v blízkosti hranice kapaliny, je touto hranicí ovlivněno její chování. Ve fázi růstu bubliny na počátku jejího „života“ bublina „rozhání“ okolní kapalinu do všech radiálních směrů, tedy i směrem k překážce. Jelikož překážka brání v přímém odtoku kapaliny, musí se kapalina „rozhánět“ do stran a to v kruhu se středem, jenž je kolmým průmětem středu kavity na plochu této hranice kapaliny, čímž v tomto bodě vzniká podtlak. Ve chvíli, kdy bublinka dosáhne svého prvního maxima a začne se smršťovat, je tímto podtlakem „přisávána“ přímo k překážce. Plynná fáze uvnitř bublinky je stlačitelná, tím pádem je díky vytvořenému podtlaku „přisáván“ i odlehlý okraj bubliny, jenž získá rychlost a prorazí bublinkou směrem k hranici kapaliny. Výše popsaný jev se nazývá „jet“¹⁰ a způsobuje ve značné míře kavitační erozi povrchu, do nějž impaktuje.



Obrázek 1.8 – impakt kavity – jet [16]

¹⁰ Pojem „jet“ pochází z anglického jazyka a je možné ho přeložit jako „proud,“ nicméně v odborné literatuře není český překlad běžně používán.

Parametr popisující vzdálenost bubliny od překážky se značí γ (viz rovnice (1.4)) a je bezrozměrný. Symbol a značí vzdálenost středu bublinky od překážky.

$$\gamma = \frac{a}{R_{M1}} \quad (1.4)$$

Kavita je výrazně ovlivněna hranicí kapaliny v případě, že parametr γ má velikost menší než 2 (tedy vzdálenost středu bubliny od překážky je nejvýše 2x větší než poloměr bubliny). Pokud parametr γ dosahuje vyšších hodnot je ve většině případů bublina ovlivněna velmi málo, až zanedbatelně, což je i případ této práce. Pro studium samotného vzplývání kavitačních bublin je důležité, aby kavita nebyla ovlivněna okolními vlivy.

2 Cíle práce

Tato práce navazuje na výzkum Karla Vokurky, který se zabýval vzplýváním kavitačních bublin různých velikostí vytvořených pomocí jiskrového výboje. Předmětem jeho výzkumu byly bubliny větších velikostí (průměry v rozmezí od cca 50 mm do 100 mm). Návaznost spočívá v rozšíření spektra průměrů o malé bubliny, které je jednodušší vytvářet pomocí přechodového odporu a zároveň lze dosáhnout vyšší opakovatelnosti experimentu.

Postupným cílem je tedy navržení a sestavení aparatury vhodné pro opakovatelnou generaci bublin a záznam jejich života. Na předchozí úkol navazuje zpracování naměřených dat a jejich přehledná prezentace v této práci. Nakonec budou formulovány závěry vyplývající z předcházejícího výzkumu.

Podmiňujícím cílem celého výzkumu je nastudování odborné literatury a pochopení základů problematiky kavitace.

3 Experiment

3.1 Teorie

Těleso ponořené do kapaliny je nadnášeno silou odpovídající gravitační síle objemu tělesem vytlačené kapaliny. Bublina je objem plynů a par ponořený v kapalině, jež lze považovat za těleso, působí na ni tedy vztlaková síla, kterou je nadnášena. Jelikož plyny a páry v dutině bubliny mají nižší hustotu než okolní kapalina, vzplývají vzhůru k hladině. Rovněž na bublinu působí gravitační síla a při pohybu i síla hydrodynamického odporu způsobená viskozitou kapaliny. Hydrodynamický odpor je však přímo závislý na dynamické viskozitě kapaliny a lze ho tedy zanedbat (viz kapitola 1.3).

Cílem tohoto výzkumu je navrhnout a sestavit aparaturu pro generování kavitačních bublin a pomocí dalšího zařízení zaznamenat a změřit průběh života a vzplývavost bublin v laboratorních podmínkách.

Vzhledem ke své jednoduchosti a nenáročnosti byla jako vhodný způsob generace bublin zvolena metoda přechodového odporu. K realizaci experimentu touto metodou je zapotřebí tenkých drátkových elektrod a jejich držáku, v jejichž dotyku vzniká kavita. Dále přípravek sloužící k ustavení elektrod v požadované poloze, sada kondenzátorů, pomocí které je dodáván elektrický impulz k vytvoření bublinky a zdroj elektrického proudu pro nabíjení kondenzátorové jednotky. Nesmí chybět spínače používané k řízení toku elektrického proudu požadovaným směrem. Důvodem je zabránění vybití kondenzátorů zpět do zdroje. Všechna zařízení je nutné propojit vhodnými vodiči s konektory.

Život bubliny je velmi rychlý děj (řádově jednotky milisekund) na jehož detailní zachycení je potřeba kamery s vysokým rozlišením a vysokou frekvencí pořizování snímků. Aby mohla rychlokamera správně fungovat je potřebný polohovatelný stativ a dostatečně silný zdroj světla, neboť při vysokých snímacích frekvencích je velmi krátký čas expozice čipu kamery. Metoda záznamu se nazývá stínovou, protože během ní jsou zaznamenávány pouze stíny objektů proti silnému světlu, nikoliv přímo samotné objekty.

Nezbytnou součástí experimentu je dostatečně velké skleněné akvárium naplněné kapalinou a zdroj této kapaliny.

3.2 Praxe

Výzkum probíhal v laboratoři *Katedry Energetických Zařízení* (KEZ) pod vedením Ing. Jana Hujera, PhD. Kavity byly vytvářeny pomocí metody přechodového odporu mezi elektrodami vedoucími stejnosměrný elektrický proud ponořenými v akváriu, jenž bylo naplněno potřebným množstvím vody z vodovodního řadu Technické Univerzity v Liberci jakožto spolehlivého a snadno dostupného zdroje vody. Elektrický výboj byl generován pomocí sady paralelně zapojených kondenzátorů o celkové kapacitě $9400 \mu\text{F}$ ¹¹ nabitých zdrojem stejnosměrného proudu a el. napětí.

Průběh života bubliny byl zaznamenáván CCD rychlokamerou *IDT X3 NanoSense*. Pro potřebu kamery byl děj osvětlen diodovým osvětlením se soustavou čoček¹² umožňujícím rovnoměrné nasvícení experimentu. Aparatura byla spouštěna pomocí osciloskopu, na jehož prvním kanálu byla připojena sada kondenzátorů. Druhý kanál sloužil k ovládání rychlokamery, přičemž každý snímek byl spouštěn zvlášť předem nastaveným signálem. K nastavení kamery byl použit k tomu určený SW *IDT MotionStudio X* volně dostupný na webových stránkách výrobce kamery.

Jelikož jde v této diplomové práci o pozorování stoupání bublinek k hladině ve volné kapalině, bylo nutné omezit výrazné vnější vlivy, které by případně mohly ovlivnit průběh experimentů. Pravděpodobně nejvýraznějším vnějším vlivem ovlivňujícím vzplývání kavit je přítomnost blízké hranice kapaliny. Z toho důvodu bylo vytvořeno několik testovacích kavit poblíž stěn akvária (γ cca 2), díky nimž bylo ověřeno tvrzení v kapitole 1.4.3 o ovlivnění kavity překážkou v kapalině. Kvůli zachování co možná nejmenšího vlivu okolních stěn akvária včetně volné hladiny byla při každém z experimentů projevena snaha o umístění styku drátkových elektrod do geometrického středu části akvária zaplaveného kapalinou. Díky tomuto opatření bylo dosaženo velikosti parametru γ u nejbližší stěny akvária cca 10, což lze z pohledu bubliny považovat za nekonečně rozlehlý objem kapaliny. Aerostatický tlak nad volnou hladinou nebyl nijak ovlivňován. Kolísání teploty vody nebylo větší než 5°C .

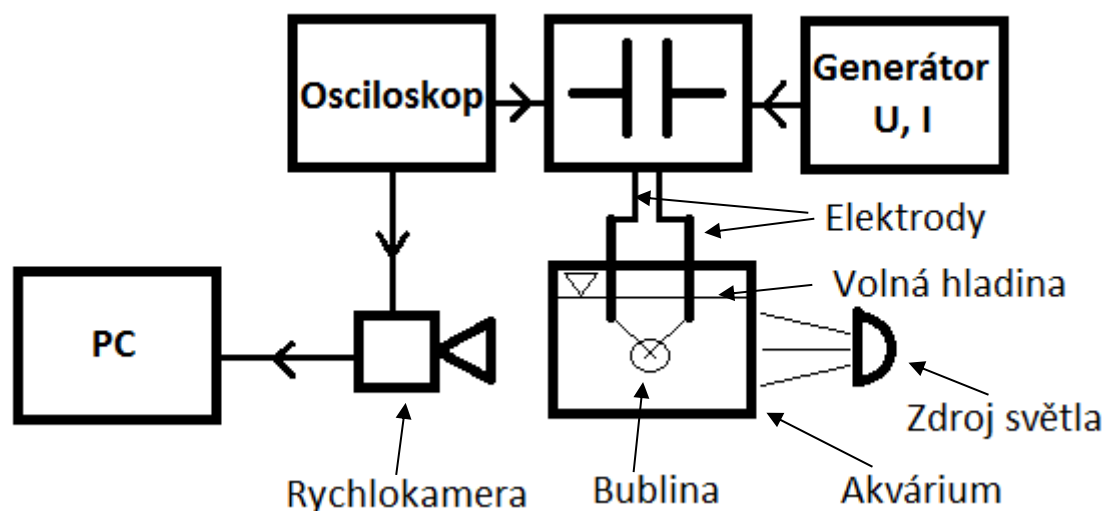
¹¹ Jedná se o elektrolytické průmyslové kapacitory od výrobce Nippon Chemi-con s maximálním napětím 63 V a maximální provozní teplotou 85°C (produktové číslo: ESMH630VSN472MQ40S).

¹² Dále je zdroj světla i se soustavou optických čoček brán vždy dohromady jako zdroj světla či osvětlení.

3.2.1 Postup měření

Přípravná fáze

V prvním kroku byla zapojena veškerá aparatura dle schématu (Obrázek 3.1).



Obrázek 3.1 – schéma uspořádání aparatury

Druhým krokem bylo nastavení příslušných přístrojů, tedy:

- Nastavení zdroje el. napětí na 50 V a proudu na 1 A.
- Nastavení osciloskopu¹³ tak, aby první kanál ovládající relé, jež uvádí kondenzátorovou jednotku do chodu, měl prodlevu 3 ms, skokový nárůst el. napětí na 5 V s výdrží 10 ms a následný skokový pokles el. napětí na 0 V. Z druhého kanálu ovládajícího spoušť rychlokamery vystupoval signál se skokovou změnou el. napětí z 0 V na 3,5 V a zpět s frekvencí 10 kHz a délkou 150 cyklů. Každý cyklus platí za spoušť jednomu snímku.
- Po připojení rychlokamery k počítači bylo nejprve nutné pomocí softwaru kameru kalibrovat se zacloněným objektivem, aby bylo možné získat etalon černé barvy, odstranit šum apod.

¹³ Typ osciloskopu použitého ke spouštění experimentu byl Tektronix AFG 3102.

- Z objektivu byla sňata krytka, bylo zapnuto a nastaveno osvětlení¹⁴. Světlo musí směřovat přímo do objektivu kamery, aby bylo dosaženo dostačujících světelných podmínek pro pořízení snímků s velmi krátkým časem expozice¹⁵.
- Obraz snímáný kamerou byl zaostřen na elektrody a pomocí softwaru byla vybrána snímaná oblast tak, aby kamera umožnila snímat požadovanou rychlostí. Snímací čip kamery je rozdělen na úzké svislé proužky, přičemž každý z proužků má vlastní datovou sběrnici¹⁶. Čím menší počet aktivních proužků při snímání, tím vyšší je dosažitelný počet snímků za sekundu.
- K pořízení požadovaného množství snímků musí tento počet snímků být nižší než množství cyklů dostupných z osciloskopu (jednotlivých spouštěcích signálů), tedy maximálně 149 snímků¹⁷. Zbytek spouštěcích signálů proběhne na prázdno, což ničemu nevadí.
- Clona objektivu byla nastavena tak, aby se nezobrazovaly zbytečné tzv. přepaly a naopak aby nebyly snímky příliš tmavé.

V následujícím kroku bylo akvárium zaplaveno kapalinou (kohoutkovou vodou). Rozměry akvária jsou 50 x 30 x 20 cm, což je v jednotkách objemu 30 l, přičemž naplněno vodou bylo nejvíce cca 20 l. Dále byly spojeny elektrody do pracovní pozice (překřížené v dotyku s co nejkratším přesahem) a po doostření obrazu byl pořízen snímek elektrod s přiloženým měřítkem pro pozdější vyhodnocení obrazů bublin. Snímek elektrod v pracovní pozici s přiloženým měřítkem byl pořízen před vytvořením každé bubliny, neboť díky postupnému zkracování elektrod a jejich ohýbání za účelem dosažení požadovaného dotyku se lehce mění jejich poloha v prostoru.

Následovalo nabití kondenzátorů pomocí generátoru el. napětí a zapnutí ovládacích kanálů osciloskopu. Tímto krokem byla aparatura připravena na generaci a záznam kavity.

¹⁴ Osvětlení bylo provedeno pomocí vysoce výkonného čipového LED světla Rapp OptoElectronics KSL-1000

¹⁵ Čas expozice čipu kamery pro snímací frekvenci 10 kHz je z technických důvodů 97 μ s, nikoliv teoreticky dosažitelných 100 μ s.

¹⁶ Datové sběrnice jednotlivých částí snímacího čipu mají konstantní datový tok a jsou svedeny do souhrnné sběrnice, jež má omezený datový tok. Při zachování maximálního datového toku souhrnnou sběrnici lze množství snímků regulovat počtem aktivně snímajících proužků snímacího čipu kamery.

¹⁷ V případě nastavení více snímků, než počtu cyklů osciloskopu je pořízeno pouze množství snímků spuštěných osciloskopem a nahrávání pomocí SW pro ovládání kamery je nutné zastavit manuálně.

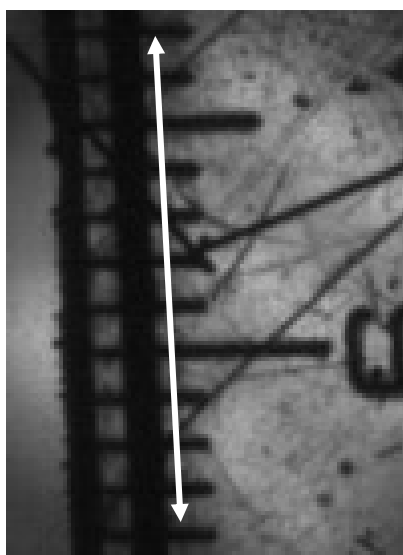
Sada kondenzátorů byla umístěna mezi dvěma spínači, aby bylo možné ji oddělit od ostatních částí elektrického obvodu. V klidové pozici byly tedy vypínače vždy vypnuty. Spínač na straně generátoru elektrického el. napětí a proudu byl ovládán ručně a to vždy po zapnutí zdroje pro nabití kondenzátorů, načež byl vypnut před vypnutím zdroje. V tuto chvíli nabité kondenzátory čekaly na vybití, jinými slovy na sepnutí spínače na straně elektrod, jenž byl ovládán pomocí relé, řízeným spouští osciloskopu.

Fáze sběru dat

Po správném vykonání předchozích kroků byl zapnut záznam obrazu v SW ovládajícím kameru a pomocí spouště osciloskopu spuštěna kamera spolu s generátorem bublin (soustava kondenzátorů + vodiče s konektory a elektrody). Kamera nasnímala celý průběh života bubliny včetně prodlev před vznikem a po zániku. Po překontrolování kvality záznamu byl tento uložen k pozdějšímu zpracování.

Fáze zpracování dat

Obrazové záznamy kavit byly zpracovány pomocí volně dostupného softwaru *XN View*, jenž slouží k úpravě obrázků a fotografií. Z prvního snímku elektrod s měřítkem byl proveden přepočít mezi rozměry digitálního obrazu a skutečnou velikostí. Jinými slovy bylo spočteno množství pixelů (obrazových bodů) na co největší možné vzdálenosti zachycené na měřítku, viz Obrázek 3.2. Pomocí trojčlenky byl proveden přepočít mezi velikostí digitálních obrazových bodů (pixely) a reálnými rozměry v milimetrech. Tento krok je nezbytný k určení reálné velikosti jednotlivých fází bublin.



Obrázek 3.2 – měřítko pro přepočít pixelů na milimetry

$$x_0 \text{ px} = y_0 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$1 \text{ px} = \frac{y_0}{x_0} \text{ mm} \quad (3.2)$$

Úpravou rovnice (3.1) vznikla rovnice (3.2). V těchto rovnicích vyjadřuje x_0 počet pixelů odpovídající počtu y_0 milimetrů na snímku měřítka (Obrázek 3.2).

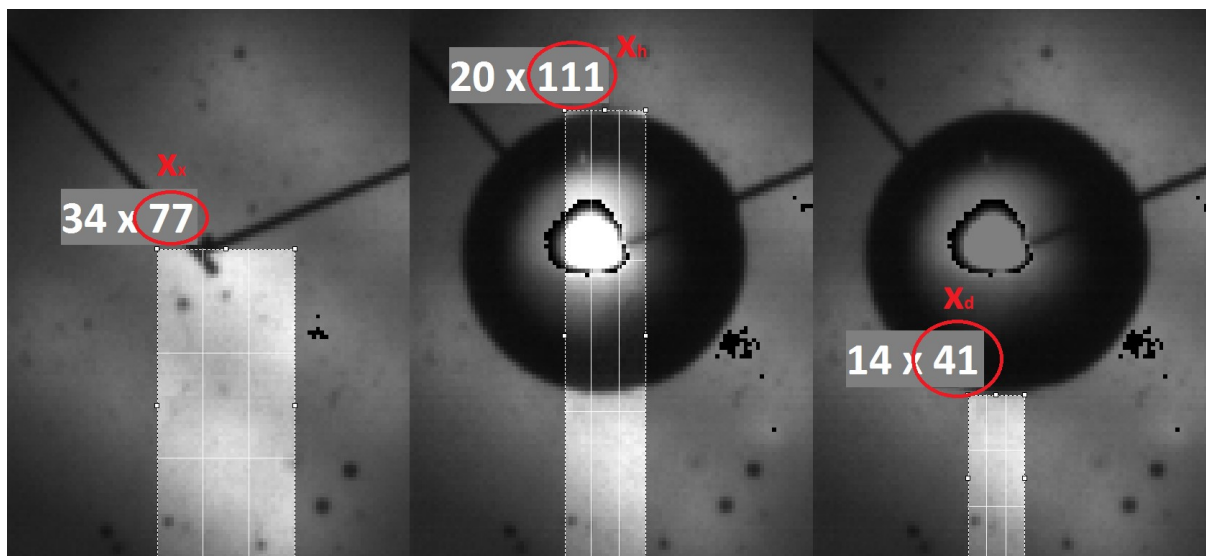
Dalším krokem bylo změření rozměrů zaznamenaných bublin. Nejprve byl konkrétní snímek zvětšen tak, aby jeho jednotlivé obrazové body byly dobře rozeznatelné, načež byly změřeny vzdálenosti horního a dolního okraje stínu bubliny¹⁸ od spodního okraje snímku (viz Obrázek 3.3). Číselné hodnoty byly poté zapsány do tabulky a přepočteny na reálné rozměry v milimetrech.

Pro přehlednost a potřeby záznamu průběhu života bubliny do grafu byl položen bod styku elektrod (jeho vzdálenost od dolního okraje snímku je x_x pixelů odpovídající y_x milimetrů) za počátek souřadného systému (vztah (3.3)) a pomocí vztahu (3.4) byla dopočítána poloha středu bubliny v milimetrech (y_s) z rozměrů jejího stínu kde x_h je vzdálenost horního okraje a x_d dolního okraje stínu od dolního okraje obrázku v pixelech.

$$y_x = x_x \cdot \frac{y_0}{x_0} \quad (3.3)$$

$$y_s = \frac{x_h + x_d}{2} \cdot \frac{y_0}{x_0} - y_x \quad (3.4)$$

¹⁸ Předpokládá se pravidelný kulovitý tvar bubliny, což se po zkusmém porovnání horizontálního a vertikálního průměru několika bublin potvrdilo. Z tohoto důvodu bylo za účelem zjednodušení práce dále využíváno pouze vertikálního průměru.



Obrázek 3.3 – měření vzdáleností styku elektrod, horního okraje a dolního okraje bubliny od spodního okraje snímku

Světlejší obdélníkové pole v jednotlivých snímcích předchozího obrázku je pole umožňující v SW *XN View* měření horizontálních a vertikálních vzdáleností na obrazu v pixelech. Kvůli zvýšení přehlednosti a čitelnosti byla pole zobrazující rozměry měřících polí zvětšena.

Z tabulek zapsaných velikostí bublin v jednotlivých časech byly vytvořeny grafy průběhů života bublin, ze kterých je snadno zjistitelný posun středu bubliny, tedy lze snadno zjistit, zda kavita vzplývala či nikoliv, případně jak moc. Tyto grafy jsou k nalezení v následující kapitole. Kvůli možnosti porovnání délky života jednotlivých bubliny byl čas pořízení snímku před snímkem, na kterém byly zřetelné první známky vzniku bubliny, označen jako nulový čas. Dále byly sestaveny série několika snímků ilustrující průběh života bubliny v čase.

4 Naměřená data

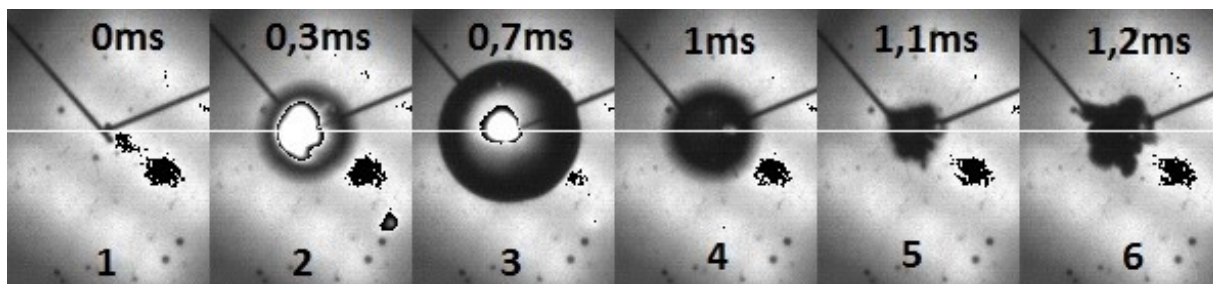
V základním nastavení aparatury (el. napětí 50 V, kohoutková voda, frekvence pořizování snímků 10 kHz) pro provádění experimentálního výzkumu vzplývavosti bublin bylo vytvořeno a zaznamenáno několik testovacích bublin k finálnímu nastavení aparatury a také za účelem získání zkušeností s jejím ovládním. V každé sérii experimentů se shodným nastavením byly kavity vesměs velmi podobných rozměrů i délek životů. Ze souborů těchto vzájemně podobných bublin byla pro tuto práci vždy vybrána a detailně zpracována ta pokud možno nejreprezentativnější kavita, ostatní bubliny byly pouze změřeny ve svých maximech. Jelikož dle [12] oscilující excitovaná kavita provádí výrazný vzplývavý pohyb pouze během svých kolapsů, je možné tímto způsobem snadno zjistit, zda bublina vzplývá či nikoliv a případně i jak moc vzplývá. Měřítka „vhodnosti“ záznamu bublinky k detailnímu zpracování byly například zmiňovaná kulovitost, dosažení druhého maxima v kulovitém tvaru, velikost vzplývání apod. Naměřená data všech zde nepublikovaných kavit jsou umístěna v příloze.

4.1 První sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	50 V
frekvence snímání	10 kHz
voda	kohoutková

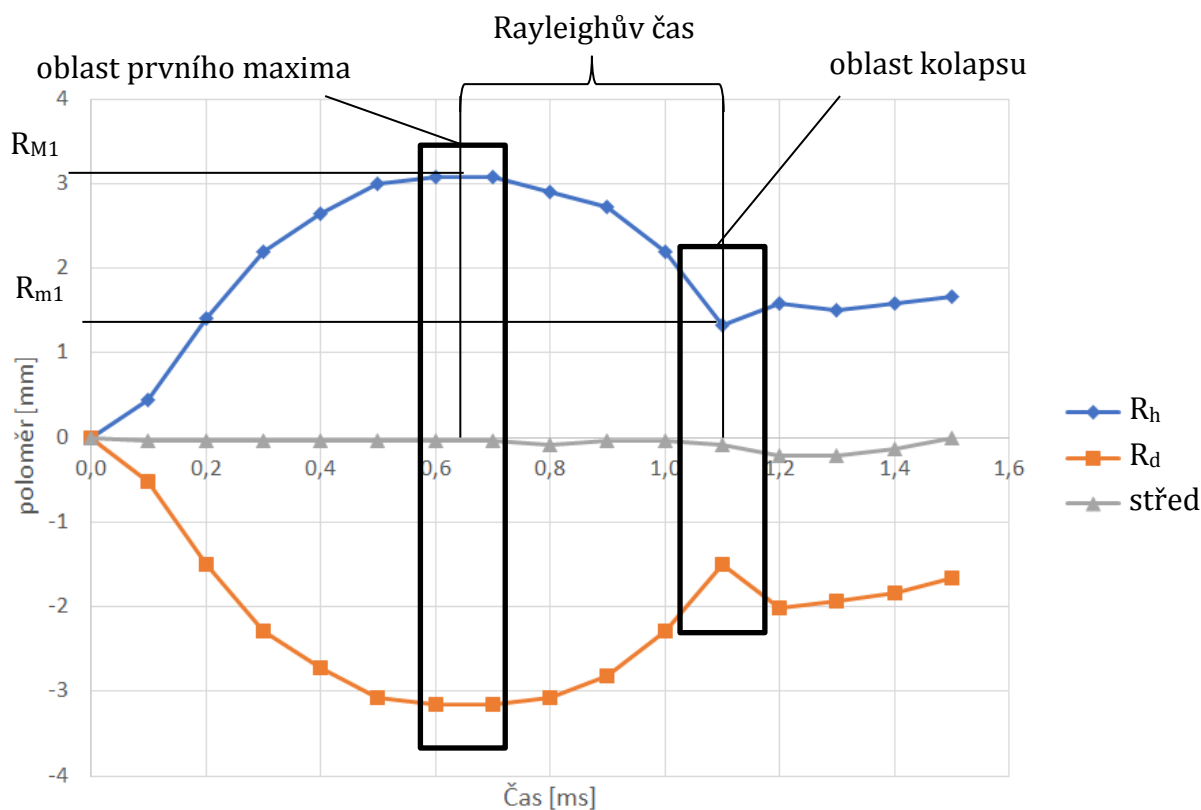
Vyhodnocením několika prvních vzorků bylo dosaženo závěru, že při současném nastavení aparatury měla bublina nedostatek energie na udržení alespoň přibližně kulového tvaru po dostatečně dlouhou dobu a nestihne tedy vzplývat k hladině před samotným rozpadem na mrak mikrobublin a pevných částic. Pevné částice jsou tvořené materiálem elektrod, který se během zkratu taví a odpařuje za vysokých teplot přítomného plazmatu. Tento oblak je dobře patrný na snímku 6 následujícího obrázku.



Obrázek 4.1 – život bubliny: el. napětí 50 V, kohoutková voda, frekvence snímání 10 kHz

Bílá čára označuje bod styku elektrod. Jak vidno, bublina skutečně během svého života nevzplývala. Na snímku č. 3 je první maximum, jehož poloměr je 3,21 mm. Průměrná velikost prvního maximálního poloměru v první sadě experimentů je 3,85 mm. První minimum (tzv. kolaps) je zachyceno na pátém snímku, kde je dobře patrná ztráta kulovitého tvaru bubliny naznačující příliš vysokou ztrátu energie na to, aby mohla vytvořit další kulové maximum. Tyto myšlenky potvrzuje i Graf 4.1, kde je rovněž znatelná nízká frekvence snímání projevující se neschopností zachytit přesně především minimální rozměry bubliny, okolo kterých jsou změny velikosti nejrychlejší. V příštích sadách experimentů byla proto zvýšena snímací frekvence rychlokamery.

Zřetelný „zobáček“ v levé části grafu je rovněž důsledkem nízké snímací frekvence. Při porovnání s ostatními grafy tohoto typu avšak s vyšší snímací frekvencí se „zobáček“ neprojevuje. Reálně se začala bublina tvořit v časovém úseku mezi prvními dvěma snímky, což s nízkou frekvencí nelze podchytit.



Graf 4.1 – průběh života bubliny v čase (1. sada experimentů)

Značení v legendě grafu R_h a R_d značí popořadě průběh horního a dolního poloměru bubliny. Zřetelný pokles bubliny po dosažení minimálních rozměrů je způsoben kolapsem a následným vyvrhnutím oblaku mikrobublin a nečistot do okolí v různých směrech (v tomto případě byl dominantní směr svisle dolů), nikoliv samotným propadem kavity. Následující stoupání hodnot grafu je pravděpodobně vzplývání, nikoliv však samotné bubliny, ale oblaku mikrobublin a částic, ve který se kavita rozpadla.

4.2 Druhá sada experimentů

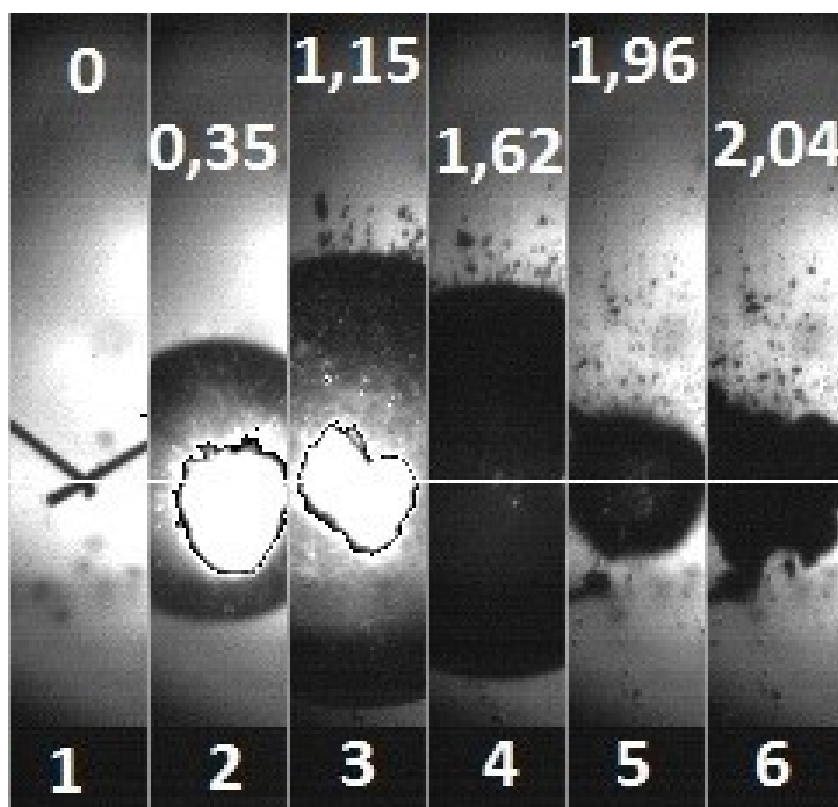
Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	60 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	kohoutková

Energie bubliny je přímo závislá na množství energie dodané vybitím kondenzátorů, jejíž velikost odpovídá vztahu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (4.1)$$

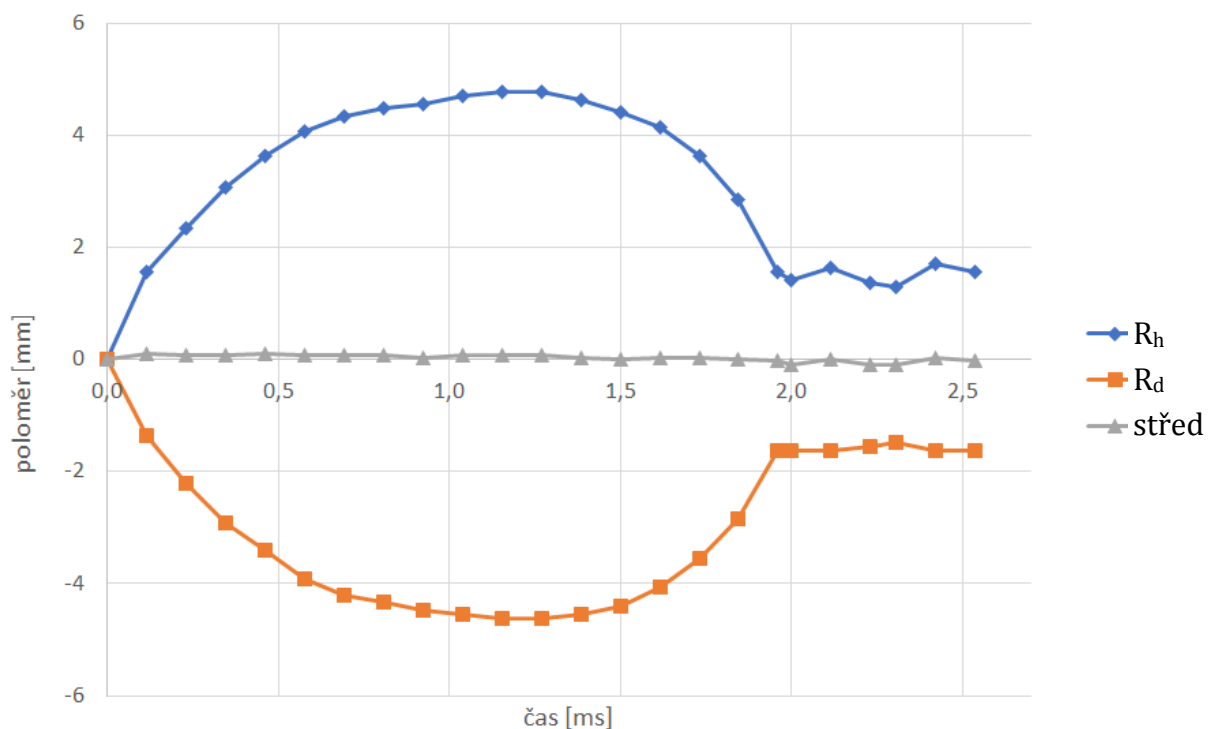
Kde C je kapacita kondenzátorů a U je el. napětí zdroje nabíjejícího kondenzátory (jinými slovy el. napětí uchované a vybité kondenzátory). Při současném nastavení má energie kapacitorů velikost 11,75 J, přičemž účinnost přenosu není stoprocentní z důvodu nečistot ve spojích, zahřívání spojů, nečistot na elektrodách, nečistot obsažených ve vodě atd. Velikost účinnosti přenosu energie nebyla nijak zjišťována. Aby bylo možno studovat vzplývavost kavitačních bublin, bylo nutné zvýšit energii předanou kavitě, což lze provést dvěma způsoby. Prvním je navýšení kapacity kondenzátorů, čehož lze dosáhnout přidáním dalšího kondenzátoru s požadovanými vlastnostmi, případně výměnou stávající kapacitní jednotky za jinou s vyšší kapacitou. Druhým způsobem je zvýšení el. napětí mezi svorkami zdroje. Jelikož je energie kondenzátoru závislá na druhé mocnině el. napětí a zvýšení el. napětí je velmi prostá operace, bylo přistoupeno ke druhé variantě, tedy zvýšení el. napětí zdroje na 60 V, čímž se energie dodaná kapacitní jednotkou bublině zvýšila na 16,92 J. Následovala tvorba několika testovacích bublin. Dle předpokladu měly dále produkované a zpracované bubliny více energie, tudíž byly větších rozměrů a udržely si déle vesměs kulovitý tvar (viz Obrázek 4.3). Stále však nebylo pozorováno žádné vzplývání, což je pro výzkum vzplývavosti zásadní problém. Detailní rozbor průběhu života kavity je zaznamenán v koláži a grafu níže (viz Obrázek 4.3 a Graf 4.2).



Obrázek 4.2 – život bubliny: 60 V, kohoutková voda, frekvence snímání 26 kHz

Číslice v horní části snímků jsou časy pořízení snímků v milisekundách v průběhu života bubliny (stejný systém je použit i u následujících obrázků tohoto typu), počítáno od prvního znatelného projevu tvorby bublinky. Ostrý přechod ve spodní části obrázku je způsoben úpravou za účelem zvýšení čitelnosti obrázku a textu v něm vepsaném. Ve svém prvním maximu zobrazeném na snímku číslo 3, dosáhla bublina poloměru 4,7 mm. Průměrem velikostí prvního maximálního poloměru této sady experimentů je 5,95 mm.

Zpracování každého snímku při frekvenci 26 kHz by nepřineslo nové informace o většině života bubliny, proto byl zpracován každý třetí snímek během prvního kmitu. V pozdějších fázích života kavity byl počet zpracovaných snímků zvýšen z důvodu vyšší rychlosti zde odehrávajících se dějů.



Graf 4.2 – průběh života bubliny v čase (2. sada experimentů)

Drobné kolísání polohy středu bubliny je pravděpodobně způsobeno nepřesnostmi v měření velikosti jednotlivých fází. Nepřesnost měření může vzniknout i zachycením různých nečistot či mikrobublin na okraji bubliny, které jsou dobře patrné například ve třetím snímku předchozí koláže. V časové oblasti těsně před kolapsem (především tím prvním) se poloměr kavity mění velmi rychle a i při snímací frekvenci 26 kHz jsou okraje stínu bubliny na jednotlivých snímcích silně rozmazány.

Vzhledem ke konstrukci kamery bylo kvůli zvýšení frekvence snímání z 10 kHz na 26 kHz nutné zúžit zabíraný obraz (viz kapitola 3.2.1, část „přípravná fáze“), tudíž nebylo možné zaznamenat kompletní stín bubliny. Respektive by bylo možné dosáhnout záběru celé bubliny oddálením kamery od zkoumaného děje, nicméně by značně poklesla přesnost záznamu, tedy i přesnost měření velikosti stínu dutiny. Při tomto oddálení by totiž bublina zabírala na obraze příliš málo pixelů a její hranice by byly takzvaně „rozpixelované.“ Dalším argumentem obhajujícím zachycování nekompletního stínu bubliny je omezený prostor laboratoře, kterýžto poskytoval jen omezenou variabilitu nastavení vzdálenosti mezi kamerou a akváriem.

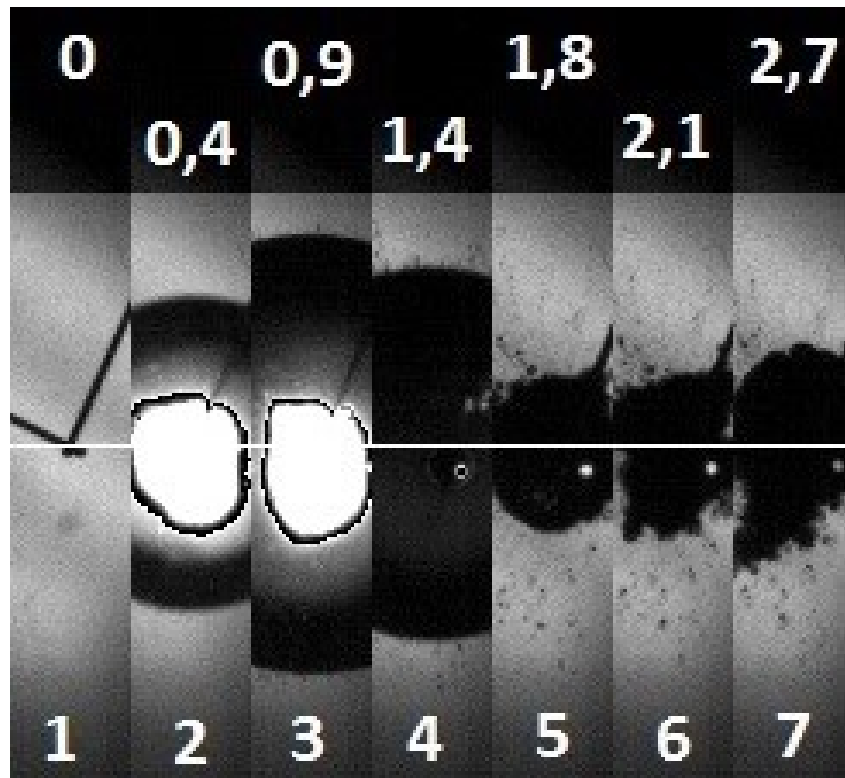
4.3 Třetí sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	66 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	kohoutková

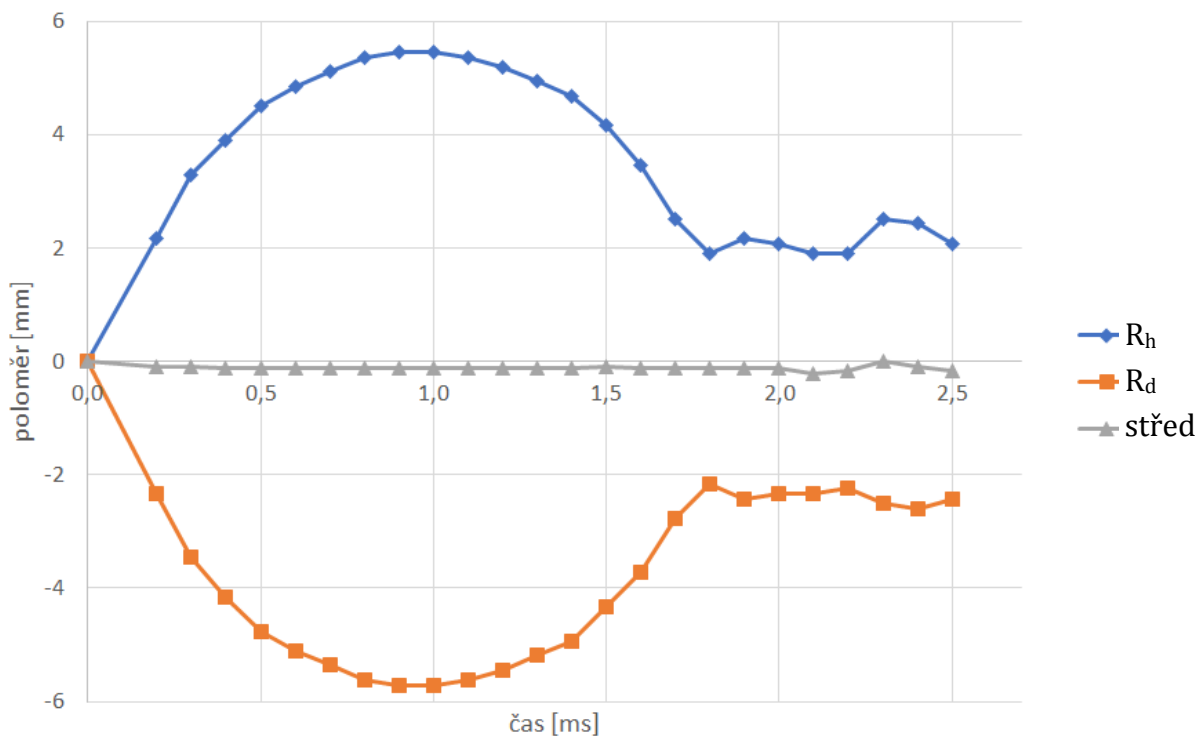
Jelikož zvýšením elektrického napětí kondenzátorů na 60 V nebylo dosaženo druhého maxima v kulovitěm tvaru ani pozorovatelného vzplývání, bylo přistoupeno k dalšímu zvýšení el. napětí. Tentokrát bylo el. napětí zvýšeno jen o 6 V, protože víc nedovoluje zdroj. Dalším důvodem nižšího navýšení el. napětí byla pracovní hodnota el. napětí kondenzátorů, činící 63 V. Přestože nabíjecí el. napětí přesáhlo maximální el. napětí kondenzátorů, nebyla kondenzátorová jednotka vystavena výraznému nebezpečí destrukce, neboť dle normy IEC 831 je možné přetížít kondenzátor 1,3 násobkem povoleného el. napětí, což v tomto případě činí 81,9 V. Sada kondenzátorů využitých tímto výzkumem je určena pro průmyslové využití a dlouhodobé zatížení, krátkodobé a občasné nízké přetížení ji tedy nepoškodí.

Zvýšením el. napětí zdroje na 66 V se zvýšila energie kondenzátorů na 20,47 J, díky čemuž se opět zvětšily rozměry kavit spolu s jejich délkou „života“. Oproti původním 50V bublinám se energie kapacitorů zvýšila téměř dvojnásobně.



Obrázek 4.3 – život bubliny: el. napětí 66 V, kohoutková voda, frekvence snímání 26 kHz

Ve svém prvním maximu (Obrázek 4.3, snímek č. 3) tato bublina dosáhla poloměru 5,76 mm a průměrná hodnota poloměru prvního maxima bublin tvořených s el. napětím 66 V činí 6,61 mm. Druhého maxima opět nebylo dosaženo před rozpadem kavity, rovněž vzplývání nebylo pozorovatelné, což je nejlépe patrné z následujícího grafu.

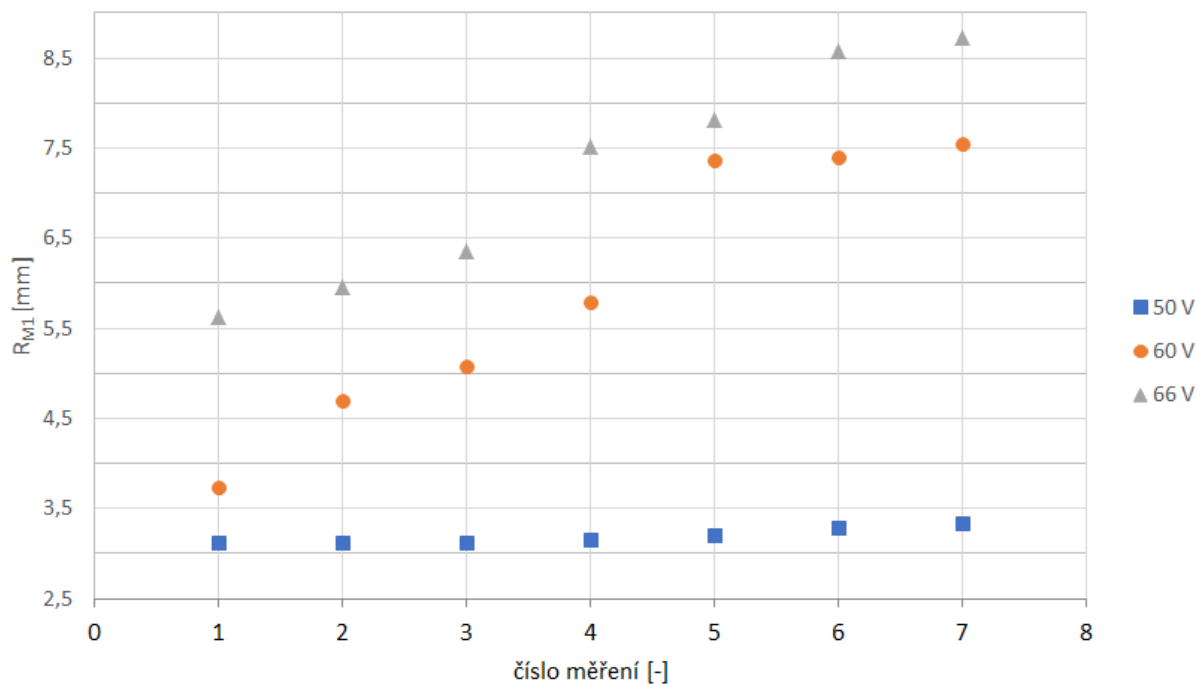


Graf 4.3 – průběh života bubliny v čase (3. sada experimentů)

4.4 Porovnání výsledků z kohoutkové vody

Jelikož bylo dosaženo limitů zdroje i kondenzátorů, bylo nutné pro pokračování ve výzkumu přistoupit k jiným metodám, které jsou blíže popsány v následujících kapitolách. Na tomto místě je uvedena rekapitulace předchozích výsledků dosažených zvyšováním el. napětí zdroje.

Graf 4.4 porovnává sady prvních maximálních poloměrů bublin vytvořených různými el. napětími. Data jsou kvůli přehlednosti seřazena podle velikosti poloměrů. Je zde zřetelný rozdíl velikostí bublin u různých hodnot el. napětí související především s energií dodanou bublině kondenzátory. U hodnot pro el. napětí 60 V a 66 V, je znatelná jistá nekonzistentnost ve velikostech bublin. Existuje mnoho faktorů, které mohou mít vliv na chování bubliny, které bohužel nelze nebo není snadné podchytit, natož určit ten nejvýznamnější. Z toho důvodu jsou níže uvedené vlivy řazeny rukou náhody.



Graf 4.4 – první maximální poloměr bubliny pro různá el. napětí

Jistý vliv na velikost bubliny má protitlak (viz kapitola 1.4), který je závislý částečně na velikosti aktuálního atmosférického tlaku. Jelikož byly experimenty prováděny v rozmezí několika dnů až týdnů, je možné, že byl atmosférický tlak různý¹⁹.

Dalším vlivem na velikost kavit měla i různá míra koroze kontaktů ponořených ve vodě. O použité kohoutkové vodě lze s jistotou říci, že nedosahuje čistoty destilované vody, proto v ní do jisté míry dochází k elektrolýze, jejímž doprovodným efektem je usazování iontů na elektrodách (tedy jejich postupné znečišťování). Rozebírání, čištění kontaktů a opětovné skládání aparatury nebylo uznáno za vhodné z hlediska časové náročnosti a neúčinnosti čistících metod, proto byla tato operace opakována pouze jednou za několik málo jednotek dnů, během nichž probíhaly experimenty. Průběžně byly čištěny pouze elektrody, které byly snadno dostupné.

¹⁹ Dle dat Českého Hydrometeorologického Ústavu (ČHMÚ) se v rámci několika dní může atmosférický tlak měnit až v řádu malých desítek hektopascalů.

4.5 Čtvrtá sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	66 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	slaná (3,23 ‰hm)

Bylo rozhodnuto vyzkoušet vliv vlastností kapaliny na tvorbu bublin s cílem vytvořit kavitu dostatečně kvalitní pro samotný výzkum. Předpokladem zdůvodňujícím provedení dalších změn v základním nastavení aparatury bylo zvýšení efektivity přenosu energie kondenzátorové jednotky na samotnou kavitu, neboť další zvyšování el. napětí nebylo možné a zvyšování kapacity příliš složité. Za vhodný postup bylo uznáno zvýšení vodivosti a hustoty vody zvýšením koncentrace soli. Tohoto bylo dosaženo přisypáním kuchyňské soli do kohoutkové vody, v níž byly dosud prováděny experimenty. Jako praktická hodnota slanosti vody byla zvolena salinita mořské vody, která v průměru činí cirká 3,23 ‰hm. Procentuální množství soli rozpuštěné v mořské vodě je různé v každém z moří. Obecně lze říct, že se stoupající teplotou mořské vody stoupá i její salinita a zvolená hodnota 3,23 ‰hm odpovídá spíše chladnějším mořím, například severní části Tichého oceánu.

Nutné množství soli pro dosažení požadované koncentrace ve vodě bylo spočteno z hmotnostního zlomku²⁰ (σ_s):

$$\sigma_s = \frac{m_s}{m_s + m_v} \quad (4.2)$$

Z toho jednoduchou úpravou:

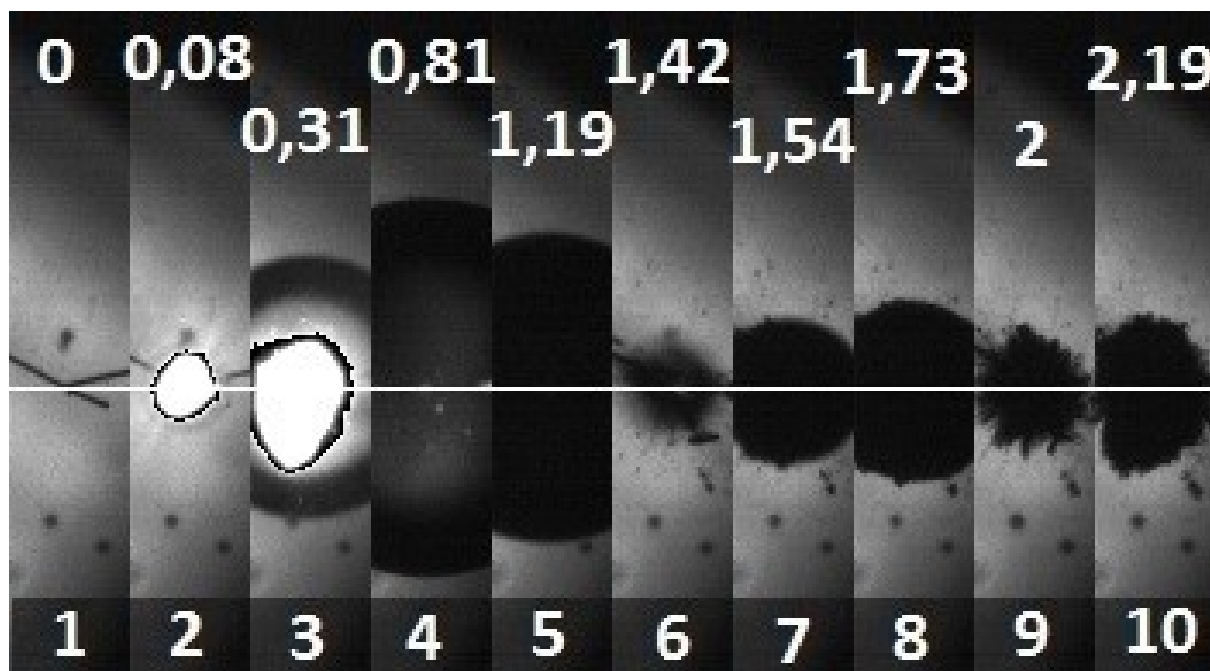
$$m_s = \frac{m_v \cdot \sigma_s}{1 - \sigma_s} = \frac{15 \cdot 0,0323}{1 - 0,0323} = 0,5 \text{ kg} \quad (4.3)$$

Symboly m_s a m_v značí hmotnost soli a hmotnost vody v akváriu. Pro dosažení slanosti 3,23 ‰hm je nutné do 15 l kohoutkové vody přisypat 0,5 kg soli.

²⁰ Hmotnostní zlomek (σ_s) odpovídá koncentraci (c).

Toto opatření zvýšilo efektivitu přeměny energie kondenzátorů na energii bubliny dle předpokladu, bylo ovšem dosaženo i nežádoucího efektu zvýšení koroze elektrod. Zvýšená vodivost vody napomáhá její elektrolýze, k níž nutně musí docházet při přivádění elektrického napětí na kovové elektrody do ní ponořené. Během procesu elektrolýzy se na elektrodách vylučují ionty ve vodě rozpuštěných látek, které opět snižují průchod elektrické energie a to především ve styku elektrod, kde dochází k tvorbě dutiny a na kontaktech ponořených ve vodě. Proto bylo nutné v pravidelných intervalech čistit povrch zakončení elektrod a kontaktů smirkovým papírem (hrubost 800) kvůli zachování opakovatelnosti bublin v maximální možné míře.

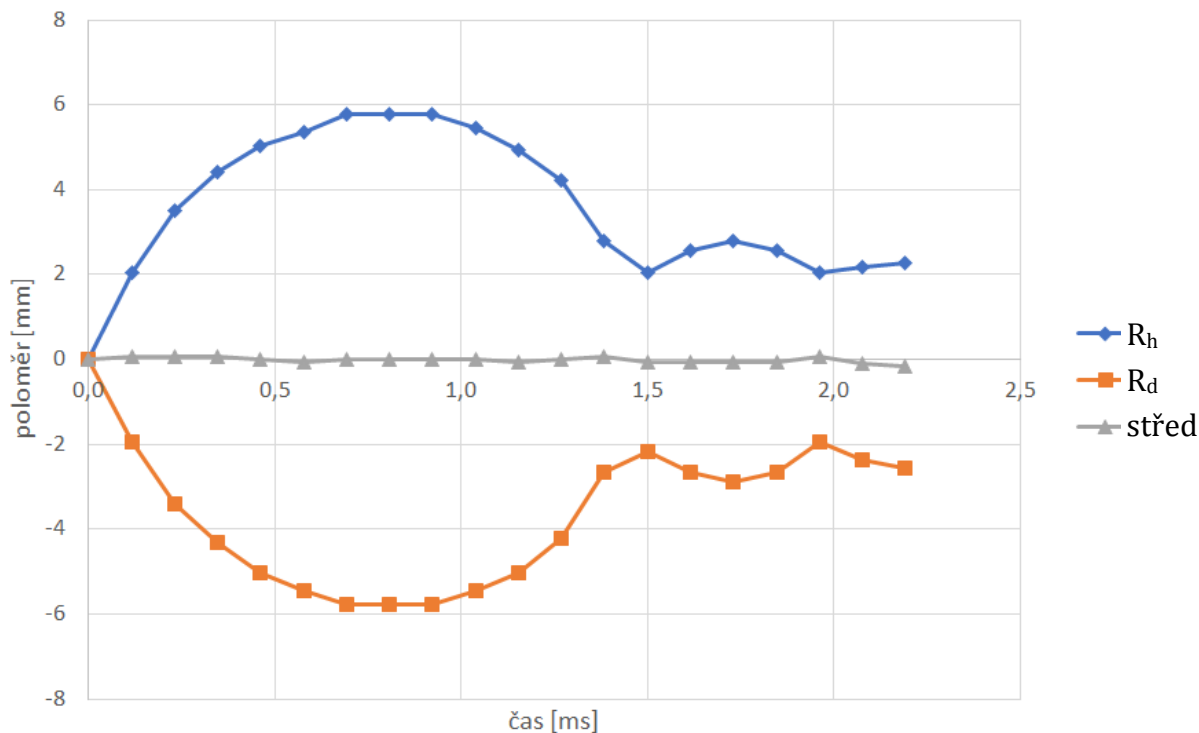
Bubliny v této sadě experimentů dosáhly velikosti prvního maxima průměrně 5,8 mm, což je paradoxně méně než u bublin tvořených v kohoutkové vodě, kvalita bublin se však velmi zlepšila. S velkou pravděpodobností za tímto stojí i fakt, že sůl zvyšuje povrchové napětí vody. Nicméně stále nedocházelo k měřitelnému vzplývání kavitačních bublin, což je dobře viditelné na následujícím obrázku a zejména grafu (Obrázek 4.4 a Graf 4.5).



Obrázek 4.4 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (3,23 %hm), frekvence snímání 26 kHz

Snímek číslo 8 zachycuje 2. maximum vcelku pravidelného kulovitého tvaru. Už jen tento fakt značí vyšší energii bubliny. Na snímku číslo 10 je patrný nesymetrický „výtrysk“ pozůstatků kavity s převládajícím směrem svisle dolů, což znesnadnilo měření rozměrů a je to rovněž patrné z pravé části grafu znázorňujícího průběh života této dutiny (viz

Graf 4.5). Nicméně dle výzkumu [12] se vzplývavý pohyb bubliny děje během jejích kolapsů avšak v časových oblastech mimo kolapsy zůstává bublina prakticky v konstantní hloubce. Proto tento výtrysk výrazně neovlivňuje měření vzplývání bubliny.



Graf 4.5 – průběh života bubliny v čase (4. sada experimentů)

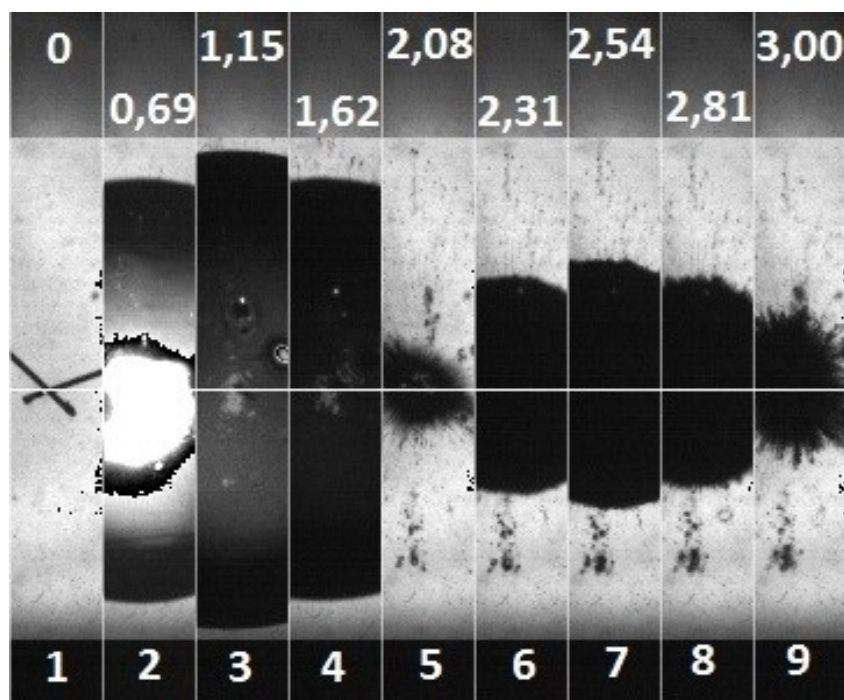
4.6 Pátá sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	66 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	slaná (3,85 %hm)

Podle vzoru předchozí sady experimentů byla přisypána další sůl do vody, až se její slanost zvýšila na 3,85 %hm. Zvýšením salinity kapaliny bylo dosaženo kvalitnějších bublin. Zvětšily se rozměry, což při zachování ostatních parametrů aparatury vypovídá o větší míře energie předané bublině. S většími rozměry se rovněž prodloužil život kavit a doba, po kterou zachovávaly kulovitý tvar. Samotné prodloužení „života“ bublin se promítlo i do délky časových úseků poblíž kolapsů, které tím pádem byly snáze zazna-

menatelnými, nicméně samotný okamžik kolapsu bubliny není z hlediska výzkumu vzplývání podstatný.

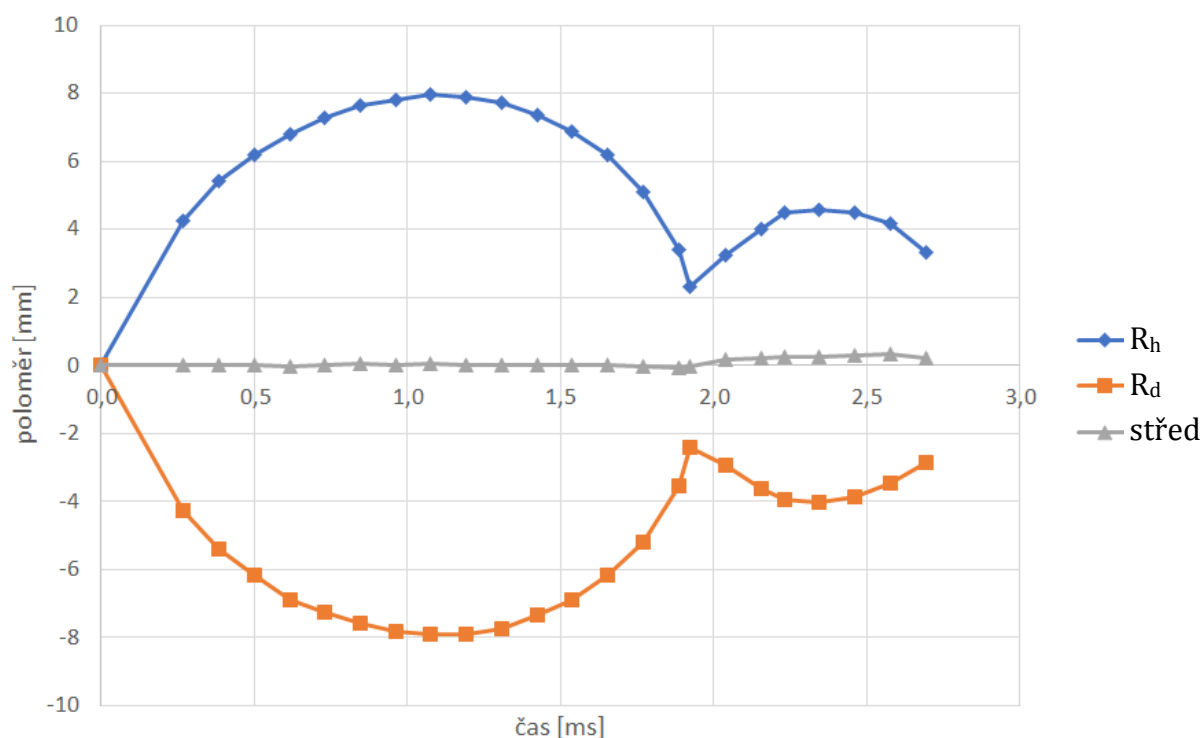


Obrázek 4.5 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (3,85 %hm), frekvence snímání 26 kHz

Na předchozím obrázku je již lehce patrný posun bublinky vzhůru po prvním kolapsu. Nejlépe je to však znatelné na snímku č. 9, jenž zachycuje druhý kolaps, kde se bublina opět posouvá směrem vzhůru vůči předchozí poloze. Jedná se o první nastavení aparatury, při kterém bubliny pozorovatelně vzplývají. Průměrná velikost poloměru bublin v prvním maximu pro tuto sadu je 8,22 mm. Takto výrazná změna oproti předchozí slanosti vody je pravděpodobně způsobena i vnějšími vlivy, jako je atmosférický tlak nebo čistší kontakty ponořené ve vodě.

Průměrná velikost vzplývání byla naměřena a spočtena jako 0,21 mm mezi prvním a druhým maximem. Velikost vzplývání je vypočtena jako rozdíl vertikální polohy středu bubliny během prvního a druhého maxima. Jelikož bublina během prvního kmitu prakticky nevzplývá a její střed je položen za počátek souřadného systému, lze postup měření velikosti vzplývání zjednodušit a změřit pouze výšku bodu styku elektrod a výšky dolního a horního okraje stínu bubliny v druhém maximu. Tímto zjednodušením odpadá práce s hledáním prvního maxima a měření jeho rozměrů.

Graf 4.6 je z pravé strany ukončen druhým kolapsem, protože zpracování dalších dat pro výzkum vzplývání bublinek není nutné.



Graf 4.6 – průběh života bubliny v čase (5. sada experimentů)

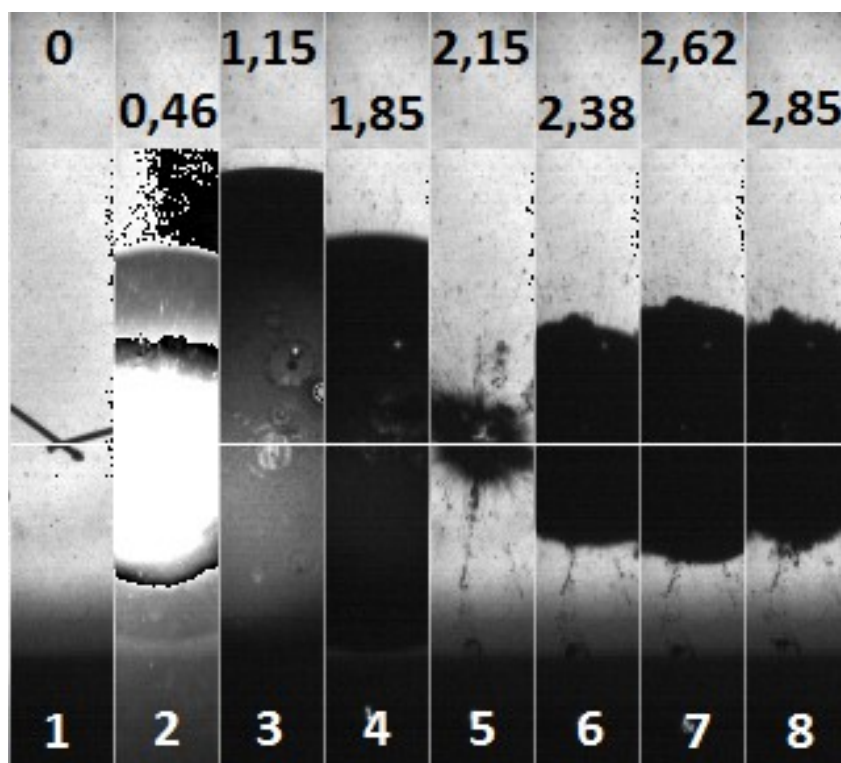
4.7 Šestá sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

el. napětí	66 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	slaná (4,4 ‰)

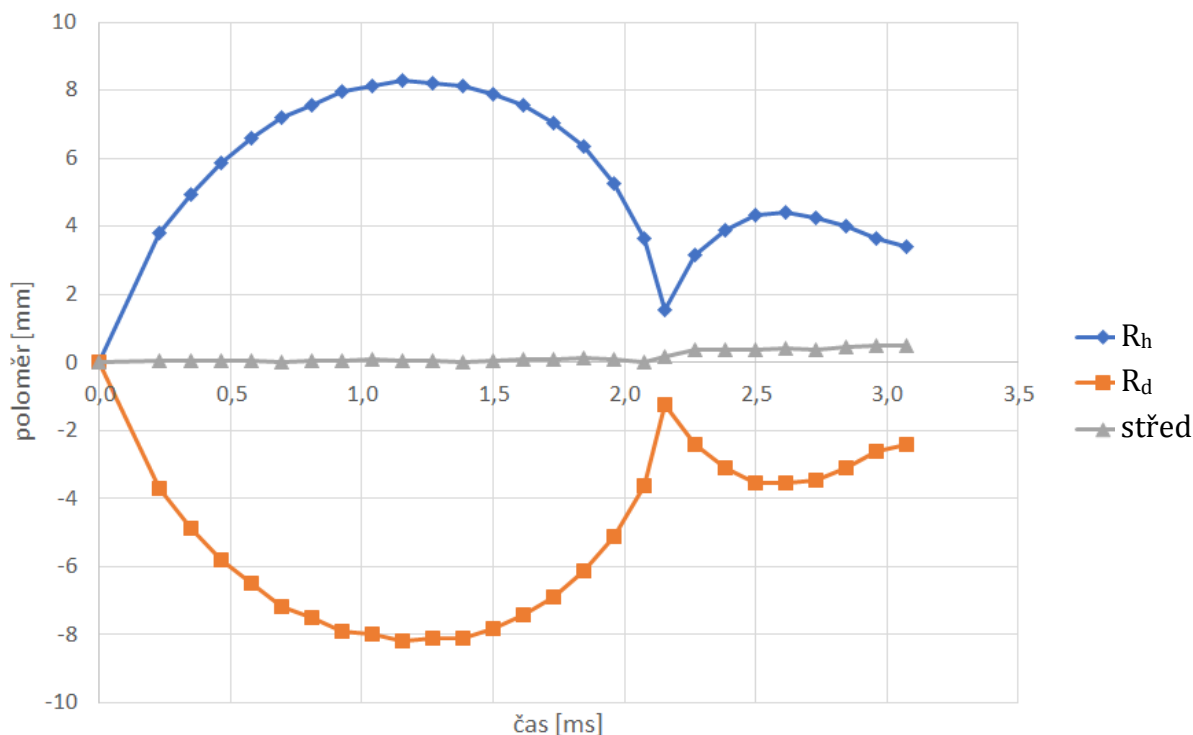
Na tomto místě se nabízí úvaha, zda je intenzita vzplývání kavitačních bublin přímo úměrná množství soli rozpuštěné ve vodě, v níž probíhají experimenty. Slaná voda má vyšší hustotu než voda sladká, čímž se zvětší vztlaková síla působící na bublinu. Výraznějším faktorem měnícím vztlakovou sílu je však poloměr kavity, jelikož ji ovlivňuje ve třetí mocnině. Ve většině případů byly bublinky vytvořené ve slané vodě větší, než ve sladké, tudíž i vztlaková síla byla větší. Další parametr, který sůl ve vodě výrazně ovlivňuje je povrchové napětí, které se s množstvím soli zvyšuje. Povrchové napětí ovlivňuje především tvar bubliny – bublina v kapalině s vyšším povrchovým napětím déle zachová kulovitý tvar, než se začne rozpadat a snáze se měří její rozměry. Bubliny by tedy měly

vzplývat výrazněji ve slané vodě, což potvrzuje i tato sada experimentů, jejíž průměrná velikost vzplývání je 0,29 mm.



Obrázek 4.6 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (4,4 %hm), frekvence snímání 26 kHz

Obrázek 4.6 vyobrazuje ne zcela správně pořízený záznam života kavity. Na snímku číslo 3 je patrné nevhodné nastavení osvětlení, neboť nelze rozeznat spodní okraj bubliny. Pro studium vzplývání kavitace to však není výrazným problémem, protože během prvního kmitu bubliny prakticky nevzplývá a její střed je možné určit buď z okolních pozic bubliny, které jsou zřetelné nebo přímo z pozice styku elektrod, jak bylo již vysvětleno v předchozí kapitole.



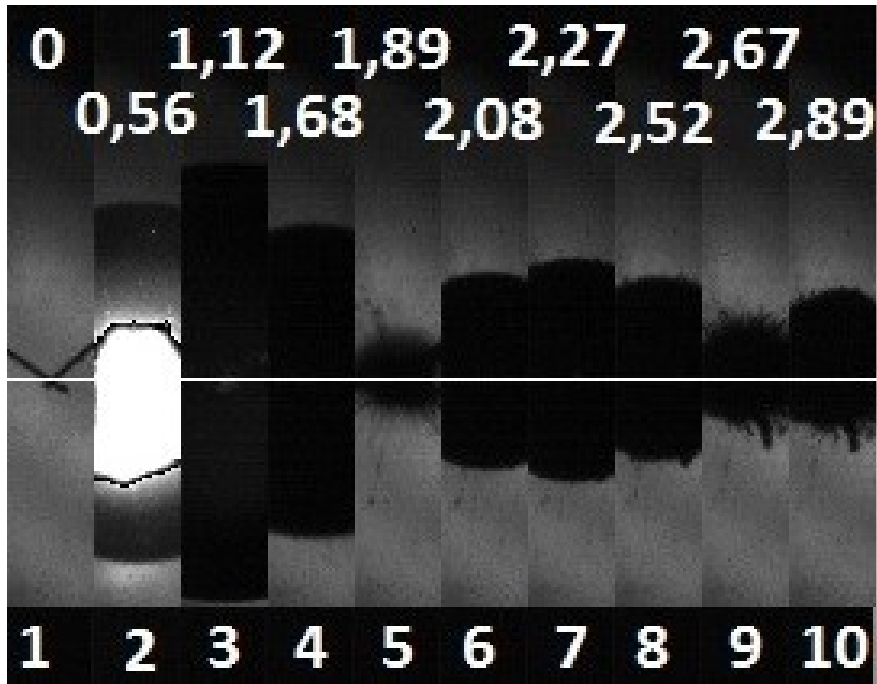
Graf 4.7 – průběh života bubliny v čase (6. sada experimentů)

4.8 Sedmá sada experimentů

Důležité parametry sady experimentů:

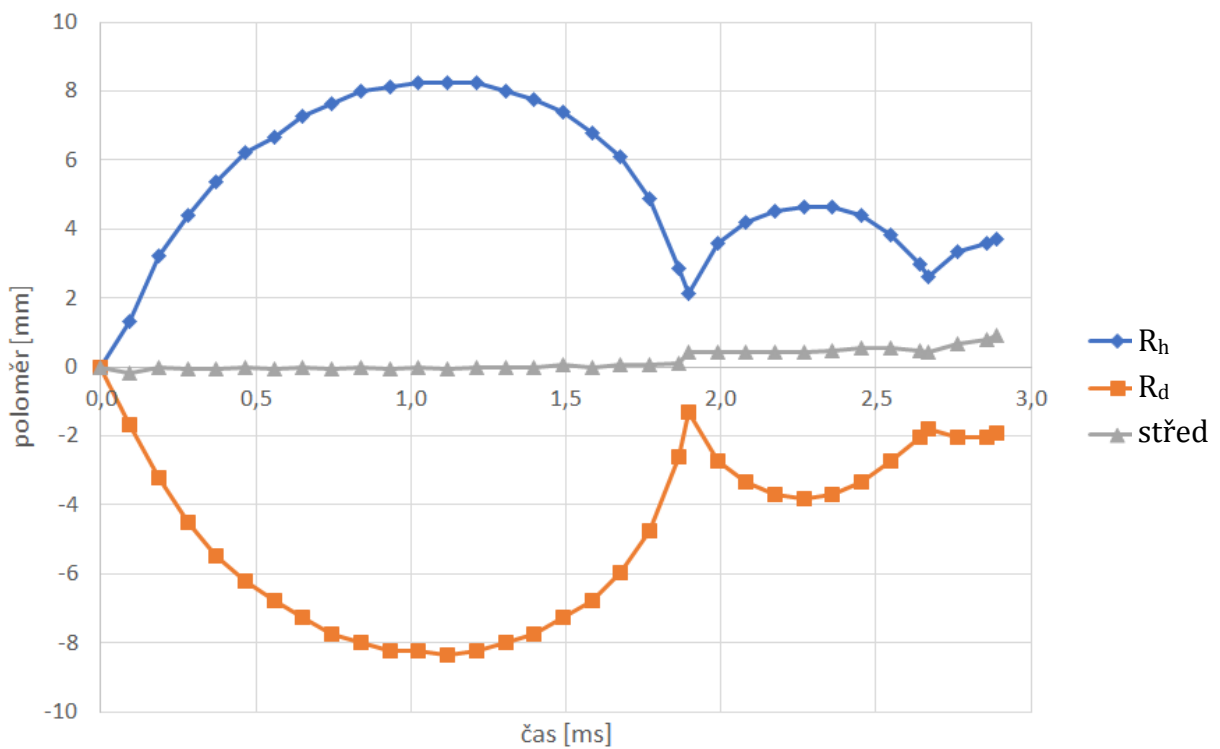
el. napětí	66 V
frekvence snímání	26 kHz
voda	slaná (4,76 %hm)

Zvýšením koncentrace soli ve vodě na 4,76 %hm došlo i k výraznému zvětšení vzplývání, ale také k výraznému zmenšení prvního maximálního poloměru. Průměrná velikost bublin při tomto nastavení aparatury byla 7,44 mm a průměrný vertikální posun mezi prvními dvěma maximy činil 0,45 mm.



Obrázek 4.7 – život bubliny: el. napětí 66 V, slaná voda (4,76 %hm), frekvence snímání 26 kHz

Graf 4.8 názorně zobrazuje předpokládané chování kavity popsané již výzkumem Vokurky v [12] a to skokový pohyb vzhůru v okamžicích kolapsů. Toto chování je dobře patrné i z obrázku níže.



Graf 4.8 – průběh života bubliny v čase (7. sada experimentů)

4.9 Porovnání různých slaností vody

Za účelem prozkoumání vlivu slanosti kapaliny na vzplývání a velikost kavitačních bublin byla provedena řada dalších experimentů s různou koncentrací soli. Celkem bylo otestováno 9 různých hodnot salinity od 3,23 ‰ až po 6,37 ‰ na 103 bublinách. Jelikož jsou výsledky jednotlivých sad experimentů velmi podobné, bylo přistoupeno ke zkrácení a shrnutí této části práce. Ostatní, výše nepublikované grafy průběhů životů referenčních bublin jsou v přílohách A-E. V příloze F je grafické porovnání průběhů životů všech referenčních bublin.

Ve většině případů navyšování salinity bylo postupováno přisypáváním po 120 g soli, několikrát ovšem byla provedena výjimka v pravidelnosti nikoliv však záměrná. Důvodem vytvoření výjimky bylo například neočekávané vnuknutí nápadu zkusit změnit podmínky, či ověřit určitou hypotézu, načež navázat na předchozí měření.

Tabulka 1 – porovnání vybraných vlastností bublin s různou koncentrací soli

slanost [%hm]	R_{M1} [mm]	h [mm]	h/R_{M1} [-]	F_{vz} [mN]	t_{M1} [ms]	t_{Mm1} [ms]	t_{Ray} [ms]
0	6,61	0	0	11,84	1,03	0,928	0,701
3,23	5,80	0	0	9,05	0,78	0,577	0,515
3,85	8,22	0,21	0,025	23,37	1,19	0,859	0,764
4,4	8,05	0,17	0,020	22,05	1,13	0,949	0,767
4,76	7,01	0,45	0,070	18,23	1,11	0,761	0,791
4,94	7,49	0,12	0,016	17,86	1,10	0,894	0,711
5,3	7,86	0,37	0,046	20,76	1,10	0,778	0,770
5,53	7,73	0,10	0,013	19,69	1,10	0,821	0,738
5,84	7,61	0,65	0,085	18,86	1,08	0,851	0,738
6,37	6,79	0,34	0,050	13,40	1,03	0,674	0,662

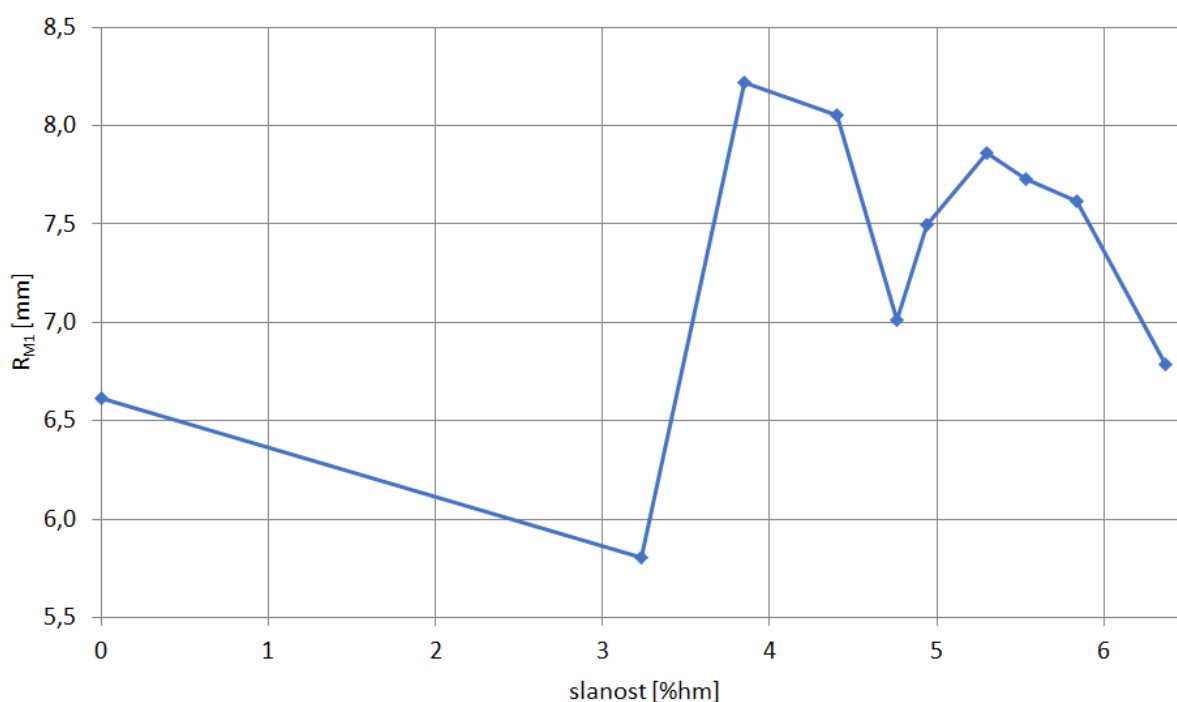
Tabulka 1 poskytuje naměřená a dopočtená data²¹ bublin pro různé hodnoty koncentrace soli ve vodě. Jednotlivé veličiny značí popořadě zleva doprava: slanost vody, poloměr bubliny v prvním maximu, velikost vzplývání, bezrozměrný parametr vzplývání, vztlačkovou sílu, čas dosažení prvního maxima, čas mezi prvním maximem a minimem

²¹ V tabulce jsou uvedeny pouze zprůměrované hodnoty, aby bylo možné data určitým způsobem porovnat. Hodnoty t_{Mm1} a t_{Ray} jsou zaokrouhlena na 3 platná místa z důvodu přesnějšího rozlišení jednotlivých hodnot.

a Rayleighův čas (viz kapitola 4.9.2), jenž teoreticky popisuje délku časového úseku mezi prvním maximem a minimem. Tučně jsou zvýrazněny nejvyšší hodnoty, jen u Rayleighova a reálného času jsou tučně zvýrazněny hodnoty s nejlepší shodou. Za účelem zpřehlednění a zlepšení čitelnosti dat bylo z tabulky vytvořeno několik samostatných grafů.

4.9.1 Vliv slanosti na velikost bubliny

Jak bylo možné pozorovat již dříve, zdá se, že zvyšující se koncentrace soli ve vodě způsobuje nejprve prudký nárůst a poté postupné zmenšování průměrné velikosti bublin v jejich prvním maximu. Z grafu níže je patrná jistá nekonzistentnost dat, která je pravděpodobně způsobena více faktory, mezi něž patří například příliš malé statistické vzorky jednotlivých hodnot slanosti vody. Dalším příkladem významného faktoru je nekonzistentnost podmínek pro každou sadu měření, která byla komentována už dříve v této práci.

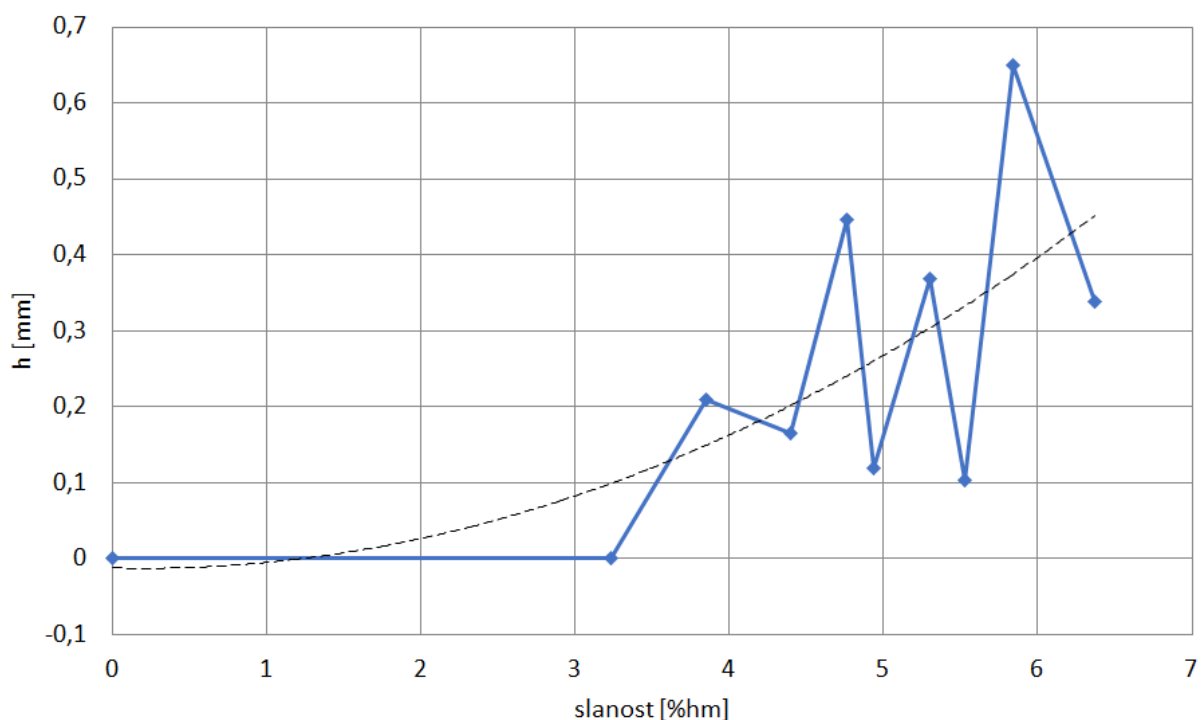


Graf 4.9 – závislost velikosti bubliny v prvním maximu na míře slanosti vody

4.9.2 Vliv slanosti na velikost vzplývání

V grafu 4.10 znázorňujícím závislost velikosti vzplývání kavit na salinitě vody je zřejmá silná rozkolísanost dat jednotlivých koncentrací, nicméně trend vyjádřený regresním

polynomem (přerušovaná křivka, rovnice (4.4)) je zřejmý. Patrně i přes zmenšující se velikost bublin s rostoucí salinitou, tedy zmenšování vztlakové síly, vzplývavost bublin roste. Lze očekávat přiblížení dat tomuto polynomu při dostatečném zvětšení počtu položek statistického vzorku.



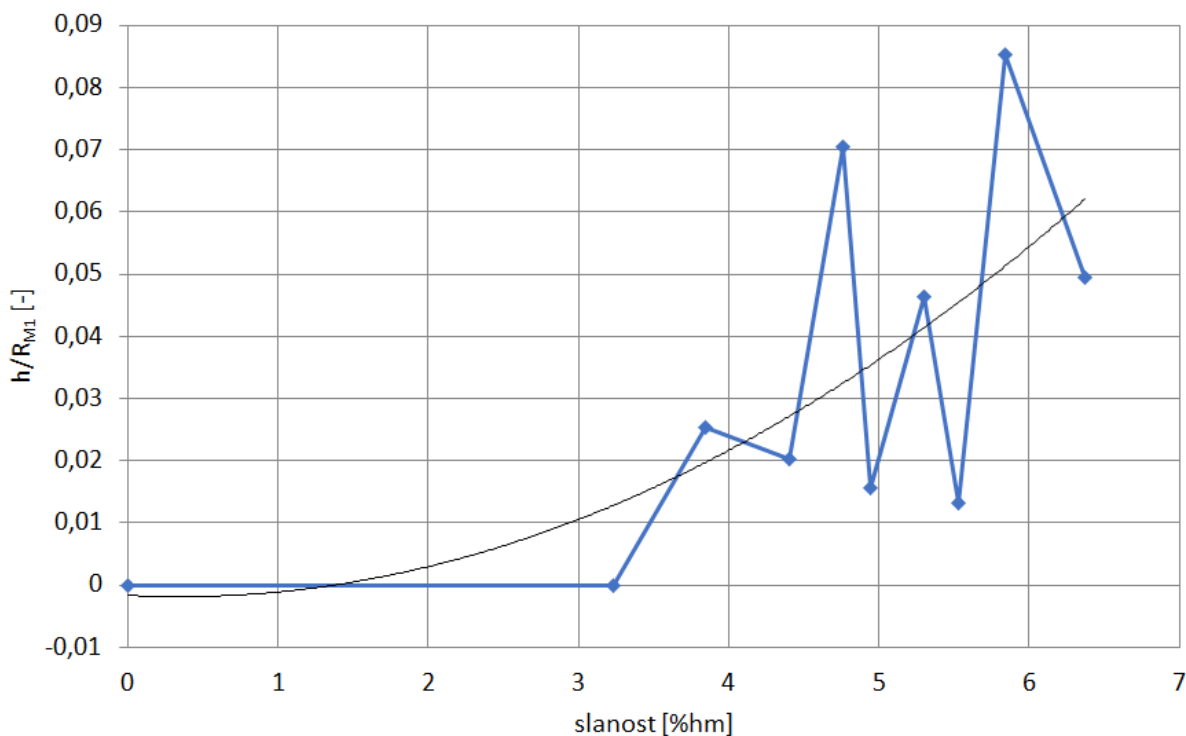
Graf 4.10 – závislost velikosti vzplývání na slanosti vody

Jelikož jsou data v grafu výše poněkud nekonzistentní, byl vytvořen regresní polynom k získání trendu těchto dat. Polynom byl vytvořen pomocí funkce tabulkového SW MS Excel.

$$h = 0,0122 \cdot c^2 - 0,005 \cdot c - 0,0123 \quad (4.4)$$

Symbol c v rovnici regresního polynomu označuje koncentraci soli ve vodě.

Aby byla odstraněna závislost míry vzplývání na velikosti poloměru bubliny v prvním maximu, byla velikost vzplývání převedena na bezrozměrný součinitel vzplývání. Graf závislosti tohoto součinitele na slanosti je uveden níže.



Graf 4.11 – závislost bezrozměrného parametru vzplývání na slanosti vody

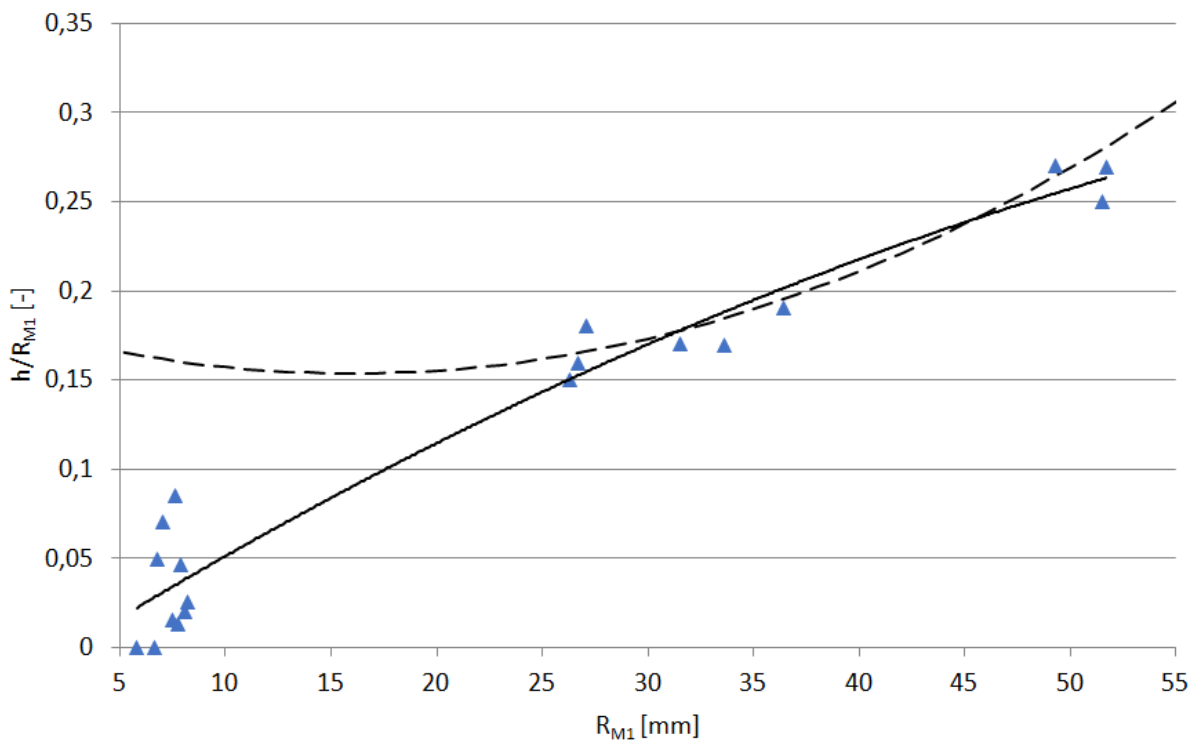
V předešlém grafu je použit regresní polynom vytvořený funkcí tabulkového editoru MS Excel pro úpravu grafů. Tento polynom znázorňuje trend, kterým se ubírají hodnoty závislosti. Rovnice regresního polynomu je následující:

$$\frac{h}{R_{M1}} = 0,0018 \cdot c^2 - 0,0012 \cdot c - 0,0017 \quad (4.5)$$

Proměnná c zastupuje koncentraci soli ve vodě v hmotnostních procentech.

4.9.3 Bezrozměrný parametr vzplývání

Níže následující graf dává do závislosti bezrozměrný parametr vzplývání s poloměrem v prvním maximu bubliny. Vlevo dole jsou průměrné hodnoty jednotlivých slaností získané pro účely této práce a od poloviny horizontální osy doprava se nacházejí data naměřená Vokurkou v [12], na něž tato práce navazuje.



Graf 4.12 – bezrozměrný parametr vzplývání v závislosti na poloměru prvního maxima bubliny

Vokurkou odvozený regresní polynom je vyznačen přerušovanou čarou. Po sloučení dat do jednoho diagramu lze proložit data nově vytvořeným regresním polynomem (viz rovnice (4.6)), jenž je znázorněn plnou čarou. Tento nový regresní polynom byl vytvořen pomocí funkce pro zpracování grafů tabulkového SW MS Excel:

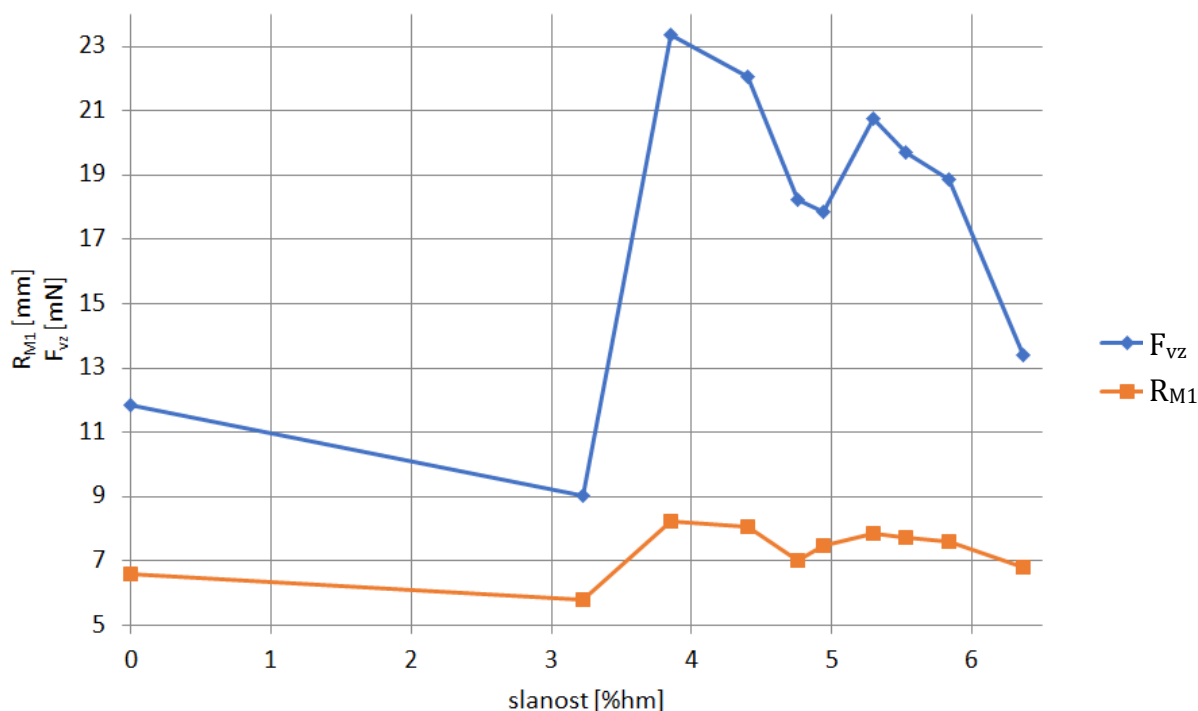
$$\frac{h}{R_{M1}} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot R_{M1}^2 + 0,0075 \cdot R_{M1} - 0,02 \quad (4.6)$$

Je velmi pravděpodobné, že při dalším rozšíření intervalu naměřených dat se regresní polynom znovu změní. Na první pohled je zřejmý příliš úzký interval poloměrů prvního maxima bubliny pro tuto práci, jenž sahá od 5,80 mm až po 8,22 mm. Kdežto rozsah poloměrů v [12] je výrazně širší a nachází se v intervalu $\langle 26,33; 51,68 \rangle$ mm. Nicméně nový regresní polynom naznačuje lineární průběh této závislosti, neboť se od něj výrazně neliší.

Není zcela správné porovnávat tyto dvě sady hodnot bezrozměrného parametru vzplývání, neboť byly naměřeny za zcela odlišných podmínek počínaje metodou tvorby bublin, konče solí rozpuštěnou ve vodě.

4.9.1 Vliv slanosti na vztlakovou sílu

Vztlaková síla je závislá na třetí mocnině poloměru kavity, který je velice malý, proto je i vztlaková síla velmi malá. Nicméně malá změna poloměru působí díky třetí mocnině velkou změnu vztlakové síly. Závislost velikosti bubliny na slanosti je uvedena výše. Dále je vztlaková síla závislá na hustotě kapaliny, ve které jsou tvořeny bubliny, která se se stoupající slaností rovněž zvyšuje. Tato závislost je vyobrazena v grafu níže.



Graf 4.13 - Závislost vztlakové síly na slanosti vody

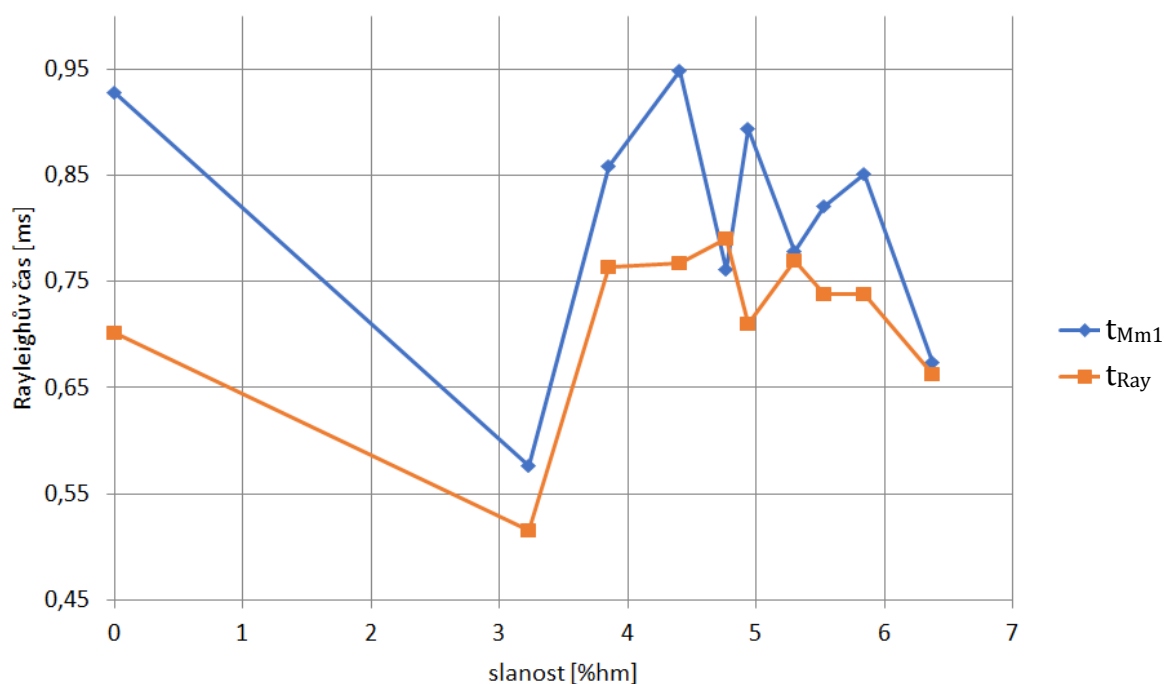
Z porovnání grafů závislostí vztlakové síly a velikosti poloměru prvního maxima bubliny na slanosti je dobře patrná výše zmiňovaná závislost vztlakové síly na třetí mocnině poloměru bubliny. Hodnoty vztlakové síly v tomto grafu i v tabulce v úvodu nadřazené kapitoly jsou zprůměrovány pouze z hodnot příslušícím polůměrům prvních maxim bublin.

4.9.2 Reálný versus Rayleighův čas

Rayleighův čas je charakteristický čas prvního kolapsu bubliny při užití Rayleigh-Plessetovy rovnice [19] a je dán vztahem (4.7)²²:

$$t_{Ray} \cong 0,915 \cdot R_{M1} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{p_o - p_s}} \quad (4.7)$$

Ve vztahu pro výpočet Rayleighova času značí p_o okolní tlak, tedy součet aerostatického tlaku nad hladinou a hydrostatického tlaku v úrovni středu bubliny pod hladinou. Ostatní veličiny již byly popsány dříve. Hodnota aerostatického tlaku byla odečtena z aktuálního meteorologického měření pro město Liberec. Tímto do výpočtu vnikla vyšší, avšak stále únosná míra nejistoty, kterou by bylo možno eliminovat aktuálním měřením aerostatického tlaku přímo v laboratoři.



Graf 4.14 – srovnání Rayleighova času s reálným časem v závislosti na slanosti

Jak vidno v tabulce a následně i v grafu výše, průběh Rayleighova času více či méně koresponduje s průběhem reálného času (t_{Mm1}) odečteným při zpracovávání záznamů

²² Vztah je uveden ve zjednodušeném tvaru, pro účely této práce je to však dostačující.

bublin, avšak u téměř všech hodnot salinity je Rayleighův čas kratší než reálný čas mezi maximem a kolapsem bubliny. Nejbližší shoda je u koncentrace 5,3 ‰. Rayleighův čas je teoretický výpočet, jenž zahrnuje určitá zjednodušení, ideální podmínky prostředí a ideální podmínky vzniku bubliny. Protože podmínky pro tvorbu experimentálních bublin jsou rozdílné od ideálních, jsou i naměřené hodnoty rozdílné.

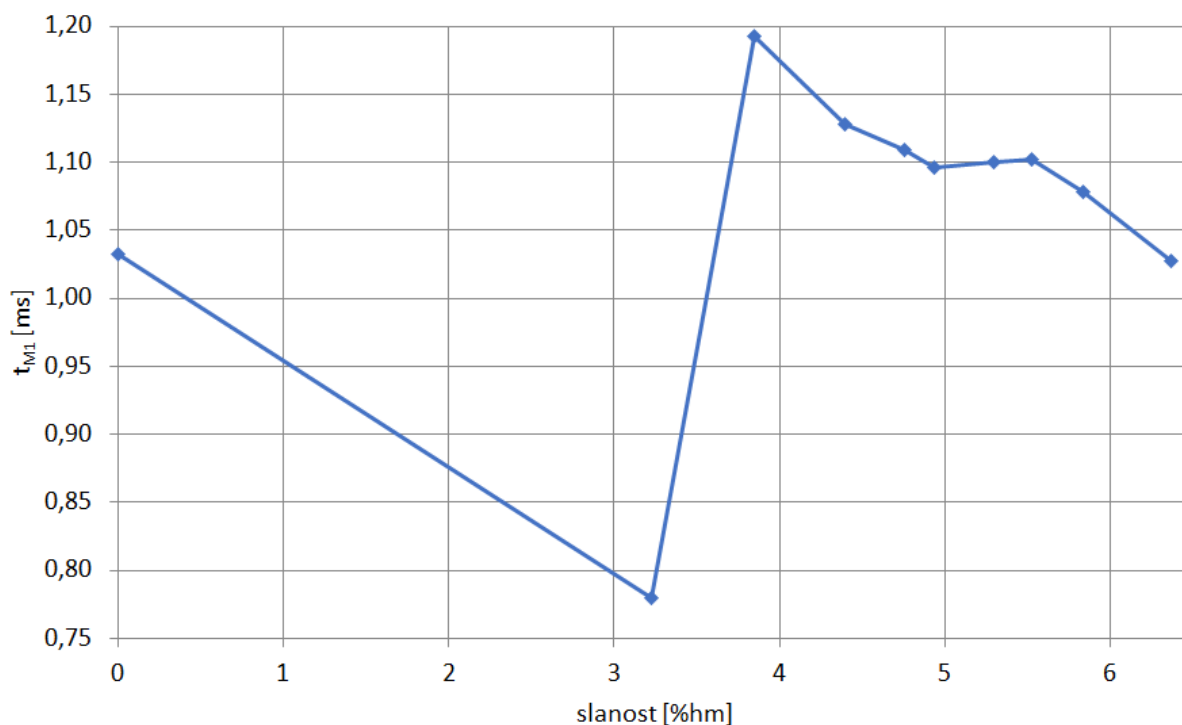
4.9.3 Vliv slanosti na čas prvního maxima

Slanost, jak bylo popisováno již výše, nebyla přímo měřena, nýbrž dopočítávána z hmotnostního zlomku na základě množství přisypané soli. Čas dosažení prvního maxima bubliny byl dopočítáván z čísla snímku, na kterém bylo první maximum zachyceno rychlostní kamerou. Jelikož je známa frekvence pořizování snímků, tedy četnost snímků v daném časovém úseku, odpovídá číslo snímku počtu zlomků tohoto časového úseku²³, jinými slovy času pořízení snímku, bráno od počátku snímání. Pokud je odečtena prodleva od počátku snímání po počátek vzniku bubliny, je brán jako nulový čas právě počátek tvorby bubliny, čímž je získán potřebný časový údaj v rámci doby „životu“ bubliny. Pokud je toto vyjádřeno rovnicemi, vypadá to následovně:

$$t_{M1} = \frac{\check{c}_{M1} - \check{c}_p}{f} \quad (4.8)$$

Veličiny \check{c}_{M1} , \check{c}_p a f v předchozí rovnici označují číslo snímku prvního maxima bubliny, číslo snímku počátku tvorby bubliny a frekvenci snímání. Čas t_{M1} je počátkem pro Rayleighův čas (viz kapitola 4.9.2).

²³ Běžně se převrácená hodnota frekvence označuje jako perioda, tedy v tomto kontextu „počet period“.



Graf 4.15 – závislost času dosažení prvního maxima bubliny na slanosti vody

Čas t_{M1} popisuje, jak rychle bylo dosaženo prvního maxima bubliny od počátku jejího vzniku. Je zde jistá podobnost se závislostí velikosti prvního maxima bubliny na slanosti, nicméně čas dosažení prvního maxima je zřejmě závislý i na jiné veličině, neboť jeho závislost na slanosti nekopíruje přesně závislost velikosti poloměru prvního maxima bubliny na slanost. Dalšími veličinami ovlivňující čas dosažení prvního maxima bubliny mohou být například viskozita prostředí, jež je mírou odporu proti rozpínání bubliny nebo hustota prostředí.

5 Závěr

Tato práce se zabývala výzkumem vzplývání kavitačních bublin ve volné kapalině. K uvedení čtenáře do této problematiky je v úvodu práce stručně popsána historie zkoumání kavitace s návazností na nejběžnější mechanismy jejího vzniku a tvorby spolu s příklady využití jednotlivých metod. Poté je navázáno popisem vlivů vedoucích ke vzplývání bublin spolu s vnějšími vlivy ovlivňujícími jejich chování. Další části se zabývají teoretickým rozbohem návrhu experimentu a jeho praktickou realizací, na což plynule navazuje metodika měření a zpracování nashromážděných dat. Poslední a nejdůležitější částí je samotné vyhodnocení experimentálních dat, s čímž je spojena formulace závěrů vyplývajících z těchto dat. Tyto závěry jsou částečně prezentovány přímo v jednotlivých kapitolách a poté jsou shrnuty zde.

V prvních třech sadách experimentů byla snaha měnit velikost kavit a především míru vzplývání pomocí změny elektrického napětí z 50 V na 60 V a nakonec na 66 V. Použití ještě vyšších hodnot el. napětí nebylo možné, z důvodu dosažení horní hranice zdroje el. napětí i kondenzátorové jednotky. Důvodem snahy zvětšit bubliny byl předpoklad větší vztlakové síly na větší objem bubliny. Změny velikostí bublinek se odehrávaly v intervalu velikostí poloměrů prvního maxima bublin od 2,72 mm až po 8,73 mm. Kýženého vzplývání však dosaženo nebylo. Kavity rovněž nevykazovaly tvarovou stabilitu po dostatečně dlouhou dobu, aby bylo možné měřit jejich rozměry i v druhém maximu. Rozpadaly se už krátce po prvním kolapsu, načež vzplývaly, ale pouze jako neforemný mrak mikrobublin a nečistot. Příliš brzký rozpad byl pravděpodobně způsoben nízkým povrchovým napětím a malou energií bubliny.

V následující sérii experimentů bylo přistoupeno k úpravám vlastností vody postupným přisypáváním kuchyňské soli. Tímto postupem bylo zvyšováno povrchové napětí, což vyústilo v pravidelný kulovitý tvar bublin s podstatně lepší tvarovou stabilitou. Některé bubliny dosáhly i třetího maxima než bylo jejich kmitání utlumeno a než došlo k jejich rozpadu. Všechny kavity vytvořené ve slané vodě se svou velikostí v prvním maximu nacházely v intervalu $\langle 3,81; 8,76 \rangle$ mm.

Při nižších koncentracích díky lepší vodivosti solného roztoku docházelo k efektivnějšímu přenosu energie z kondenzátorů na bubliny. U nižších koncentrací soli

nebylo pozorováno žádné vzplývání bublin. První slanost s pozorovatelným vzplýváním byla 3,85 ‰. S přibývajícím solím se však pravděpodobně určitá část energie spotřebovala na elektrolýzu vody, čímž lze vysvětlit klesající trend závislosti velikosti bublin na slanosti roztoku. Stoupající trend velikosti vzplývání i přes snižující se velikost bublin je však obtížně vysvětlitelný. Hydrodynamický odpor vlivem viskozity je dle [15] zanedbatelný, nicméně díky zvyšování slanosti roztoku se dynamická viskozita navýšila o přibližně 13 %, čímž se zvýšil i hydrodynamický odpor. Vliv velikosti bubliny na hydrodynamický odpor je minimální, jelikož odpor nastává při pohybu bubliny a to je během kolapsu, kdy je bublina nejmenší. Zatímco na vztlakovou sílu má velikost bubliny zásadní vliv. Díky změnám velikosti bubliny a hustoty vlivem slanosti vody se vztlaková síla nejprve zvýšila o cca 262 %, načež postupně klesla o téměř 200 %, rozdíl vztlakové síly při nulové a maximální koncentraci soli činí tedy cca 62 %. Pravděpodobný důvod zvyšující se vzplývavosti je zvyšování hustoty kapaliny, která však stoupla pouze o přibližně 4,5 %. Důvod nulového vzplývání kavitačních bublin ve vodě s nulovou nebo nízkou salinitou je autorovi neznámý.

Kvalita výzkumu by mohla být pozvednuta např. zvýšením počtu zpracovaných bublin, prováděním experimentů v tlakové komoře s možností řízení tlaku nebo alespoň měřením veličin ovlivňujících bubliny. Především se jedná o měření atmosférického tlaku, viskozity kapaliny, teploty, apod. Za účelem zjednodušení zpracování dat by bylo možné navrhnout program zpracovávající obraz, který by byl schopný vyhodnocovat velikost bublin a jejich vzplývání automaticky.

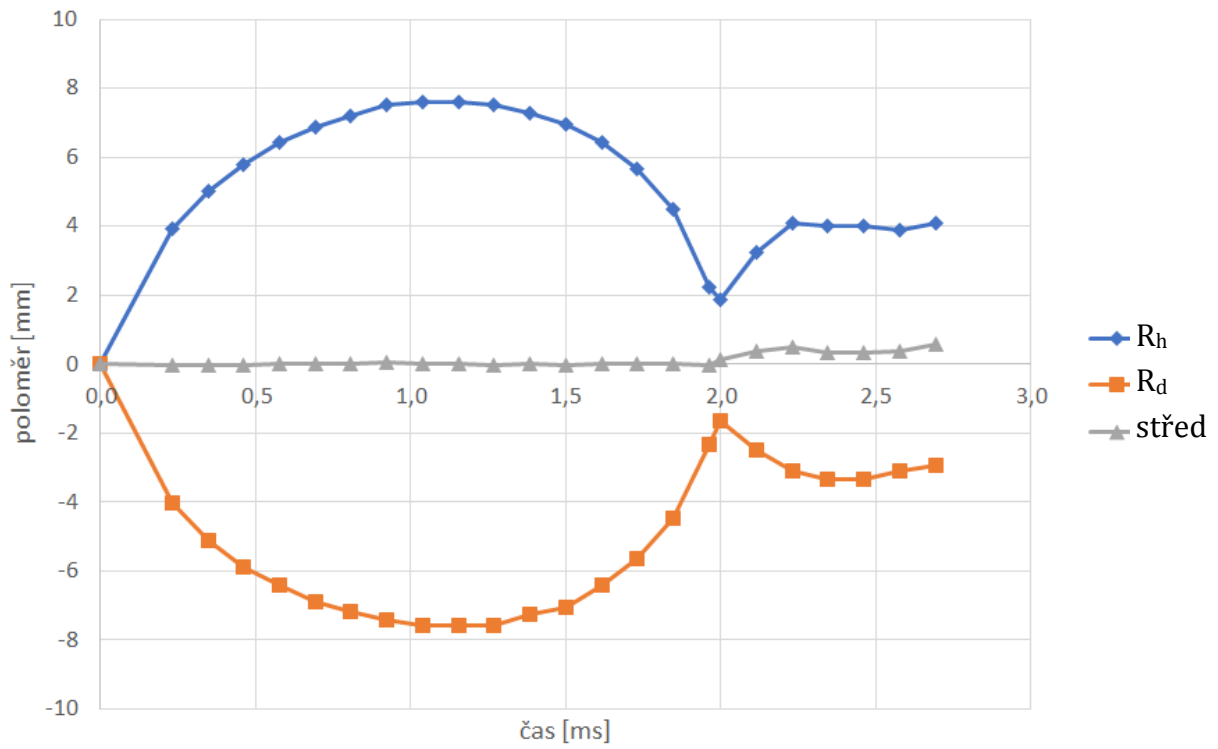
Náměty pro další závěrečné práce navazujících na tuto práci jsou např. experimentální výzkum vzplývání kavitačních bublin v závislosti na velikosti elektrického napětí nebo na koncentraci soli ve vodě. Případně zkoumání vlastností slané vody ovlivňujících nebo s potenciálem ovlivnit chování kavitačních bublin jako jsou hustota, dynamická viskozita, elektrická vodivost, aj.

Použitá literatura

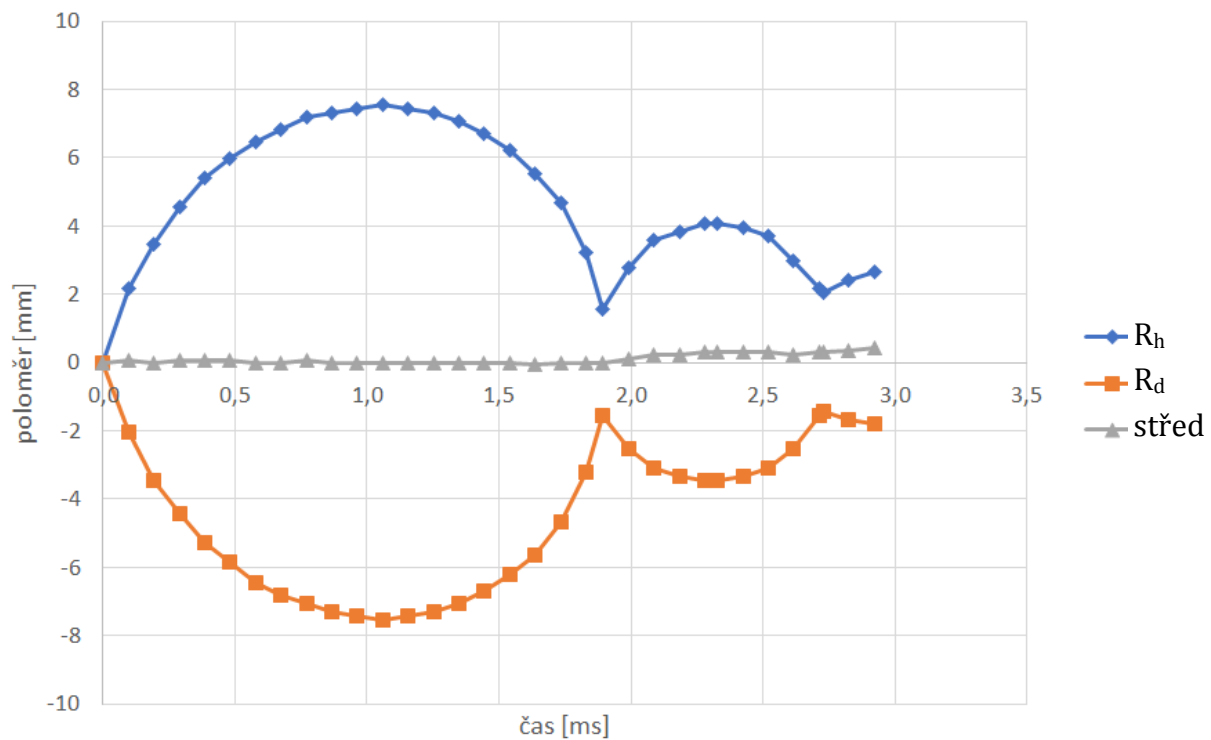
- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1969. 280s. ISBN 509-21-875.
- [2] Cole, R. H. *Underwater explosions*. Dover, New York, 1948.
- [3] HRAZDIRA, I., Morstein, V. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. 1. vydání. Brno: Neptun, 2001. 396 s. [ISBN 80-902896-1-4](https://doi.org/10.1038/428819a).
- [4] Kavitace - kavitační liposukce - LaserPlastic. LaserPlastic - Plastická chirurgie a estetická dermatologie Praha [online]. Copyright © 2021, [cit. 21. 12. 2021]. Dostupné z: <https://laserplastic.cz/liposukce-ultrazvukem-kavitace/>
- [5] PATEK, S., Korff, W. & Caldwell, R. Deadly strike mechanism of a mantis shrimp. *Nature* 428, 819–820 (2004). <https://doi.org/10.1038/428819a>
- [6] HUJER, J., *Studie kolapsu kavitačních bublin a jejich struktur v blízkosti povrchů*. DSpace Home [online]. Copyright © [cit. 31. 10. 2021]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/154578>
- [7] ASSZONYI, O., Zpracování naměřených signálů z kavitačních experimentů; (2019 - 125083) – VUT. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © 2021 VUT [cit. 31. 10. 2021]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/125083>
- [8] Příspěvatelé WikiSkript, *Kavitace* [online], © 2019, Datum poslední revize 14. 01. 2019, 09:26 UTC, [citováno 31. 10. 2021], Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Kavitace&oldid=420668>
- [9] HiLASE. *Laser Shock Peening* [online]. Copyright © 2022 HiLASE., [cit. 02.01.2022]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/nabizime/sluzby/laser-shock-peening/>
- [10] MÜLLER, Miloš. *Dynamic behaviour of laser-induced cavitation bubbles*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [11] ZNIDARCIC, A., Mettin, R., Cairos, C. & Dular, M. Attached cavitation at a small diameter ultrasonic horn tip. *Physics of Fluids*, 26, 023304 (2014).
- [12] VOKURKA, K., Experimental study of the zeroth order acoustic radiators buoyancy in liquids. The 93rd Acoustic Seminar, Mikulov na Moravě, 18. - 20. 10. 2016 (conference proceedings: České vysoké učení technické v Praze, Česká akustická společnost, October 2016, editors: M. Brothánek, R. Svobodová, ISBN: 978-80-01-06025-4, pp. 57-62, in Czech).

- [13] ZHANG, A., Cui, P., Cui, J., & Wang, Q. (2015). Experimental study on bubble dynamics subject to buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, 776, 137-160.
doi:10.1017/jfm.2015.323
- [14] CHAHINE, G. L. Numerical and experimental study of explosion bubble crown jetting behavior. Dynaflow, Inc. Technical Report. 96003-1, 1997.
- [15] VOKURKA, K. On Rayleigh's model of a freely oscillating bubble. III. Limits. *Czech J Phys* 35, 121–132 (1985). <https://doi.org/10.1007/BF01595624>
- [16] Cavitation phenomenon in control valves - MassFlow Inc. Home - MassFlow Inc. [online]. Dostupné z: <http://massflow.ir/2018/08/14/post002/>
- [17] NOŽIČKA, J. *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
- [18] SAMEK, L., Taraba, O., Brdička, M. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [19] FRANC, J.P. a J.M. Michel. *Fundamentals of Cavitation*. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-2233-3.

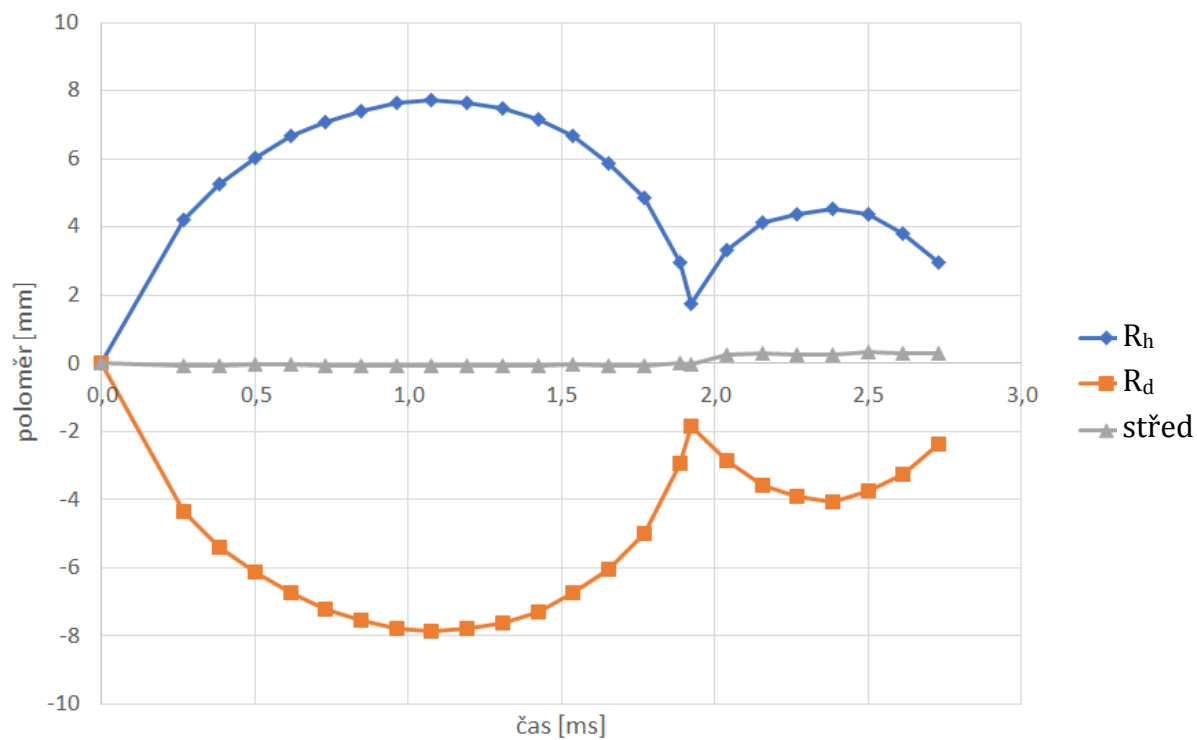
Příloha A – referenční bublina pro 4,94 %hm soli



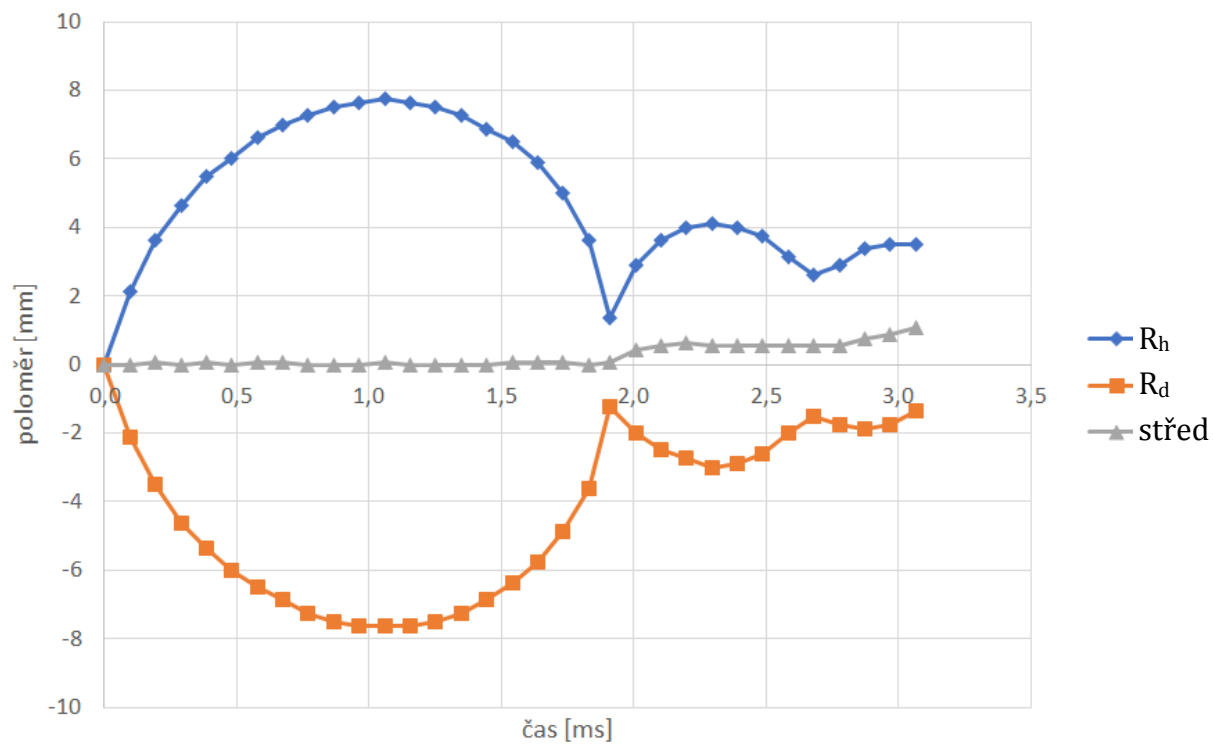
Příloha B – referenční bublina pro 5,30 %hm soli



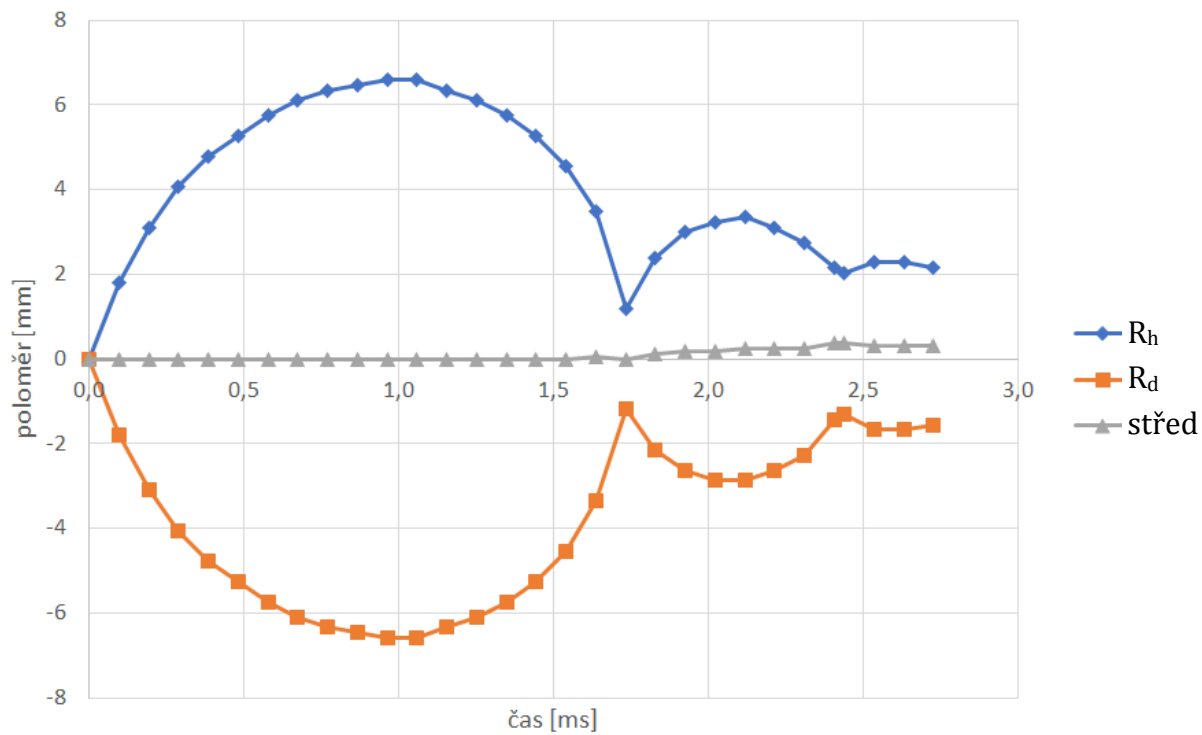
Příloha C – referenční bublina pro 5,53 %hm soli



Příloha D – referenční bublina pro 5,84 %hm soli



Příloha E – referenční bublina pro 6,37 %hm soli



Příloha F – porovnání průběhů referenčních bublin jednotlivých slaností

