



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Validace akustického bublinkového spektrometru

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Matěj Burda**
Vedoucí práce: Ing. Miloš Müller, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Validation of the acoustic bubble spectrometer

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Matěj Burda**
Supervisor: Ing. Miloš Müller, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matěj Burda**
Osobní číslo: **S15000039**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Validace akustického bublinkového spektrometru**
Zadávající katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Přehled metod pro určování určování kavitačního spektra.
2. Vysvětlení základního principu funkce akustického bublinkového spektrometru.
3. Příprava experimentu pro validaci.
4. Vyhodnocení a diskuze výsledků.

Rozsah grafických prací: 10 stran
Rozsah pracovní zprávy: cca 35 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

- [1] BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK, *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knižnice inženýra.
- [2] Duraiswami, R., Prabhukumar, S. and Chahine, G. L., *Bubble Counting Using an Inverse Acoustic Scattering Method*. J. Acoustical Society of America, 104 (5), November 1998.
- [3] Wu, X., Chahine, G. L., *Development of an acoustic instrument for bubble size distribution measurement*. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Volume 22, Issue 5, Supplement 1, Pages 330-336, October 2010.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloš Müller, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: 1. března 2018
Termín odevzdání bakalářské práce: 1. září 2019

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. března 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

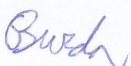
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 28.6.2018

Podpis: 

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Miloši Müllerovi, Ph.D. za vstřícný přístup a rady ohledně problematiky mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Hujerovi za poskytování konzultací a pomoc při řešení nastolených problémů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu a neteři Anetce za zlepšení nálady během těžkých chvil.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku měření spektra bublin, zejména pak na akustické metody jejich počítání. Podrobně seznamuje s fungováním akustického bublinkového spektrometru. Tento spektrometr byl zkonstruován speciálně pro měření velikostí bublin a jejich počtu v daném objemu kapaliny a pracuje na principu vyhodnocení útlumu akustického signálu. V teoretické části je popsáno generování bublin na elektrodách pomocí elektrolýzy, díky níž mohou být produkovány bubliny i malých velikostí, řádově v desítkách mikrometrů. Pro ověření faktorů ovlivňujících produkci bublin byla provedena měření s různými tloušťkami elektrod a různými hodnotami napětí. V rámci validace bylo pro porovnání s měřením pomocí bublinkového spektrometru provedeno snímání bublin prosvětlených laserem pomocí vysokorychlostní kamery, jejíž snímky byly analyzovány. Hodnoty získané měřením byly graficky zobrazeny a vyhodnoceny. Na základě konečných výsledků byly doporučeny další možnosti pokračování výzkumu v oblasti měření bublin a validace spektrometru, což byl cíl této bakalářské práce.

Klíčová slova: akustický bublinkový spektrometr, měření bublin akustickou metodou, generování bublin, optická metoda, kavitace

Abstract

This bachelor thesis is focused on the issue of the measurement of bubble spectrum – especially on the acoustic methods of their counting. It introduces the operation of the acoustic bubble spectrometer. This spectrometer has been specially designed to measure size of bubbles and their quantity in a given volume of the liquid and works on the principle of evaluation of the acoustic signal attenuation. Part of this thesis is description of the bubble generation from electrodes using electrolysis, whereby bubbles of even small sizes (in tens of micrometers) can be produced. To verify factors influencing bubble production, measurements were made with different electrode thicknesses and different voltage. As part of the validation, scanning of laser-lightened bubbles was performed for comparison with bubble spectrometer measurements using a high-speed camera, the imaging of which was further analysed. Measured values were graphically displayed and evaluated. Based on the final results, further possibilities for further research on bubble measurement and validation of spectrometer were recommended, which was the aim of this bachelor thesis.

Key words: acoustic bubble spectrometer, counting bubbles acoustically, bubble generation, optical method, cavitation

Obsah

Prohlášení	4
Poděkování	5
Abstrakt	6
Abstract	7
Seznam symbolů	11
Seznam zkratk	11
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Teorie bublin	14
2. 1 Statická rovnováha bubliny	15
2. 2 Generování bublin elektrolýzou	16
3 Metody pro určování kavitačního spektra	17
3. 1 Metoda ABS	17
3. 2 Metoda vysokorychlostního snímkování	17
3. 3 Trychtýřová metoda	18
4 Měření akustickým bublinkovým spektrometrem	19
4. 1 Princip metody	19
4. 2 Popis sestavy ABS	20
4. 2. 1 Převodníky	20
4. 2. 2 Tělo spektrometru s měřicí kartou	21
4. 2. 3 Software ABS	22
4. 3 Počáteční podmínky měření	23
4. 4 Kalibrační měření	24
4. 5 Vyhodnocení měření	25
5 Validační měření	27

5. 1 Měření vstupních parametrů.....	27
5. 2 Experiment	28
5. 2. 1 Příprava experimentu	28
5. 2. 2 Zadání vstupních parametrů	29
5. 2. 3 Průběh experimentu.....	30
5. 3 Zhodnocení měření pomocí ABS	30
5. 4 Měření optickou metodou	32
6 Závěr.....	36
Seznam použité literatury	38
Seznam příloh.....	40

Seznam symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
c	rychlost zvuku	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
g	gravitační zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
h	vzdálenost	m
M	molekulová hmotnost	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
N	počet bublin	1
p	tlak	Pa
p_p	tlak nasycených par	Pa
R	poloměr bubliny	m
t	teplota	$^{\circ}\text{C}$
U	napětí	V
δ	koeficient tlumení	1
η	dynamická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
κ	Poissonova konstanta	1
ξ	korelační konstanta	1
ρ	měrná hmotnost	kg/m^3
σ	povrchové napětí	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
ω	frekvence vlnění	Hz
ω_0	vlastní frekvence	Hz

Seznam zkratk

ABS akustický bublinkový spektrometr

DAQ získávání dat (data acquisition)

PMMA Polymethylmethakrylát

TUL Technická univerzita v Liberci

Seznam obrázků

Obrázek 1 Závislost pevnosti vody v tahu na teplotě	14
Obrázek 2 Závislost rovnovážného tlaku na poloměru bubliny	16
Obrázek 3 Vysokorychlostní kamera MotionPRO s objektivem.....	18
Obrázek 4 Schéma trychtýřové metody.....	18

Obrázek 5 Vysílající a přijímající převodník.....	20
Obrázek 6 Napěťová charakteristika převodníků	21
Obrázek 7 Tělo akustického bublinkového spektrometru	22
Obrázek 8 Ukázka z počítačového programu ABS	23
Obrázek 9 Graf závislosti velikosti středního poloměru bubliny na frekvenci	23
Obrázek 10 Průběh kalibračních signálů	25
Obrázek 11 Grafické znázornění výsledků softwaru ABS	26
Obrázek 12 Schéma experimentu	28
Obrázek 13 Realizace měření pomocí ABS	29
Obrázek 14 Graf spektra bublin zjištěného prvním měřením.....	31
Obrázek 15 Graf spektra bublin zjištěného druhým měřením.....	32
Obrázek 16 Bubliny prosvětlené laserem	33
Obrázek 17 Bubliny vyhodnocené softwarem MountainsMap	34
Obrázek 18 Porovnání objemového rozložení bublin při měření pomocí ABS a optickou metodou	35

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty získané vyhodnocením snímku vysokorychlostní kamery	34
---	----

1 Úvod

Akustický bublinkový spektrometr (ABS) je měřicí zařízení, které měří rozložení velikostí bublin plynu v kapalině a jejich objemový zlomek v celkovém množství kapaliny. Jedná se o jedno z mála zařízení, které je schopno měřit tyto faktory a zároveň převádět výsledky přímo do digitální podoby. Zjištění, zda spektrometr měří přesně a zobrazuje reálné výsledky, neboli provedení jeho validace, je nezbytné pro další zdokonalení znalostí o chování bublin a s ním související problematikou týkající se aplikace v průmyslových odvětvích. Jedná se především o kolabující kavitační bubliny, které způsobují erozi povrchu materiálu u hydraulických strojů (např. turbíny, čerpadla nebo tlumiče). Bubliny jsou také používány v medicínských aplikacích nebo pro čištění složitě přístupných povrchů. Proud bublin se dá používat k čištění vody, resp. odstranění pevných částic z ní, či jejímu okysličování.

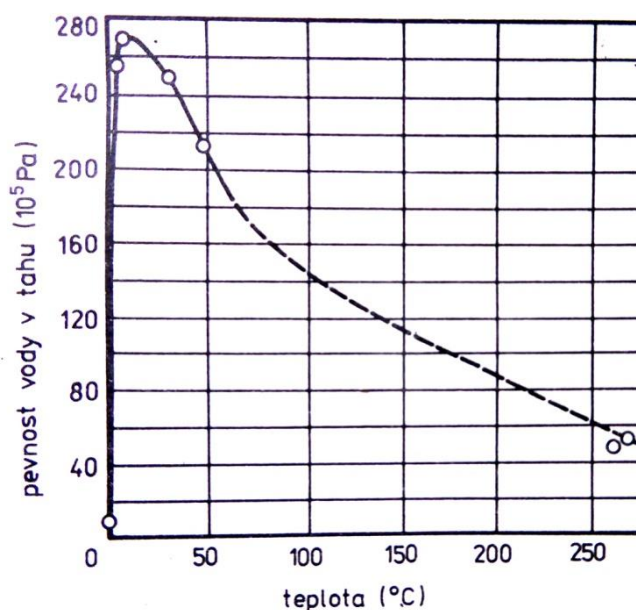
Specializované přístroje na měření bublin nejsou celosvětově příliš rozšířené a jejich užívání je i přes známý přínos spíše výjimečné, proto je vhodné provést validační měření, které umožní verifikaci výsledků naměřených tímto spektrometrem. Validace dat z akustického bublinkového spektrometru byla provedena roku 2001 a poté i 2010 firmou výrobce zařízení Dynaflow, Inc., který použil porovnání s optickou metodou ve formě snímkování vysokorychlostní kamerou. Validace na podobném principu bude provedena i v této bakalářské práci.

Cílem této bakalářské práce je udělat stručný přehled metod pro určování kavitačního spektra a bublinových charakteristik, které mají praktické využití. Dále pak vysvětlit základní princip funkce akustického bublinkového spektrometru a následně připravit experiment pro validaci a vyhodnotit jeho výsledky, aby mohlo být dosaženo optimalizace měření a zohlednění případných výpočetních nejistot při dalších experimentech.

2 Teorie bublin

Bubliny jsou obecně definovány jako dutiny v kapalině a nachází se zpravidla ve vícefázovém prostředí, ve kterém je hlavním spojitým médiem kapalina, v ní jsou rozptýlené jednotlivé bubliny. Ty mohou být uvnitř vyplněny buď plynem, parou kapaliny, nebo jejich směsí. Dutiny v kapalině jsou základním tématem jevu kavitace, který se jejich chováním zabývá. Popisuje nejen důvod vzniku bublin a jejich statické chování, ale i dynamiku, zánik a jeho praktické důsledky.

Bubliny v kapalině, která je považována za nestlačitelnou, mohou vznikat díky lokálnímu poklesu tlaku, díky němuž se z kavitačních jader, tedy zárodků bublin, mohou bubliny vyvinout. Na to je však potřeba překročit mez pevnosti kapaliny v tahu, čímž dojde k nespojitosti v dříve kompaktní kapalině, tedy porušení kohezních sil mezi molekulami a atomy média. Takto mohou vzniknout zárodky bublin, které se mohou dále rozvinout. Tahová pevnost kapaliny je ovlivněna řadou faktorů, například teplotou kapaliny, její smáčivostí nebo množstvím příměsí, z nichž zejména ty nerozpustitelné nebo lehce stlačitelné dokáží měnit pevnost v tahu i o několik řádů.



Obrázek 1 Závislost pevnosti vody v tahu na teplotě

[Brdička 1981, s. 131]

Nejběžnějším projevem, který je přirozený a s nímž se běžně setkáváme, je tzv. kavitační eroze. K té dochází převážně v hydraulických zařízeních, tedy čerpadlech, tlumičích, na lodních šroubech, atd., ve kterých vlivem poklesu tlaku vznikne na hranici kapaliny a pevného povrchu tělesa bublina, která vlivem poklesu tlaku zaniká. Její stěny

se začnou hroutit a během zániku dochází k značnému růstu teploty a tlaku, který provází silové účinky. Tyto účinky přesahují mez pevnosti i velmi odolných materiálů, a byť jen svým krátkodobým působením, dokáží rozrušit povrch zařízení. Pokud je tento jev opakovaný, lze pozorovat erozi materiálu v podobě malých děr i pouhým okem.

2. 1 Statická rovnováha bubliny

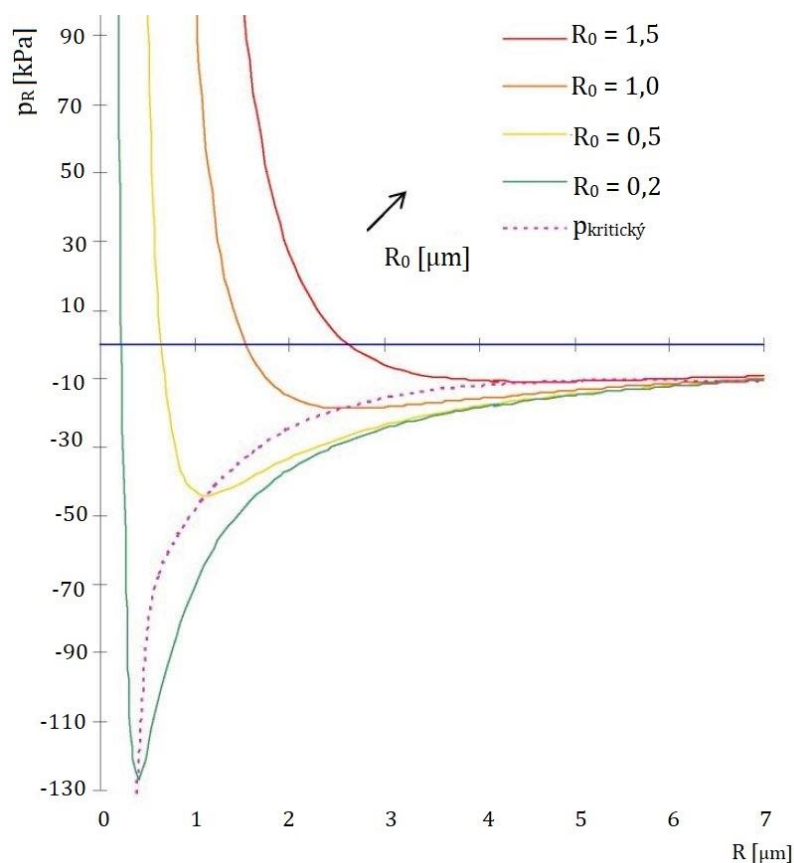
V této bakalářské práci budou zkoumány právě bubliny ve statické rovnováze, tedy stavu před vyvinutím kavitace či kolapsem bubliny, z tohoto důvodu není nutné se zabývat i dynamikou bublin. Bubliny, které s časem nemění svůj tvar ani objem, se dají považovat za bubliny ve statické rovnováze. Předpoklad je takový, že bubliny zaujmají vzhledem k energetické výhodnosti dokonale kulový tvar, který je možné charakterizovat pouze jediným parametrem, a sice poloměrem bubliny R , z kterého lze následně vypočítat i objem bubliny. Aby byla statická rovnováha zachována, je nutné, aby byl tlak uvnitř bubliny shodný s okolním rovnovážným tlakem kapaliny p_k zvýšeným o hodnotu kapilárního tlaku p_{kap} , který je roven dvojnásobku podílu povrchového napětí σ a poloměru bubliny R . Tato hodnota by také měla odpovídat Daltonově zákonu parciálních tlaků, tedy součtu tlaku nasycené páry p_p a tlaku plynu p_{pl} v bublině [Brdička 1981, s. 50].

$$p_p + p_{pl} = p_k + p_{kap} \quad (1)$$

Z rovnice (1) lze vyjádřit rovnovážný tlak kapaliny, který s ohledem na izotermický děj a při zaznamenání počátečních podmínek, kdy $R = R_0$, vyjadřuje následující rovnice závislá na poloměru R .

$$p_R = p_p + \left(p_{R0} - p_p + \frac{2\sigma}{R} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R} \quad (2)$$

Po zadání všech konstant a různých hodnot počátečního poloměru bubliny lze vytvořit graf znázorňující mimo jiné i mezní křivku spojující kritické body křivek $p_R(R)$. Nad mezní křivkou je bublina ve stavu statické rovnováhy.



Obrázek 2 Závislost rovnovážného tlaku na poloměru bubliny

[Hujer 2010, s. 29]

2. 2 Generování bublin elektrolýzou

Metoda generování bublin pomocí elektrolýzy byla použita v této práci s ohledem na jednoduchost jejího provedení a zároveň na možnost vytvoření souvislého proudu bublin vhodných rozměrů s relativně malým rozptylem velikostí.

Do nádoby s vodivou kapalinou jsou vloženy 2 elektrody, které jsou připojeny ke zdroji napětí. Průchodem proudu kapalinou se v ní disociací vzniklé kladné a záporné ionty přemístí k elektrodě opačného náboje a tam mohou reagovat buď přímo s elektrodou, nebo s kapalinou za vzniku nové chemické sloučeniny, v našem případě sloučeniny plynné fáze.

V případě validačního měření byla použita jako spojitě médium kohoutková voda, která je díky obsahu iontů vodivá. Užití destilované vody s přídavkem soli bylo zavrženo vzhledem k možnosti vzniku kyselých sloučenin, které by mohly poškodit převodníky bublinkového spektrometru. Anodou je tlustý měděný drát o průměru 3 mm a katodou je tenký měděný drát (průměr řádově desetiny mm). Díky nízkému měrnému odporu mědi nedochází ke zvyšování teploty vody v okolí vodiče a chemická ušlechtilost mědi zabraňuje korozi drátu. Na záporné elektrodě (katodě) se vylučují molekuly

vodíku H_2 , na kladné elektrodě (anodě) vznikají molekuly kyslíku O_2 . Vodík i kyslík se vylučují ve formě bublin s tím rozdílem, že kyslíkové bubliny zůstávají přichycené na elektrodě a neuvolňují se k hladině. Je to dáno jednak tím, že zatímco se vytvoří jedna molekula kyslíku, vzniknou mezitím 2 vodíkové. Dále pak větším průřezem anody, s jejímž povrchem má bublina větší styčnou plochu a kohezní síly, a větší molekulovou hmotností vodíku, tudíž i téměř úměrně odpovídající hustotou.



$$M_{H_2} \cong 2 \text{ g mol}^{-1} > M_{O_2} \cong 32 \text{ g mol}^{-1}$$

[Mikulčák 1995, s. 120]

3 Metody pro určování kavitačního spektra

Existuje několik forem měření, které umožňují určování kavitačního spektra, resp. počtu bublin, jejich velikostí a objemového rozložení. Tyto metody lze rozdělit dle jejich principu do dvou hlavních skupin, a sice na akustické a na optické, další metody jsou založeny například na základě elektrické impedance a dalších fyzikálních jevech.

3. 1 Metoda ABS

Měření pomocí akustického bublinkového spektrometru využívá akustickou formu měření a je hlavním tématem této bakalářské práce, z tohoto důvodu je podrobně popsáno až v kapitole 4 Měření akustickým bublinkovým spektrometrem.

3. 2 Metoda vysokorychlostního snímkování

Metoda vysokorychlostního snímkování je optickou formou měření bublin v kapalinách, které jsou transparentní. Kapalina s bublinami je prosvětlena pomocí laseru nebo halogenových a xenonových lamp. Laserový bodový paprsek se dokáže rozprostřít do roviny pomocí průchodu speciální čočkou, světlo z lamp se usměřňuje pomocí difúzního skla. Prosvětlené bubliny lze zachytit vysokorychlostní kamerou, která může být buď přímo naproti zdroji záření, nebo snímat prosvětlené bubliny z boku, jak je tomu v případě měření v této bakalářské práci. Paprsky také mohou dopadat na stínítko indikující jejich změny vlivem zakřivení trajektorie elektromagnetických vln a změny hustoty paprsků světla průchodem přes bublinu, a tak lze z pořízených snímků stínítka zjistit stav bublin v kapalině. Nevýhodou této formy měření je problematické užití pro větší objemové zastoupení bublin a nutnost transparentnosti tekutiny. Vysokorychlostní kamery také musí mít velké rozlišení, aby byly pořízené snímky dostatečně kvalitní.

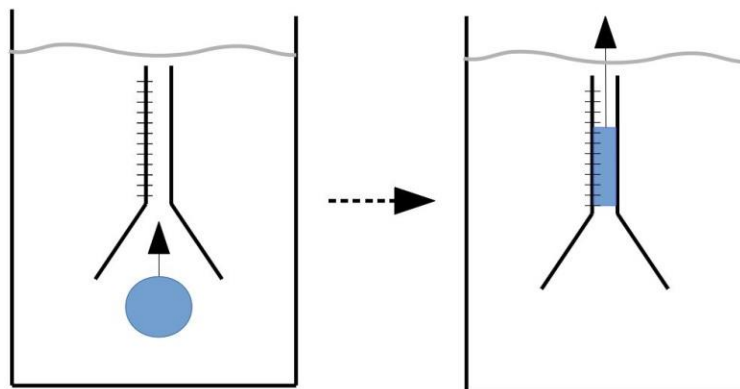
Vyhodnocení počtu bublin a jejich velikostí lze provést s pomocí vyhodnocovacích programů nebo speciálního skriptu v programovém prostředí Matlab.



Obrázek 3 Vysokorychlostní kamera MotionPRO s objektivem

3.3 Trychtýřová metoda

Mechanickou metodou pro měření osamocených bublin či lineárních proudů bublin je metoda obráceného trychtýře. Bublina vstoupí do trychtýře a následně vystoupá do úzké připojené kapiláry o průměru v řádech setin až desetin milimetru, která je opatřena stupnicí. Dle stupnice na kapiláře lze změřit objem plynu obsaženého v bublině, a následně tak i její velikost v původním stavu. Při této metodě je plyn v bublině uvažován jako ideální, během výpočtu je navíc nutné brát v potaz efekty povrchového napětí a tlaků v tekutině [Vazquez 2005].



Obrázek 4 Schéma trychtýřové metody

4 Měření akustickým bublinkovým spektrometrem

4.1 Princip metody

Akustický bublinkový spektrometr je speciální druh měřicího zařízení, jež umožňuje měřit spektrum bublin a jejich vlastnosti ve vícefázovém prostředí. Základem akustické metody měření spektra bublin je zvukové vlnění, to je generováno koherentně s přesně určenými frekvencemi. Pro vybuzení akustického vlnění se užívá takzvaného obráceného, inverzního, piezoelektrického jevu, jenž dokáže měnit elektrické parametry na mechanické (např. vibrace či deformace). Do převodníků ABS, které jsou z piezokeramiky, se přivede elektrický proud, tím se změní těžiště elektronů v piezokeramickém materiálu a převodník se vratně deformuje. Touto malou deformací lze generovat signál o různých frekvencích.

Akustický signál o různých frekvencích se přenáší mezi dvěma převodníky, z nichž jeden je vysílačem signálu a druhý signál přijímá. Z vysílajícího převodníku ABS se tedy zvukový signál po průchodu zkoumaným vícefázovým prostředím dostane k převodníku přijímajícímu. Po přijetí signálu dochází k jeho zpracování a analýze pomocí výpočetního softwaru. Výsledný model je vytvořen na základě dekrementu útlumu akustického pole po průchodu prostředím a změnou fázové rychlosti vlnění indikované na přijímacím hydrofonu.

Akustická metoda je nerušivá forma měření přenášející data téměř v reálném čase, která není závislá na transparentnosti zkoumaného média či konstrukce, tudíž umožňuje měření i v místech, ve kterých by se jiné metody aplikovat nedaly. Vícefázové prostředí je při měření ABS zpravidla složeno z kapalného spojitého média, ve kterém se nacházejí bubliny obsahující buď plyn anebo páru. Takovéto prostředí, v němž je jedna složka spojitá a druhá v ní rozptýlena, se nazývá též disperzní. Systém je navíc heterogenní, neboť mezi kapalinou a bublinami jsou zřejmá hraniční místa.

Pro důsledné pochopení výpočetních mechanismů ABS je nutné podívat se hlouběji na funkční závislosti užití výrobcem. Zvukové vlnění o dané frekvenci ω procházející bublinatou kapalinou rozkmitá bubliny, které pracují jako oscilátory. Jsou pro ně charakteristické veličiny vlastní frekvence ω_0 a také koeficienty tlumení vlnění, které jsou dány jednak vlivem viskozity kapaliny, tepelné vodivosti a zpětnou radiací. Celkový koeficient útlumu δ je pak roven součtu těchto tří dílčích tlumení.

Numerické řešení závislosti rozložení počtu bublin na jejich poloměru $N(R)$ spočívá ve výpočtu tzv. Fredholmova integrálu. Za použití rychlosti zvuku v kapalném

prostředí (značena c) i ve směsi (c_2), která je komplexní a vnáší do rovnic další parametry, se dostaneme k následující integrální rovnici 1. řádu [DURAISWAMI 1998].

$$\left(\frac{c}{c_2}\right)^2 = 1 + 4\pi c^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{R \cdot N(R)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 2i\delta\omega} dR \quad (4)$$

Vzhledem k omezenému řešení původních rovnic, které nebylo možné aplikovat na více objemné a plošně rozlehlejší proudy bublin, inovoval výrobce zařízení výpočetní mechanismy ABS. Byla navržena rovnice se zavedením prostorové korelační konstanty ξ , která byla vypočtena na základě rovnoměrného rovinného rozložení bublin mezi dvěma převodníky. Výpočty byla zjištěna její hodnota 0,8. Touto úpravou se výsledná objemová rozložení bublin změnila o více než 40%, a docílilo se tak zpřesnění výsledků a zlepšení stability řešení [Wu 2010].

4. 2 Popis sestavy ABS

Sestava ABS se skládá z několika navzájem propojených částí, které již byly okrajově zmíněny v předcházející kapitole – z převodníků, těla spektrometru s měřicí kartou a počítače, který zpracovává data pomocí speciálního softwaru.

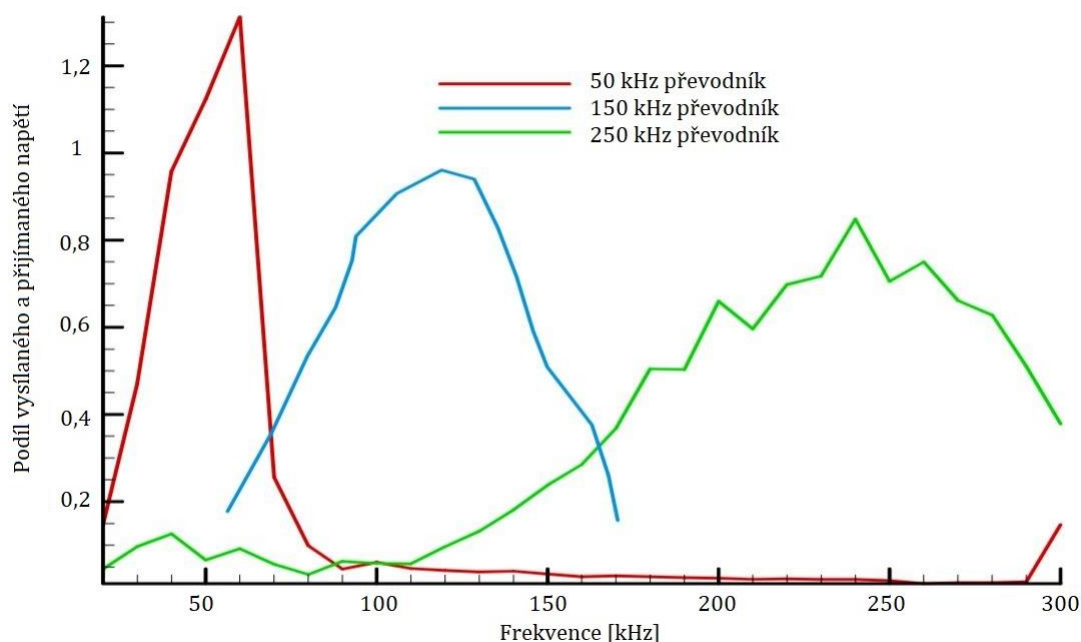
4. 2. 1 Převodníky

Převodníky, též označovány jako hydrofony, jsou hlavními prostředky pro vysílání a přijímání signálu. Montují se vždy v páru přijímač/vysílač a jsou spojeny s tělem spektrometru pomocí kabelů. Jsou vyrobeny ze speciálního materiálu, tzv. piezokeramiky, která je vhodná pro nástroje v ultrazvukových aplikacích a díky které lze využít piezoelektrického jevu. Samotný převodník je zalitý ve vodivém polymeru černé barvy pro zlepšení kontaktního připojení a následné aplikace při experimentu. Izolační pryž je také důležitá jako ochrana převodníku před mechanickým či chemickým poškozením.



Obrázek 5 Vysílající a přijímající převodník

Převodníky jsou kalibrovány pro různé pole frekvencí, které dokáží vysílat či přijímat s největší přesností. Výrobce poskytuje 5 různých převodníků o jmenovitých frekvencích od 50 kHz do 1 MHz. Ovšem s ohledem na předpokládané velikosti zkoumaných bublin (řádově desítky až stovky μm) a k předchozím zkušebním měřením byly dle zkušenosti zvoleny pro měření převodníky o nominálních frekvencích 50 kHz a 150 kHz tak, aby lépe pokryly spektrum velikostí měřených bublin. V rámci výbavy ABS, kterou má k dispozici Katedra energetických zařízení TUL, byl k dispozici na pracovišti ještě převodník 250 KHz, této nominální frekvenci však odpovídá bublina průměru 12,596 μm , která je výrazně mimo předpokládaný rozsah měření, a tak by mohlo docházet k větší nepřesnosti měření.

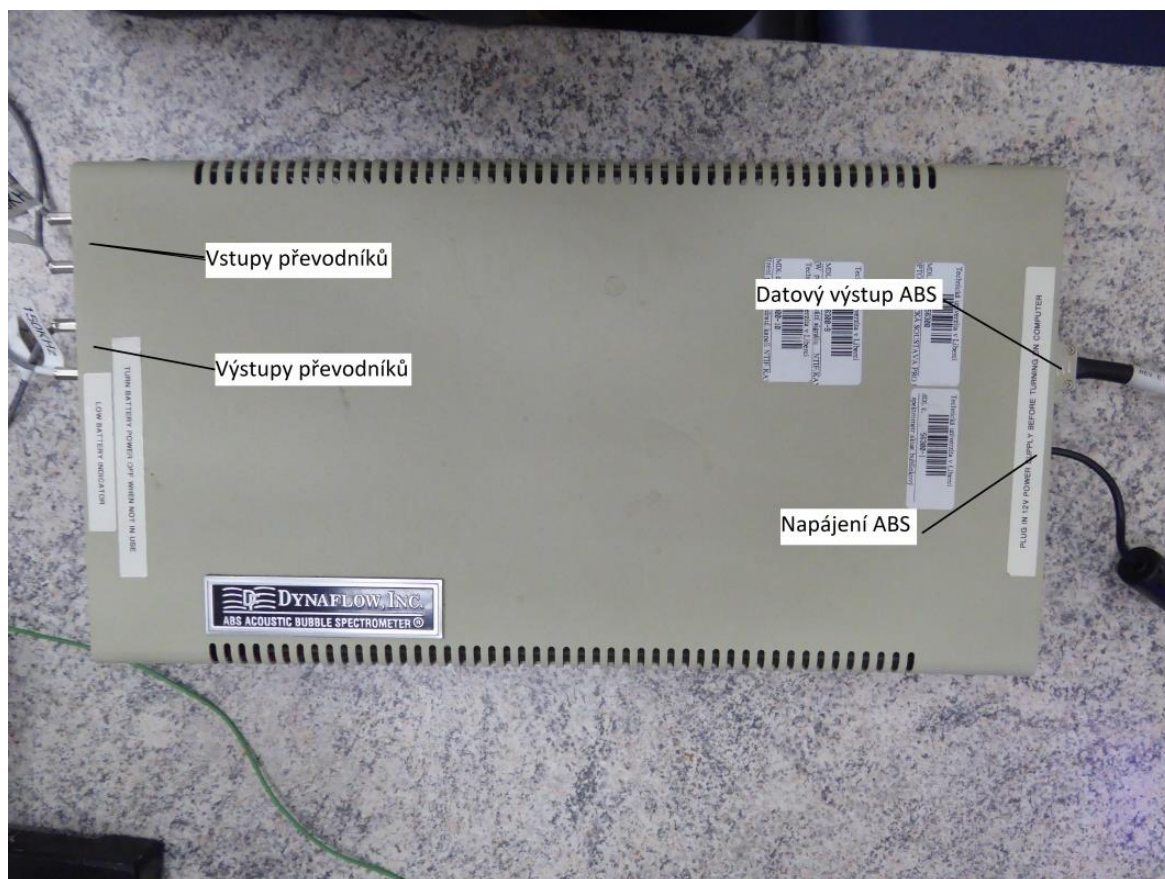


Obrázek 6 Napěťová charakteristika převodníků

[WU 2010, s. 3]

4. 2. 2 Tělo spektrometru s měřicí kartou

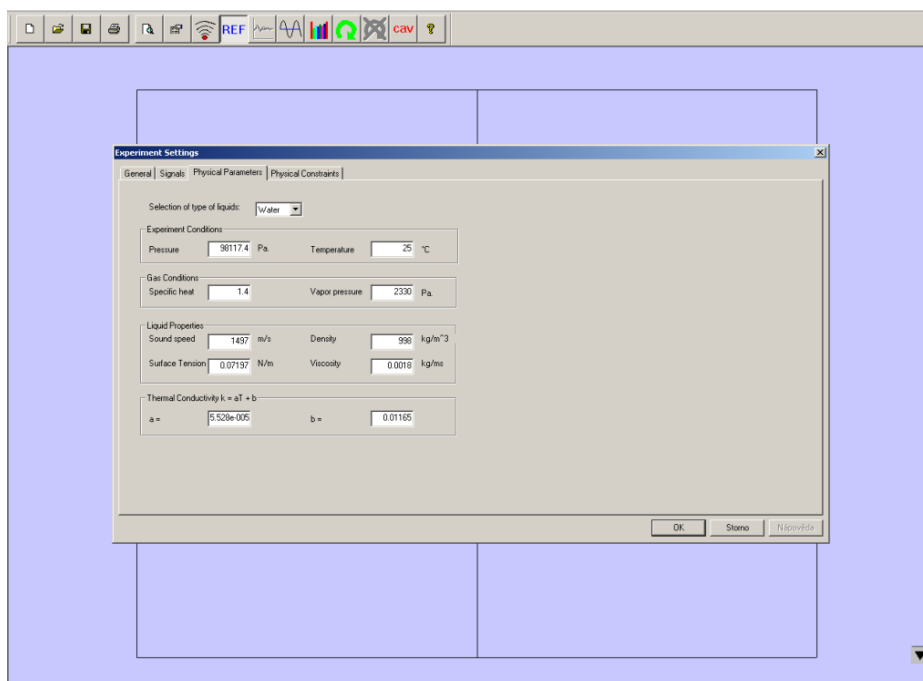
Hlavní částí ABS je tělo spektrometru, které dohlíží na generování a přijímání signálu a zároveň porovnává získaná data. Tvoří zároveň tzv. Data acquisition (DAQ) systém, který umožňuje pomocí hardwaru DAQ zajistit výkonné propojení počítače s daty ze senzoru a zajišťuje tak lepší efektivitu a přináší možnost zpracování dat pomocí softwaru. Data acquisition systém je složen z výkonového zesilovače zajišťujícího transformaci napětí ze zdroje na požadovanou, nastavenou, hodnotu a usměrnění signálu a z AD/DA převodníku, pomocí něž lze převést analogový signál do digitální podoby.



Obrázek 7 Tělo akustického bublinkového spektrometru

4. 2. 3 Software ABS

Výrobce bublinkového spektrometru vyvinul specializovaný program ABS, který dokáže odesílat vstupní parametry pro vykonání měření a také zpracovávat data přijatá z měřicí karty. Výpočetní software ve stolním počítači je s tělem spektrometru propojen pomocí rozhraní ExpressCard/54, tedy kartou ve tvaru „L“ 54 mm širokou a konektorem šířky 34 mm, které je přes PCI Express sběrnice schopno rychle odesílat velké množství dat (až 250 Gbit za sekundu). Díky tomu mohou být data zpracována v programu ABS téměř v reálném čase.

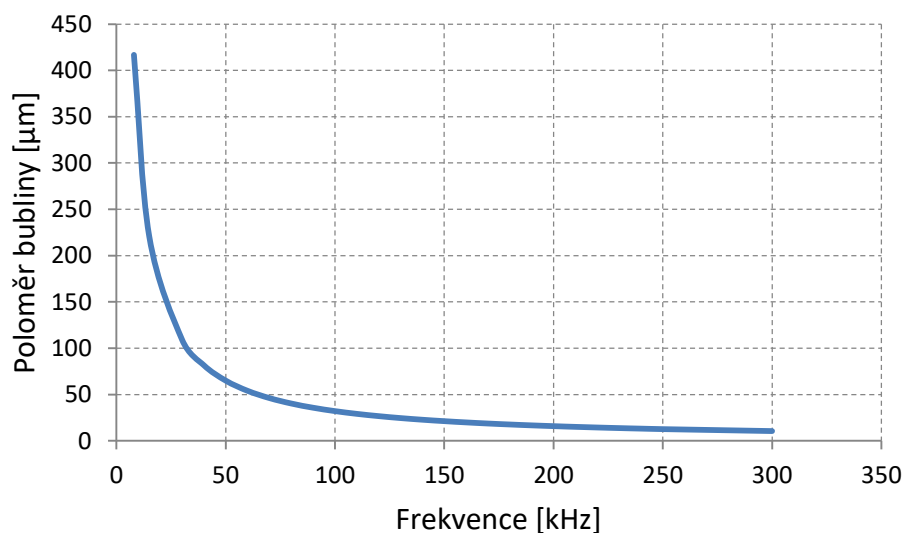


Obrázek 8 Ukázka z počítačového programu ABS

4.3 Počáteční podmínky měření

Vzhledem k tomu, že měření na ABS je ovlivněno celou řadou faktorů, je nutné před samotným experimentem zadat do softwaru vstupní konstanty a další parametry měřicí trati.

Mezi nejdůležitější patří určení charakteristiky signálu, a sice rozdělení vysílaných frekvencí a určení minimální a maximální frekvence, neboť ta ovlivňuje možnost měřit s vyšší přesností danou velikost bublin.



Obrázek 9 Graf závislosti velikosti středního poloměru bubliny na frekvenci

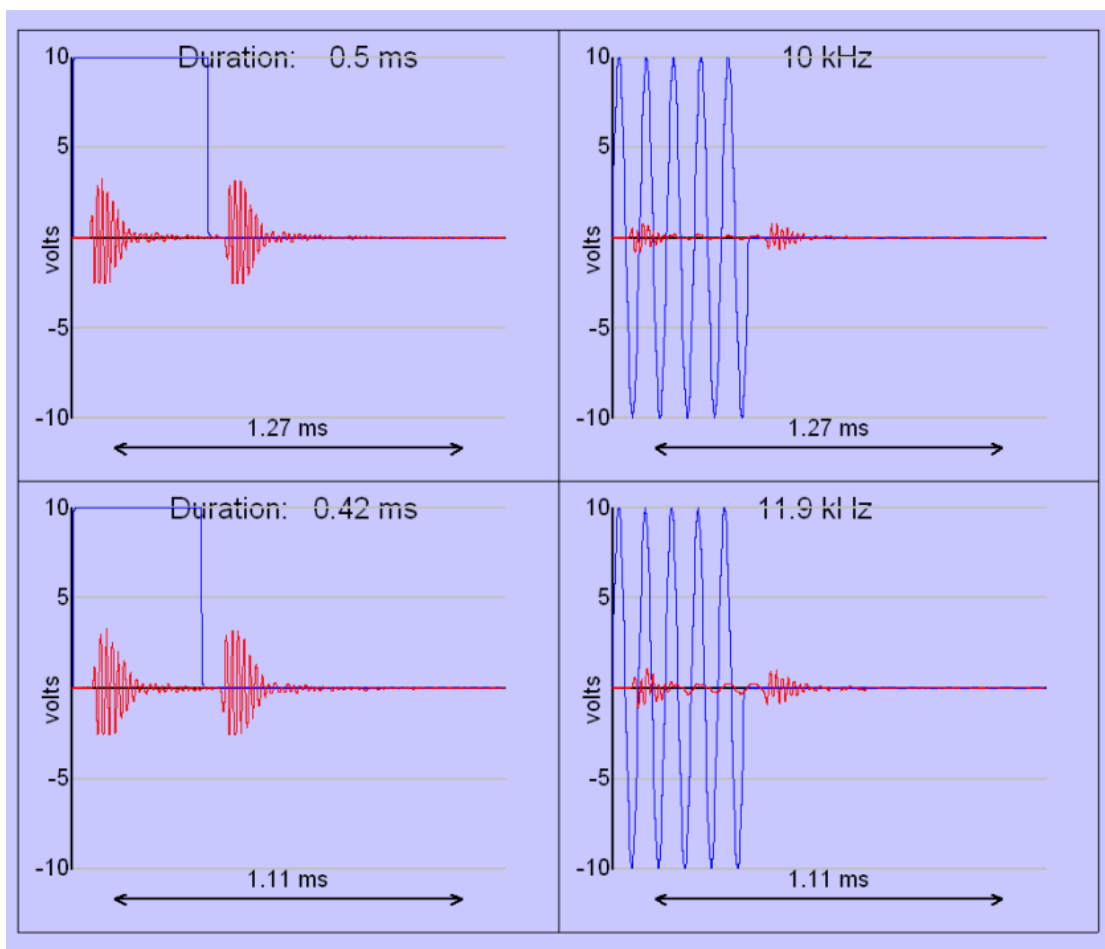
Z grafu vyplývá, že s rostoucí hodnotou emitované nominální frekvence nelineárně klesá i střední poloměr bubliny, kterou lze měřit. Dalším důležitým parametrem je vzdálenost převodníků, protože vhodné užití velikosti celkového objemu mezi nimi zajistí přesnost výpočtu objemového zlomku bublin. Mezi parametry převodníků se zadá jejich rezonanční frekvence, při které je dle jejich napět'ové charakteristiky signál nejvíce zesílen. Dále se zadá nejvyšší frekvence detekovaná převodníkem tak, aby byla co nejlépe a nejpresněji pokryta oblast měření a mohl začít měřit druhý převodník, který má při dané frekvenci lepší charakteristiku (viz Obrázek 6). Časová korekce neboli doba odezvy hydrofonů se zpravidla volí dle doporučení výrobce a užívá se pro zpřesnění analýzy signálů.

Ze vstupních fyzikálních parametrů, které se týkají prostředí, v němž je prováděno měření, se zadává druh kapaliny (voda, minerální olej, rtuť a další), její teplota a tlak v místě měření. Dále pak také měrná hmotnost, dynamická viskozita, povrchové napětí a rychlost zvuku v kapalině bez přítomnosti bublin. Parametry plynu uvnitř statické bubliny jsou Poissonova konstanta, tlak nasycených par uvnitř bubliny a tepelná vodivost. Posledními zadávanými kritérii jsou fyzikální omezení řešení, která se zadávají na základě stanovených cílů a předpokládaných výsledků měření. Konkrétně jde o minimální a maximální poloměr bublin a s tím související rozdělení na určitý počet velikostí bublin.

Software umožňuje i zadávání podmínek pro určení náchylnosti ke kavitaci, jejíž problematikou se tato práce nezabývá a zároveň tyto parametry nemají přímý vliv na validační měření.

4. 4 Kalibrační měření

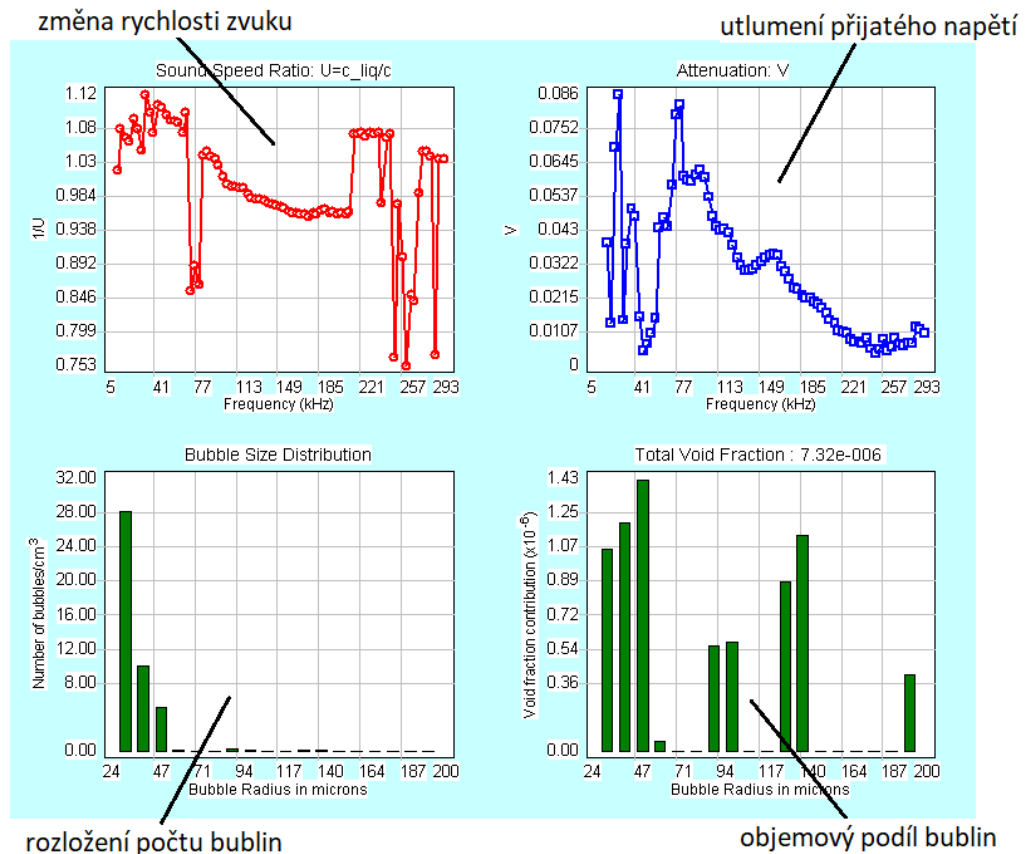
Před každým měření na ABS je nutné po zadání počátečních podmínek řešení provést kalibrační měření. To se provádí ve zkoumaném prostředí, ovšem s tím rozdílem, že kapalina je bez přítomnosti bublin. Měřicí karta tedy může do převodníku vyslat skokem akustický signál a po přijmutí signálu druhým převodníkem může software vyhodnotit základní parametry prostředí bez bublin, především utlumení či zesílení signálu, změnu jeho periody a fázové rychlosti. Na základě kalibračního měření je možné porovnat a vyhodnotit výsledky měření v disperzním prostředí, kterého je dosaženo při generování bublin do kapaliny.



Obrázek 10 Průběh kalibračních signálů

4.5 Vyhodnocení měření

Výsledkem měření pomocí akustického bublinkového spektrometru jsou jednak hlavní ukazatele v podobě spektra bublin a objemového zlomku v celkovém množství zkoumané kapaliny (viz Příloha F), dále pak vedlejší data udávající informace o změně vstupní a výstupní rychlosti zvuku v kapalině a utlumení napětí v závislosti na frekvenci. Spektrum bublin znamená v případě ABS počet bublin plynu v kapalině v závislosti na jejich velikosti. Počet bublin je vztažen na jednotku objemu a velikost bubliny je udávána v mikrometrech. Objemový zlomek udává, kolik procent z celkového objemu zaujímají bubliny různých velikostí, a také zobrazuje hodnotu celkového podílu bublin v kapalině.



Obrázek 11 Grafické znázornění výsledků softwaru ABS

Grafické zobrazení výsledků v počítačovém programu ABS ukazuje aktuální naměřené hodnoty a je spíše orientační, dochází v něm k výraznému zobecnění výsledků při měření s velkým spektrem bublin. Proto lze studovat získaná data v podrobnější textové formě, která slouží k ucelení dat z celého časového intervalu měření a zjištění konečných poznatků.

5 Validační měření

Validační měření bylo provedeno formou porovnávání bublin generovaných elektrolyticky měřených pomocí bublinkového spektrometru a vyhodnocovaných vysokorychlostní kamerou. Opakovatelnost měření byla analyzována na výsledcích měření bublin produkovaných ze dvou drátů najednou a poté z každého drátu zvlášť. Spektrum bublin ze dvou drátů by mělo mít právě takovou hodnotu jako součet spekter z drátů jednotlivých.

Produkce bublin z drátu byla použita na základě její efektivity a dobré technologické proveditelnosti. Tato metoda dokáže generovat bubliny přiměřené velikosti k měření spektrometrem a vhodného spektra pro porovnávání součtu bublin z více zdrojů. Generátory bublin, které většinou produkují bubliny v ploše, resp. objemu, a navíc jim dodávají velkou počáteční kinetickou energii, jsou nestabilní a spektrum bublin není časově stálé.

Pro měření bublinkovým spektrometrem byly použity převodníky o nominálních frekvencích 50 KHz a 150 KHz, jejichž volba je odůvodněna v kapitole 4. 2. 1. Dvojice převodníků byly umístěny nad sebe. Vzhledem k lineárně stoupajícímu proudu bublin, které jsou ve statické rovnováze a nemění tedy svou velikost, není tato skutečnost na obtíž. Převodník o frekvenci 150 kHz byl umístěn výše, 50 kHz pak níže, neboť ze zkušenosti se toto umístění osvědčilo.

5. 1 Měření vstupních parametrů

Měření atmosférického tlaku bylo provedeno na staničním barometru v místě měření s odečtenou hodnotou 97,52 kPa. Teplota kapaliny v nádrži, která byla měřena termistorovým teploměrem PT100, dosahovala 24°C.

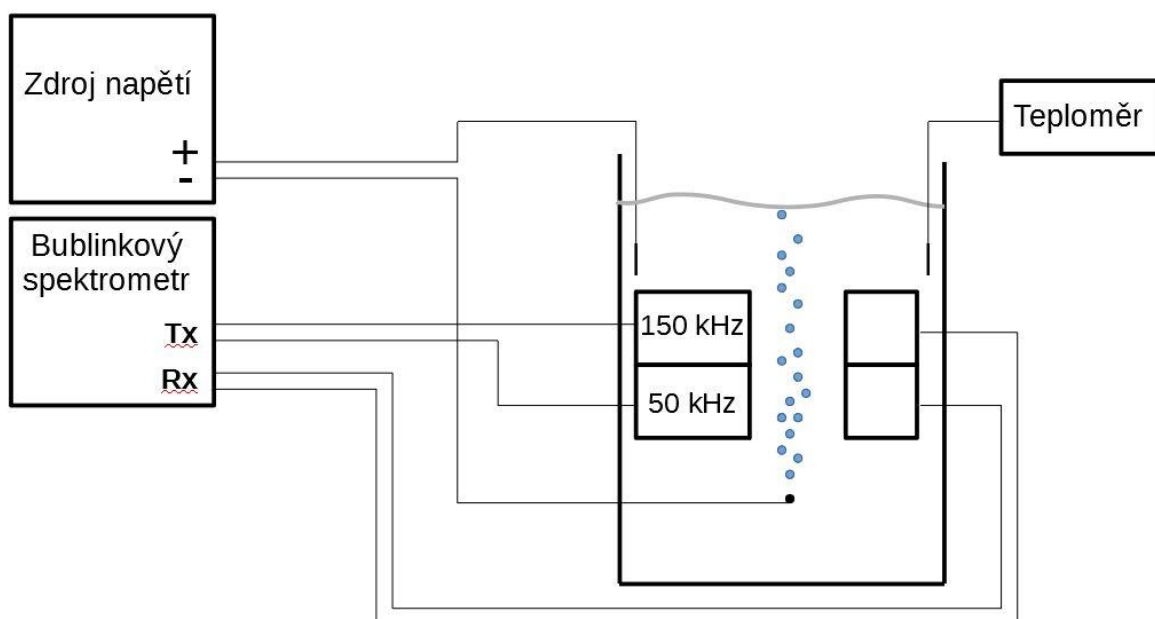
I další ze vstupních parametrů bylo vhodné přímo změřit, nežli se odkazovat na jejich tabulkovou hodnotu, jejíž nepřesnost by mohla ovlivnit přesnost výsledků experimentu. Bylo provedeno měření hustoty kapaliny hustoměrem DMA – 35 (viz Příloha C), dle jehož výsledků byla změřená hustota aproximována na hodnotu $\rho = 998 \text{ kgm}^{-3}$. Dále byla změřena dynamická viskozita kapaliny vibračním viskozimetrem. Naměřené průměrné hodnoty dynamické viskozity (Příloha D) byly iterovány na hodnotu kapaliny 24°C. Výsledná hodnota dynamické viskozity tedy činila $\eta = 1,19 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

5. 2 Experiment

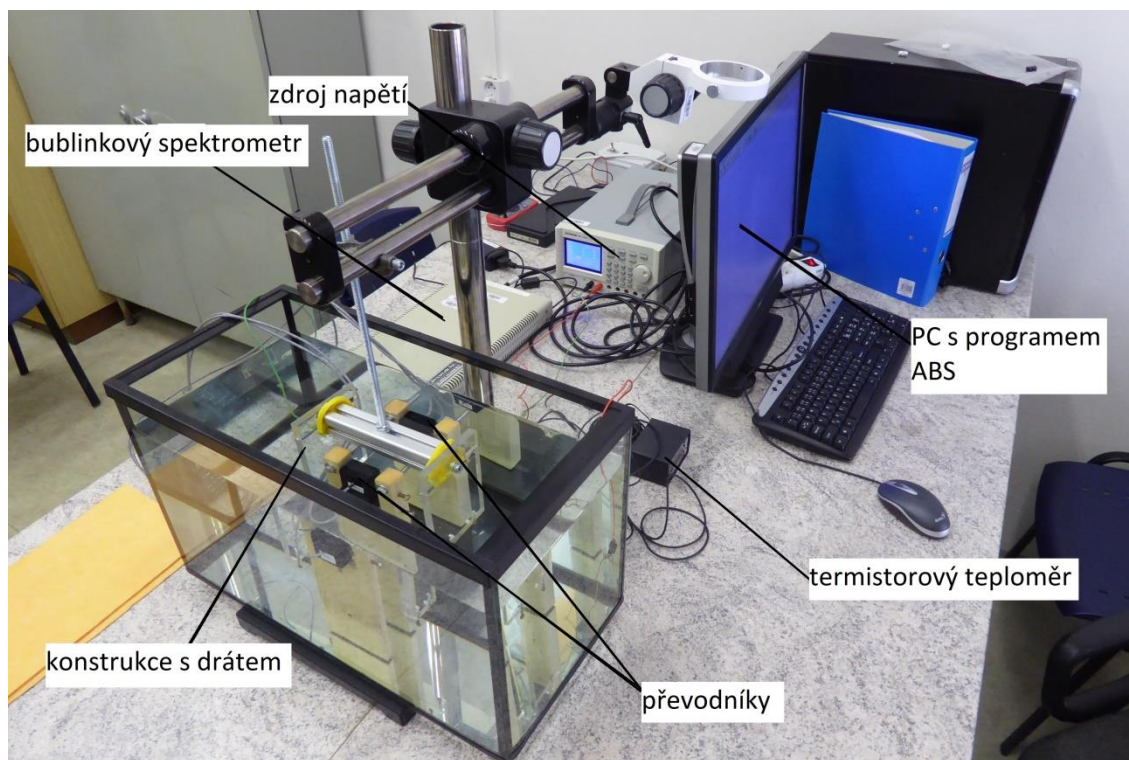
5. 2. 1 Příprava experimentu

Byla vyrobena dřevěná nosná konstrukce vhodných rozměrů, ve které se dají uložit naproti sobě všechny převodníky tak, aby vzdálenost mezi nimi byla konstantní a jejich čelní plochy rovnoběžné. Dále byl vytvořen prototyp konstrukce na uchycení tenkých drátů. Tato konstrukce byla složena z hliníkového profilu a bočnic z PMMA, který je průhledný. Díky tomu bylo lépe možné pozorovat průběh generace a pohybu bublin. Mezi bočnicemi byly nataženy rovné odmaštěné dráty sloužící k elektrolytickému generování bublin a obě konstrukce byly vloženy do skleněné nádrže s vodou z vodovodního řádu.

Následně se připojily převodníky k tělu ABS, které se propojilo pomocí rozhraní ExpressCard s počítačem. Do nádrže se vložila jedna měděná elektroda a jako druhá elektroda sloužil tenký drát, anoda i katoda se připojily ke zdroji stejnosměrného napětí.



Obrázek 12 Schéma experimentu



Obrázek 13 Realizace měření pomocí ABS

5. 2. 2 Zadání vstupních parametrů

Do výpočetního softwaru ABS byly zadány všechny nutné počáteční podmínky měření popsané v kapitole 4. 3. Vzdálenost hydrofonů byla měřena posuvným měřidlem a činila 7,19 cm. Vzhledem k očekávanému rozsahu velikostí bublin a napětovým charakteristikám převodníků byla zvolena minimální frekvence 10 kHz a maximální 200 kHz s lineárním rozdělením intervalů. Z fyzikálních parametrů byla naměřena hustota a dynamická viskozita kapaliny (viz 5. 1.), dále pak byla dle tabulkových hodnot zadána hodnota rychlosti zvuku v kapalině $1497 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a velikost povrchového napětí $0,07197 \text{ Nm}^{-1}$. Poissonova konstanta plynu uvnitř statické bubliny činí $\kappa = 1,4$ [Čmelík 2001]. Předěšlé hodnoty byly vztaženy na tlak změřený na staničním barometru 97,52 kPa a teplotu kapaliny v nádrži 24°C . Zadávaný tlak je absolutní, jeho hodnota byla zjištěna sečtením atmosférického tlaku a hydrostatického tlaku ve střední vzdálenosti převodníků od hladiny (6 cm).

$$p = p_{\text{atm.}} + p_h = p_{\text{atm.}} + h \cdot \rho \cdot g \quad (5)$$

Celkový zadáný tlak byl tedy 98,117 kPa. V takto připraveném prostředí bylo možno zahájit měření na ABS.

5. 2. 3 Průběh experimentu

Bylo provedeno několik měření s různými způsoby generování bublin z drátu, pomocí nichž byla následně hodnocena validace ABS.

Po připravení konstrukce s upevněnými dráty a zapojenými převodníky byly zadány počáteční podmínky měření. Následně bylo provedeno kalibrační měření, dále se již mohlo spustit generování bublin.

Ze zdroje stejnosměrného napětí bylo na elektrody přivedeno napětí o velikosti 33 voltů, díky tomu se začaly produkovat bubliny. Při každém měření byl odměřen 90vteřinový interval na rozběh proudu bublin, poté byly bubliny vždy po dobu půl minuty počítány programem ABS. Při delších intervalech měření by totiž mohla být vlivem nově vzniklých sloučenin výrazně ovlivněna schopnost generování bublin a porovnatelnost výsledků by byla horší.

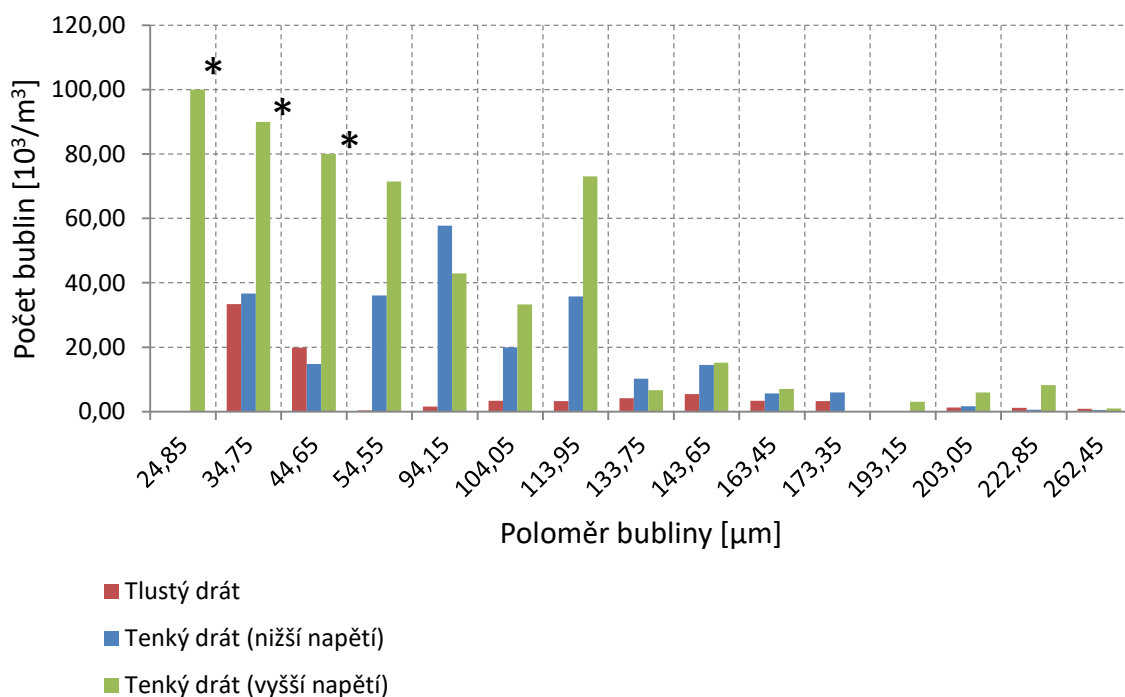
První měření byla provedena s cílem ověřit parametry ovlivňující samotné generování bublin. Nejdříve byly změřeny bubliny generované tlustším drátem o průměru 0,62 mm, pak byly změřeny bubliny generované tenkým drátem o průměru 0,15 mm (stejný druh drátu byl použit i ve všech ostatních měřeních). Do tenkého drátu bylo ze zdroje vysíláno nižší napětí než v předchozích případech, a sice 20 V. Výsledky byly následně porovnány s naměřeným spektrem bublin z tenkého drátu při původním napětí 33 V.

Druhé měření mělo za úkol porovnat, zda počet bublin generovaných tenkými dráty jednotlivě a poté dohromady bude shodný. Nejdříve tedy generoval bubliny tenký drát označený číslem 5 a poté tenký drát číslo 6. Následně byly zapojeny oba dráty najednou.

5. 3 Zhodnocení měření pomocí ABS

Měření pomocí akustického bublinkového spektrometru proběhlo vzhledem k předchozím zkušenostem získaným během studia bez zásadních problémů. Bubliny menší než 15 μm byly vzhledem k parametrům a charakteristikám převodníků předem vyhodnoceny jako nepřesné a bubliny větší než 150 μm byly brány jako ojedinělé, takže neměly přímý vliv na řešení. Bubliny většího poloměru než 100 μm nemusely být vzhledem k výraznému zeslabení signálu (viz Obrázek 6 a Obrázek 9) měřeny správně. Ve všech měřeních se vesměs potvrdilo exponenciální rozložení spektra bublin, to znamená, že nejvíce zastoupené byly bubliny nejmenších rozměrů a výskyt větších bublin byl nižší.

Vyhodnocení prvního měření s tlustým drátem a tenkými dráty s různými napájecími napětími bylo provedeno shrnutím hodnot do tabulky a jejich grafickým zobrazením. Hlavním ukazatelem výsledků měření je graf níže, jenž byl sestaven z hodnot naměřených spektrometrem, které lze dohledat v příloze A. V grafu je možné pozorovat, že tlustý drát generuje menší množství bublin, což potvrdilo počáteční předpoklad. Tato skutečnost je způsobena především větší styčnou plochou povrchu vznikající bubliny s drátem, soudržnými silami, a tedy nutností zvětšit objem bubliny, aby se mohla od drátu „odtrhnout“ a stoupat k hladině. Tenký drát, který byl napájen nižším napětím, produkoval výrazně menší počet bublin než drát s vyšším napětím. Tuto skutečnost bylo možné dobře pozorovat i pouhým okem, z tohoto důvodu bylo pro všechna následující měření používáno nejvyšší možné napětí, které dovozoval zdroj, a sice 33 voltů.



Obrázek 14 Graf spektra bublin zjištěného prvním měřením

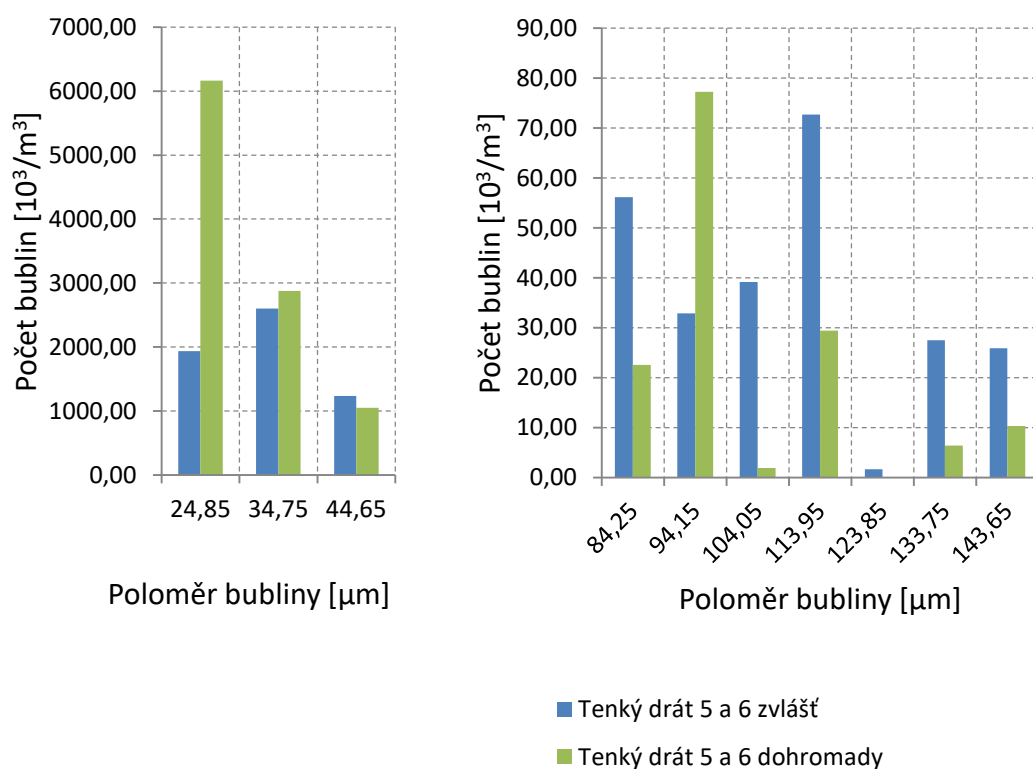
Hodnoty tenkého drátu s vyšším napětím označené symbolem hvězdičky (*) byly ve skutečnosti více než o řád vyšší než hodnoty zbylých drátů při dané velikosti bubliny. Proto byly vzhledem k lepší čitelnosti a názornosti grafu zvoleny hodnoty záměrně zmenšené.

Druhé měření, které spočívalo v generování bublin dráty zvlášť či společně, odhalilo několik úskalí této metody. Již před zahájením měření bylo zřejmé, že dráty nebudou generovat stejné spektrum bublin, nicméně se předpokládalo, že počet bublin a jejich velikosti budou po rozběhu procesu s časem stálé. Tento předpoklad se nepotvr-

díl. Důvodem mohou být jednak vyloučené usazeniny na drátu nebo změna vodivosti drátů během měření vlivem svodu napětí do jiných kovových částí konstrukce, kterých však bylo použito minimum.

Výsledky měření byly vyhodnoceny ve dvou grafech z důvodu mnohonásobně většího počtu bublin velikostí do 44,65 μm , který by zhoršil čitelnost ostatních hodnot v grafu. V příloze B je tabulka naměřených výsledků a procentuální rozdíl hodnot mezi součtem bublin z drátů generujících bubliny zvlášť a zároveň.

Kvalitní výsledky lze pozorovat v oblasti hodnot 24,85 a μm 34,75 μm , které u měření dráty 5 a 6 dohromady měly nejvyšší objemovou hodnotu výskytu a zaujímaly celkově 38% ze všech změřených bublin (34,75 μm – 20,6 %, 44,65 μm – 17,4 %, 84,25 μm – 14,2 %). Rozdíl hodnot u velikosti bublin 34,75 μm činil 9,52 %, u 44,65 μm pak 17,35 %. U nejmenších bublin (24,85 μm) byl sice velký rozdíl počtu bublin, ale procentuální úbytek nepřesáhl 70 % (viz Příloha B).

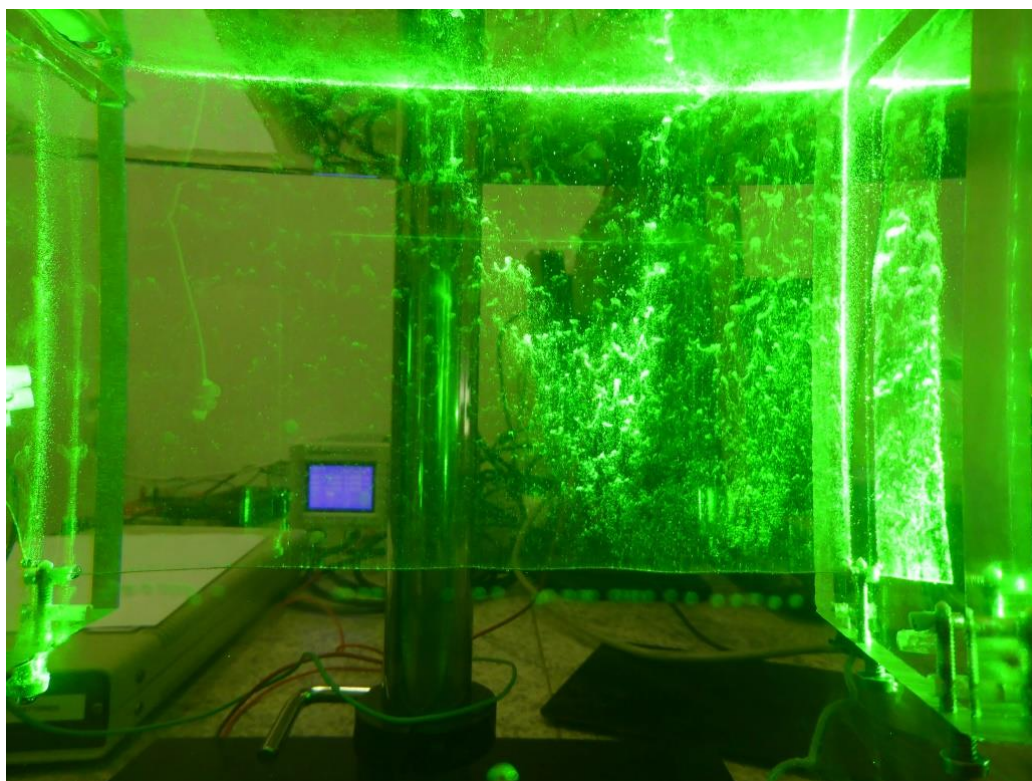


Obrázek 15 Graf spektra bublin zjištěného druhým měřením

5. 4 Měření optickou metodou

Aby bylo možné provést validaci, byly bubliny změřeny i optickou metodou. Proud bublin byl prosvětlen výkonným laserem, jehož paprsek procházel speciální čočkou tak, aby byl následně rozprostřen do celé roviny, která obsahovala bubliny. Takto

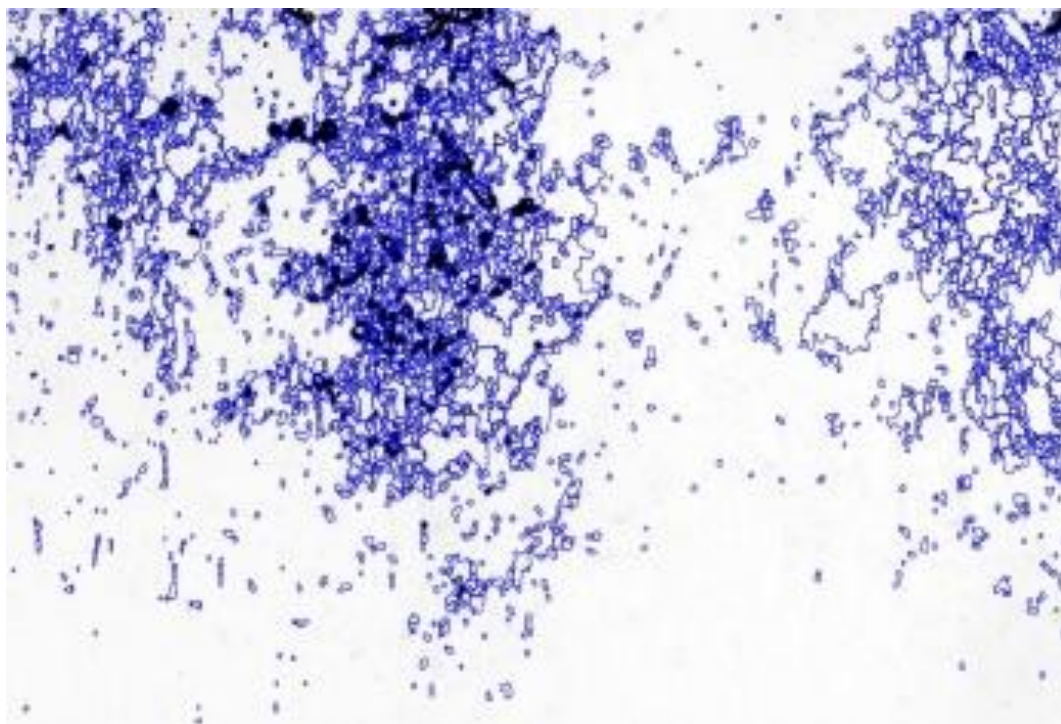
prosvětlené bubliny pak bylo možné zaznamenat vysokorychlostní kamerou MotionPRO s objektivem Nikon AF Micro-Nikkor 60mm f/2.8D, která byla uchycena na stativu a byla ovládána pomocí počítačového programu. Nedostatkem snímání vysokorychlostní kamerou bylo obtížné ruční zaostřování a nízké rozlišení pořízených snímků (1280 x 1024 pixelů), které zhoršilo možnost vyhodnocení výsledků s vyšší přesností.



Obrázek 16 Bubliny prosvětlené laserem

Pro vyhodnocení snímku z vysokorychlostní kamery (ukázka snímku viz Příloha E) byl použit počítačový program MountainsMap software. Pomocí něj bylo na základě stínů, které na obrázku představovaly bubliny, rozčleněno pole s vhodným rozlišením, aby byly bubliny detekovány. Analyzovaná data byla protříděna a byly vyřazeny chybné hodnoty vzniklé při rozčlenění snímku, které zaznamenaly jiný stín než bublinu. Software následně dokázal určit ekvivalentní poloměr bublin, na jehož základě bylo možné vyhodnotit data v obdobné formě jako pomocí ABS. Vzhledem k tomu, že kamerou byla snímána pouze část prostoru zaznamenávaného spektrometrem, byly počty bublin převedeny na počet ekvivalentní odpovídajícímu objemu zkoumanému spektrometrem. Snímek celé oblasti nebyl pořízen, protože by detekce bublin vzhledem k malému rozlišení byla nepřesnější. Navíc vzhledem k malým nerovnostem drátu, které

způsobovaly, že bubliny nebyly přímo v jedné rovině, nebylo možné prosvítit laserem všechny bubliny tak, aby bylo možné je kamerou vyfotit.



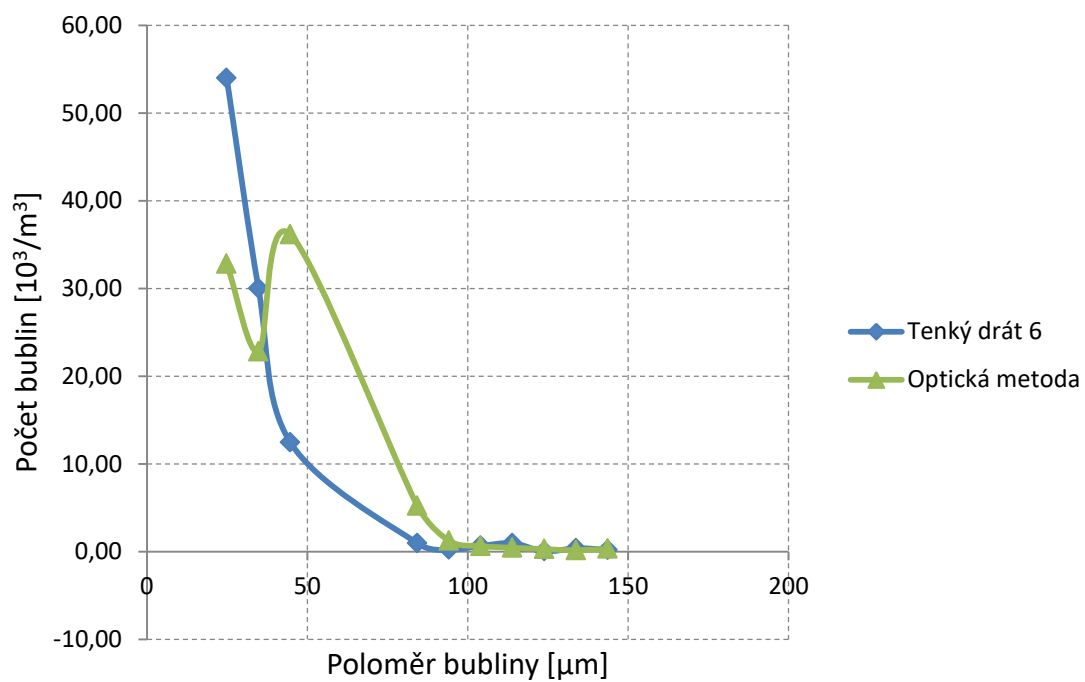
Obrázek 17 Bubliny vyhodnocené softwarem MountainsMap

Poloměr bubliny	Počet bublin	Ekvivalentní počet bublin	Rozložení bublin dle počtu
[μm]	[10^3]	[$10^3/\text{m}^3$]	[%]
24,85	166	1342303,587	4,35
34,75	316	2555,2285	8,29
44,65	1062	8587,5085	27,86
84,25	1037	8385,3543	27,20
94,15	343	2773,5550	9,00
104,05	239	1932,5937	6,27
113,95	220	1778,9566	5,77
123,85	189	1528,2854	4,96
133,75	132	1067,3739	3,46
143,65	108	873,3059	2,83

Tabulka 1 Hodnoty získané vyhodnocením snímku vysokorychlostní kamery

Hodnoty v Tabulce 1 ukazují, že v případě analýzy snímku bublin z vysokorychlostní kamery bylo vzhledem k malému rozlišení snímku a horšímu zaostření obtížné detekovat pomocí softwaru bubliny menších velikostí, které na snímku měly menší kontrast. Nicméně je zřejmé, že pomocí kvalitního snímku by se daly bubliny vyhodnotit s mnohem vyšší přesností. Celkové porovnání rozložení počtu bublin měřených akus-

tickou a optickou metodou je zobrazeno v grafu níže, který vychází z vypočtených hodnot spektra bublin v Příloze G.



Obrázek 18 Porovnání objemového rozložení bublin při měření pomocí ABS a optickou metodou

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření bublin v kapalině a vyhodnocováním jejich parametrů, kterými jsou počty a velikosti bublin. V první části byly popsány nejrozšířenější metody pro určování spektra bublin a kavitačního spektra, z nichž byl nejpodrobněji charakterizován akustický bublinkový spektrometr. Právě validace bublinkového spektrometru byla hlavním úkolem této bakalářské práce. Validace bylo docíleno porovnáním výsledků naměřených spektrometrem se zanalyzovanými snímky z vysokorychlostní kamery.

V rámci této práce bylo využito faktu, že použitím převodníků spektrometru o vhodných nominálních frekvencích, které dokáží snímat dané spektrum bublin, lze opakovaným měřením získávat výsledky obdobné u všech měření. Skutečnost, že výpočetní mechanismy softwaru ABS nevykazují lokální chyby v definovaných oblastech měření, dokazuje fakt, že při porovnávání spekter bublin z druhého měření byly v intervalech poloměrů bublin mezi 30 μm a 65 μm výsledky téměř na shodných hladinách. Nepřesnosti byly ovlivněny především vlastními chybami měření a časovou proměnností vygenerovaného spektra bublin.

Metoda generování bublin drátem se neukázala jako příliš vhodná pro validační měření. Autor předpokládá, že nepřesnosti měření mohly být způsobeny vlivem usazování různých vápenatých či hořečnatých a další oxidů ze zkoumané kapaliny. Drát se také mohl během manipulace mezi měřeními mírně zkřivit či jinak mechanicky poškodit, což mohlo mít vliv na rozsah další produkce bublin.

Porovnání hodnot ze spektrometru s výsledky z vysokorychlostní kamery se ukázalo jako vhodný prostředek pro validaci. Prosvětlení rovinného lineárního proudu bublin laserem a jeho následné snímání dokáže bubliny efektivně zaznamenat. Nicméně je důležité použít kvalitní snímací zařízení, které dokáže pořídit snímek ve vysokém rozlišení tak, aby následná analýza mohla být provedena s dostatečnou přesností. Právě vyhodnocení správných segmentů ze snímku je zásadní, aby byly velikosti a počty bublin zanalyzovány správně. Spektrum bublin snímaných kamerou mělo podobný charakter jako to ze spektrometru, neboť u menších bublin (44,65 μm a 84,25 μm) bylo procentuální zastoupení dle očekávání nejvyšší a s rostoucím poloměrem bubliny tento podíl klesal.

V rámci dalšího výzkumu by bylo přínosné nalézt vhodnou formu generování bublin, která by dokázala zajistit opakovatelnost měření a zároveň by umožnila produkovat

bubliny stejné velikosti. Poté by se dala provést validace s opravdu vysokou přesností. Jako jedna z vhodných možností se jeví produkce bublin přes speciální bambusové dřevo. V návaznosti na tuto práci je možné pokračovat ve výzkumné činnosti s akustickým bublinkovým spektrometrem. Výzkum by mohl být proveden v oblasti experimentálního vyhodnocování kavitačních bublin či proudů v bublinových zařízeních, jejichž optimalizace lze následně docílit.

Seznam použité literatury

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Oldřich TARABA, 1981. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

ČMELÍK, Milan, et al., 2001. *Fyzikální tabulky*. Liberec: TU Liberec. ISBN 9788070835159.

HUJER, Jan, 2010. *Diagnostika kavitace v hydraulickém tlumiči*. Liberec. Bakalářská práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce Ing. Miloš Müller, Ph.D.

CHAHINE, Georges L., Kenneth M. KALUMUCK, Jian-Yu CHENG, Gerry S. FREDERICK, 2011. *Validation of Bubble Distribution Measurements of the ABS Acoustic Bubble Spectrometer with High Speed Video Photography* [online]. [1. 6. 2018]. Dostupné z:

http://www.dynaflow-inc.com/Publications/pdf_documents/sessionA7.004.pdf

DURAI SWAMI, Ramani, Sankar PRABHUKUMAR, Georges L. CHAHINE, 1998. *Bubble counting using an inverse acoustic scattering method* [online]. [8. 6. 2018]. Dostupné z:

http://www.dynaflow-inc.com/Publications/pdf_documents/JASA-98-ABS1.pdf

LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA, 2015. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Páté vydání. Úvaly: Albra. ISBN 978-80-7361-111-8.

MEDWIN, Herman, 1977. *Counting bubbles acoustically: a review*. Ultrasonics. Leden 1977.

MIKULČÁK, J. et al., 1995. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy* 3. vydání., Praha: Prometheus.

NOSKIEVIČ, Jaromír, 1969. *Kavitace*. Praha: Academia.

VAZQUEZ, A., et al., 2005. *A look at three measurement techniques for bubble size determination*. Experimental Thermal and Fluid Science. Volume 30, Issue 1, October 2005, Pages 49-57.

WU, Xiong-jun, Georges L. CHAHINE, 2010. *Development of an acoustic instrument for bubble size distribution measurement* [online]. [1. 6. 2018]. Dostupné z: http://www.dynaflow-inc.com/Publications/pdf_documents/2010/C2-2-W124.pdf

WU, Xiong-jun, Georges L. CHAHINE, Chao-Tsung HSIAO, 2011. *ABS Acoustic bubble spectrometer User manual* [online]. [1. 6. 2018]. Verze 6.0. Dostupné z: http://www.dynaflow-inc.com/Publications/pdf_documents/ABS_Manual_v6_0.pdf

Fyzikální tabulky [online]. [1. 6. 2018]. Dostupné z:
<http://www.converter.cz/tabulky/index.htm>

Seznam příloh

- A. Tabulka hodnot z prvního měření
- B. Tabulka hodnot z druhého měření
- C. Protokol o měření hustoty
- D. Protokol o měření dynamické viskozity
- E. Analyzovaný snímek z vysokorychlostní kamery
- F. Příklad zprůměrovaných výsledků měření pomocí ABS
- G. Tabulka objemového rozložení bublin měřených akustickou a optickou metodou

Příloha A - Tabulka hodnot z prvního měření

	Tlustý drát	Tenký drát (vyšší napětí)	Tenký drát (nižší napětí)
Poloměr bubliny	Počet bublin	Počet bublin	Počet bublin
[μm]	[$10^3/\text{m}^3$]	[$10^3/\text{m}^3$]	[$10^3/\text{m}^3$]
24,85	0,0000	0,0000	100,0000
34,75	33,4163	36,6737	90,0000
44,65	19,8532	14,8293	80,0000
54,55	0,3642	36,0382	71,4843
94,15	1,5358	57,7102	42,9216
104,05	3,3376	19,9277	33,3283
113,95	3,2415	35,7620	73,0689
133,75	4,0974	10,1683	6,6692
143,65	5,4134	14,4494	15,1379
163,45	3,3414	5,6151	7,0527
173,35	3,2829	5,8886	0,0000
193,15	0,0000	0,0000	3,0569
203,05	1,2664	1,6259	5,9733
222,85	1,1742	0,5939	8,1827
262,45	0,8622	0,4617	1,0045

Příloha B - Tabulka hodnot z druhého měření

	Tenký drát 5	Tenký drát 6	Součet 5 a 6	Najednou 5 a 6	
Poloměr bubliny	Počet bublin	Počet bublin	Počet bublin	Počet bublin	Rozdíl
[μm]	[$10^3/\text{m}^3$]	[$10^3/\text{m}^3$]	[$10^3/\text{m}^3$]	[$10^3/\text{m}^3$]	%
24,85	23,4297	1913,1486	1936,5783	6164,2299	68,58
34,75	1538,2650	1063,9728	2602,2378	2875,9731	9,52
44,65	790,8410	442,1813	1233,0223	1050,7429	17,35
84,25	21,7262	34,3991	56,1253	22,5409	148,99
94,15	24,6136	8,2776	32,8912	77,2543	57,42
104,05	15,6679	23,5084	39,1763	1,8877	1975,35
113,95	38,3199	34,3364	72,6564	29,3903	147,21
123,85	0,0000	1,6279	1,6279	0,0000	-
133,75	13,4985	13,9700	27,4685	6,3727	331,04
143,65	17,9982	7,8857	25,8839	10,2638	152,19

Měření hustoty hustoměrem DMA – 35

Datum měření: 10. 6. 2018

Místo měření: laboratoř Katedry energetických zařízení TUL

Měření provedl: Matěj Burda

Princip zařízení

Hustoměr DMA – 35 měří hustotu na základě porovnávání oscilace trubice ve tvaru „U“, která je naplněna zkoumanou kapalinou. Po naplnění trubice se elektronicky rozkmitá na své vlastní frekvenci a na základě odlišně změřené frekvence se určí hustota kapaliny. Nižší frekvence odpovídá vyšší hustotě kapaliny.

Postup měření

1. Do nádrže jsem napustil zkoumanou kapalinu (kohoutkovou vodu).
2. Hustoměr jsem vyčistil.
3. Na hustoměru jsem stiskl píst nasávací pumpičky a do vody jsem ponořil nasávací trubici hustoměru.
4. Pomalým uvolněním pístu jsem nasál kapalinu do hustoměru.
5. Odečetl jsem hodnotu hustoty a teploty z digitálního displeje hustoměru.
6. Měření jsem 10 krát opakoval.

Tabulka naměřených hodnot

Číslo měření	Naměřená hustota [kg/m ³]	t [°C]
1	998,1	20,3
2	998,1	21,2
3	998,3	19,8
4	998,2	20,1
5	998,1	20
6	998,1	20,1
7	997,5	20
8	998,0	20,1
9	997,9	20,1
10	998,0	20,2

Výpočty

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \rho_i}{10} = (998,03 \pm 0,2) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$
$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_i}{10} = (20,19 \pm 0,35) ^\circ\text{C}$$

Závěr

Aritmetický průměr naměřených hodnot hustoty byl 998,03 kgm⁻³ při průměrné teplotě 20,19°C.

Měření dynamické viskozity vibračním viskozimetrem SV 10

Datum měření: 10. 6. 2018

Místo měření: laboratoř Katedry energetických zařízení TUL

Měření provedl: Matěj Burda

Princip zařízení

Vibrační viskozimetr zjišťuje, při jakém budicím elektrickém proudu se snímací částí ve formě tenkého plechu ponořené do kapaliny rozkmitají na svou rezonanční frekvenci. Podle velikosti budicího proudu se určí výsledná dynamická viskozita.

Postup měření

1. Nádobku viskozimetru jsem naplnil 30 ml zkoumané kohoutkové vody.
2. Snímací destičky viskozimetru jsem ponořil do kapaliny.
3. Zmáčknutím tlačítka „start“ jsem zahájil měření.
4. Odečetl jsem hodnotu dynamické viskozity a teploty z displeje a měření 5 krát opakoval.

Tabulka naměřených hodnot

Číslo měření	Dynamická viskozita [mPa·s]	t [°C]
1	1,2	21,8
2	1,21	22,3
3	1,2	22,5
4	1,2	22,8
5	1,2	22,9

Číslo měření	Dynamická viskozita [mPa·s]	t [°C]
1	1,25	18,5
2	1,25	18,6
3	1,25	18,6
4	1,24	18,6
5	1,24	18,7

Výpočty

1. měření

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_1^5 \eta_i}{5} = (1,202 \pm 0,004) \text{ mPa} \cdot \text{s}$$
$$\bar{t} = \frac{\sum_1^5 t_i}{5} = (22,46 \pm 0,4) ^\circ\text{C}$$

2. měření

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_1^5 \eta_i}{5} = (1,246 \pm 0,005) \text{ mPa} \cdot \text{s}$$
$$\bar{t} = \frac{\sum_1^5 t_i}{5} = (18,6 \pm 0,06) ^\circ\text{C}$$

Závěr

Při průměrné teplotě 22,46°C byla naměřena dynamická viskozita 1,202 mPa·s. Při průměrné teplotě 18,6°C byla naměřena dynamická viskozita 1,246 mPa·s.

Příloha E - Analyzovaný snímek z vysokorychlostní kamery



Příloha F - Příklad zprůměrovaných výsledků měření pomocí ABS

```
*****
*          BUBBLE SIZE DISTRIBUTION          *
*                                          *
*                                          *
* ABS Acoustic Bubble Spectrometer          *
* Version 6.05a                             *
* Copyright (C) Dynaflow, Inc. 1998-2013.   *
*                                          *
*****
```

Bubble_radius(micron)	Number_of_bubbles(thousand/m ³)	Void_fraction_contribution	Percentage_of_void_fraction_contribution(%)
44.65	927.64587	2.5645712e-007	17.29433
94.15	50.753557	1.5593917e-007	10.515845
104.05	28.547376	1.2017686e-007	8.1041942
113.95	42.047158	2.3539336e-007	15.873884
123.85	2.3356954	1.6965001e-008	1.1440444
133.75	17.994905	1.6609296e-007	11.200572
143.65	23.924868	2.7569491e-007	18.591641
163.45	11.580727	1.990819e-007	13.4252
173.35	2.7696086	5.7095844e-008	3.8502903

Příloha G - Tabulka objemového rozložení bublin měřených akustickou a optickou metodou

Měření bublinkovým spektrometrem	Optická metoda
Tenký drát 5	Snímek
Objemové rozložení bublin	
[%]	[%]
53,99	32,80
30,03	22,84
12,48	36,18
0,97	5,26
0,23	1,25
0,66	0,64
0,97	0,45
0,05	0,30
0,39	0,17
0,22	0,34