



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VZÁJEMNÁ INTERAKCE MAGNETICKÉHO POLE A
KAVITUJÍCÍHO PROUDĚNÍ**

MUTUAL INTERACTION OF MAGNETIC FIELD AND CAVITATING FLOW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Přemysl Harazin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Přemysl Harazin
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Fluidní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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

Vzájemná interakce magnetického pole a kavitujícího proudění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na pohybující se elektricky nabitou částici silově působí magnetické pole (magnetická indukce). Velikost této síly (Lorentzova síla) je přímo úměrná rychlosti pohybu nabitě částice. V případě kolapsu kavitačních bublin v poli permanentních magnetů dochází k rychlostem řádově větším než samotnou konvekcí proudu kapaliny. Jev by měl být pozorovatelný experimentálně měřením indukovaného napětí.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše dostupných literárních zdrojů o vlivu magnetického pole na kavitující proudění.
2. Rozbor vlivu magnetického pole na kavitující proudění z pohledu Maxwellových rovnic a rovnice Rayleigh–Plessetovy.
3. Návrh experimentálního zařízení pro výzkum vlivu magnetického pole na kavitující proudění.
4. Provedení a vyhodnocení experimentu.
5. Diskuse výsledků, závěr.

Seznam doporučené literatury:

HAMMITT, F.G. Effects of magnetic and electric fields upon cavitation in conducting and non-conducting liquids - Russian research results. University of Michigan, 1974.

GIMENEZ, G. Electrical pulses produced by cavitation bubbles. Journal of Physics D. 1979, 12, 37-39.

HONGRAY, T., B. ASHOK a J. BALAKRISHNAN. Effect of charge on the dynamics of an acoustically forced bubble. Nonlinearity. 2014, 27, 1157-1179.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Práce je složena z rešeršní a experimentální části. V rešeršní části je podrobně řešeno vzájemné ovlivnění mezi magnetickým polem a vodou a mezi magnetickým polem a kavitací.

Jelikož jsou názory na ovlivnění často protichůdné, tak nelze dost dobře odhadnout reálný vliv magnetického pole na vodu či kavitaci.

Experimentální část se skládá ze tří pokusů s permanentními magnety. Měřeno bylo napětí mezi magnety pomocí elektromagnetické sondy. Ze všech pokusů plyne, že magnetické pole na kavitaci může mít vliv, jelikož po přechodu z bezkavitačního do kavitačního proudění došlo ke změně měřených hodnot. Změny však nebyly natolik zásadní, aby bylo možné doporučit využití tohoto jevu v praxi například pro zabíjení sinic, či výrobě nanoprášků.

klíčová slova: Magnetické pole, napětí, kavitace, Rayleigh-Plessetova rovnice, sinice

Abstract

Presented work consists of research and experimental part. Main focus of the research part is on mutual interaction between magnetic field and water and between magnetic field and cavitating flow. Prediction of the result is almost impossible, because the opinions on the effects differ, sometimes even go against each other.

Experimental part consisted of three trials with permanent magnets. Electromagnetic probe was employed for measuring of the voltage. It appears, that magnetic field affects the cavitation, because in all of the trials the measured voltage changed after the switch from non-cavitating to cavitating flow. The change of the voltage was not great enough, thus application of this phenomenon in practice cannot be recommended.

key words: Magnetic field, voltage, cavitation, Rayleigh-Plesset equation, cyanobacteria

Bibliografická citace

HARAZIN, P. *Vzájemná interakce magnetického pole a kavitujícího proudění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 64 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Vzájemná interakce magnetického pole a kavitujícího proudění* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dostupných parametrů uvedených v seznamu literatury.

Dne 24.5.2018

.....

Bc. Přemysl Harazin

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Rudolfovi za rady a pomoc s vypracováním mé diplomové práce. Také chci poděkovat inženýru Hudci, panu Kusému a panu Večeřovi za veškerou pomoc s experimentální částí diplomové práce a rovněž doktoru Machovi a doktoru Streckerovi za zapůjčení měřicích přístrojů. Nakonec chci poděkovat mé rodinně za podporu během celé doby studia a také partačce Kristýně Grešákové za pomoc s překonáním těžkých chvil.

Obsah

1 Úvod	10
2 Základní pojmy	11
2.1 Molekuly vody	11
2.2 Sinice a další mikroorganismy	12
3 Kavítace	13
3.1 Popis kavítace	13
3.2 Typy kavítace	14
3.3 Rayleigh - Plessetova rovnice	14
3.4 Vliv povrchového náboje na Rayleigh-Plessetovu rovnici	17
4 Magnetické pole	18
4.1 Generování stacionárního magnetického pole	18
4.2 Maxwellovy rovnice	18
4.3 Napětí vzniklé změnou magnetického toku v čase	19
4.4 Rayleigh-Plessetova rovnice doplněná o působení magnetického pole	20
5 Vzájemné ovlivnění	22
5.1 Vliv magnetického pole na vodu a její stavbu	22
5.2 Vliv magnetického pole na kavítaci	23
6 Možnosti praktického využití kavítace ovlivněné magnetickým polem	26
7 Experimentální zjištění vlivu magnetického pole vyvolaného stacionárními magnety na kavítaci	29
7.1 Měření napětí pomocí sondy	29
7.2 Pokus I	29
7.3 Použité zařízení	31
7.4 Výsledky pokusu I	31
7.5 Pokus II	35
7.6 Použité zařízení a výpočet nejistoty měření	37
7.7 Výsledky pokusu II	39
7.8 Pokus III	43
7.9 Použité zařízení a výpočet nejistoty měření	44
7.10 Výsledky pokusu III	46
8 Diskuze	50
9 Závěr	52
10 Seznam použitých zdrojů	53
11 Seznam použitých zkratk a symbolů	60
12 Seznam obrázků a tabulek	61
13 Seznam příloh	64

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je provést rešerši zabývající se vlastnostmi vody, magnetickým polem a kavitací. Součástí rešerše je i rozbor vlivu magnetického pole na kavitující proudění z pohledu Rayleigh-Plessetovy rovnice a také z pohledu Maxwellových rovnic. V práci jsou uvedeny i možné příklady využití v praxi. Mezi další cíle práce patří vytvoření experimentálního zařízení a provedení experimentu s následným vyhodnocením výsledků.

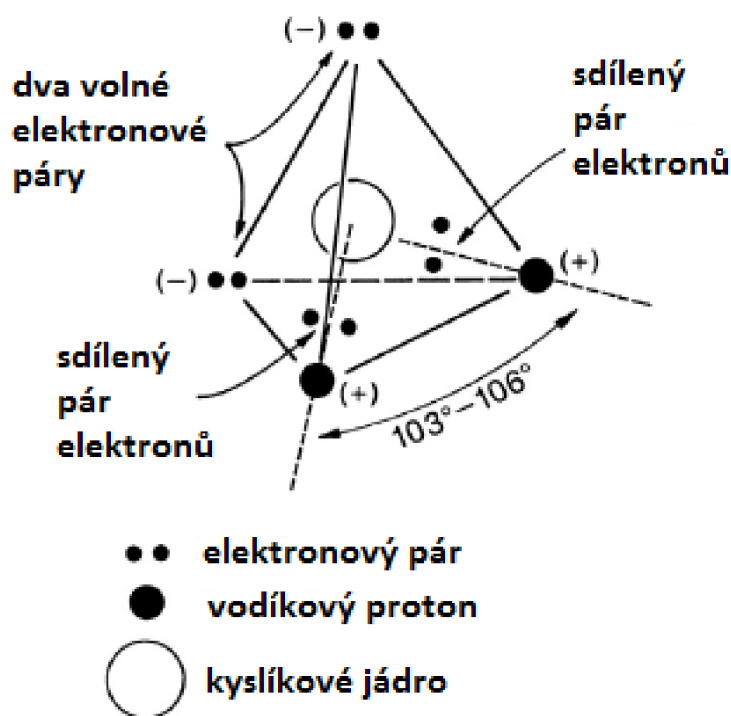
2 Základní pojmy

Tato kapitola obsahuje vysvětlení základních pojmů, které jsou nezbytné pro další práci s textem.

2.1 Molekuly vody

Kovalentní vazba

Kovalentní vazba je přítomna mezi kyslíkem a vodíkem. Je založena na velkém rozdílu elektronegativit. Kyslík je v periodické tabulce prvků v 6. skupině a tedy má 6 elektronů ve valenční vrstvě. Navázáním dvou vodíků¹ dojde k odebrání dvou elektronů a tedy kyslíku zůstanou dva volné elektronové páry. Tyto nenavázané páry způsobí, že část molekuly vody je nabita záporně. Druhá část molekuly je nabita kladně, jelikož vodík věnuje svůj elektron do vazby. Protože je molekula vody ve „vodíkové“ části nabita pozitivně a v „kyslíkové“ části negativně, molekula vody tvoří elektrický dipól. [35]



Obrázek 1: Model molekuly vody tvaru tetraedru. [35]

Vodíkové vazby

Jsou přítomny opět mezi vodíkem a kyslíkem, avšak na rozdíl od kovalentní vazby nemají základ v překrytí valenčních orbitalů. Principem vazby je nevykompenzovaný náboj oněch dvou elektronových párů, který způsobí, že jedna strana molekuly je více negativní, než druhá. K této negativní části molekuly je přitahována kladná část jiné molekuly. Tento typ vazby je přibližně desetkrát slabší než kovalentní vazba. [35]

¹Vodík s kyslíkem mají takzvaný sdílený elektronový pár, kdy vodík i kyslík věnují každý jeden elektron.

Vodní clustery a jejich magická čísla

Vodní cluster je shluk molekul vody, které jsou drženy u sebe pomocí vodíkových vazeb. Velikost clusteru může dosáhnout až $200 \mu\text{m}$ a délka jeho života se pohybuje v řádu desítek sekund. V souvislosti s clustery je důležité vysvětlit pojem „Magická čísla“. Magická čísla vyjadřují nejčastější a nejstabilnější konfigurace, ve kterých se clustery nachází. Změna magických čísel by tedy indikovala změnu ve stabilitě a tedy následně i změnu ve vazbách. Jedná se o čísla: 1, 4, 6, 7, 11 a 13, kde číselné označení clusteru značí počet kyslíků v clusteru a tedy zároveň počet vodních molekul. [57] [58]

Povrchové napětí a viskozita

Povrchové napětí je způsobeno přitažlivými silami mezi molekulami. Dochází k vytvoření tenké blány, která funguje jako rozhraní mezi kapalnou a plynnou fází. [57]

Viskozitu je možno definovat, jako odpor proti tečení. Tečení kapaliny je závislé na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti molekul. Čím větší molekuly, tím pomaleji kapalina teče. [35] [57]

2.2 Sinice a další mikroorganismy

Viry

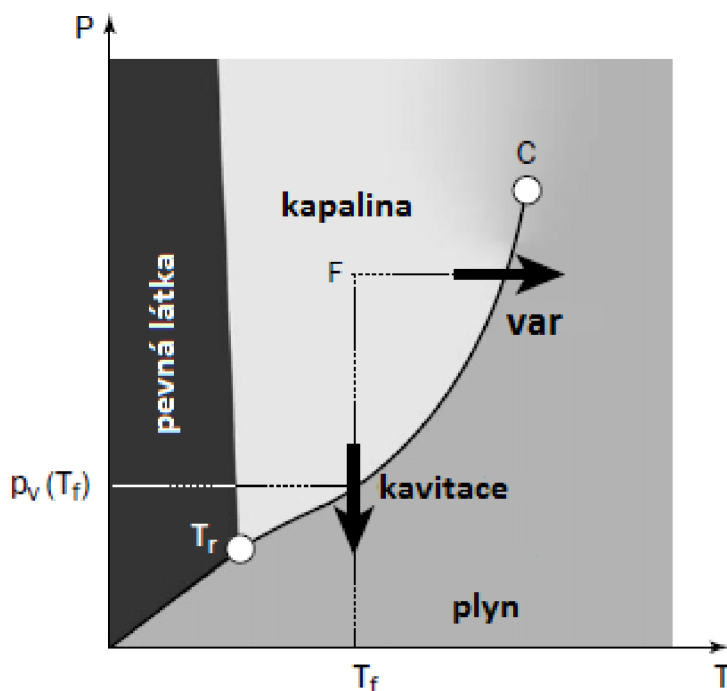
Virus je ve zjednodušeném pojetí možno chápat jako DNA či RNA v proteinovém obalu. Proteinový obal se nazývá kapsida. Viry, které mají pouze kapsidu, se nazývají neobalené a jsou relativně odolné vůči vnějšímu prostředí. K infekci tedy může dojít i nepřímým kontaktem (například vodou). Viry, které mají kromě kapsidy ještě navíc lipoproteinový obal, se nazývají obalené a jsou méně odolné vůči vnějšímu prostředí, než neobalené viry. K přenosu tedy většinou dochází přímým kontaktem. Velikost virů se pohybuje v rozmezí od 20 nm do 300 nm. [30] [37]

Bakterie

Bakterie je jediná buňka schopná samostatného života. Skládá se z cytoplazmy, cytoplazmatické membrány, ribozomů, buněčné stěny, jádra a plazmidů. Cytoplazma je roztok, který vyplňuje celou buňku. V tomto roztoku jsou ribozomy a jaderná hmota, která obsahuje DNA. Cytoplazmu obaluje cytoplazmatická membrána, která izoluje vnitřní a vnější prostředí a zajišťuje přenos látek mezi vnějším a vnitřním prostředím. Většina bakterií je pak kryta buněčnou stěnou, která má za úkol chránit bakterii. Velikost bakterií se přibližně pohybuje mezi 200 nm až $60 \mu\text{m}$. [30] [59]

Sinice

Vnitřní stavbou se podobají bakteriím a stejně jako bakterie jsou jednobuněčné. Mohou se spojovat do vláken a jsou kryty slizovým obalem. Obsahují plynové vezikuly, což jsou měchýřky, které udržují sinici na takovém místě ve sloupci kapaliny, aby měla dostatek živin a světla pro správnou funkci. Některé druhy jsou schopny vypouštět toxiny. U nás je nejrozšířenější druh sinice *Microcystis aeruginosa*, žijící ve stojatých vodách, která produkuje toxin microcystin. Tento toxin je ve vodě dobře rozpustný, je vysoce odolný a stabilní. Při průniku do těla napadá hlavně játra, ale negativně působí i na střeva, ledviny, plíce a kůži. [5] [29] [30] [40]



Obrázek 2: Fázový diagram znázorňující princip kavitace, p_v značí tlak sytých par pro danou teplotu [15]

3 Kavítace

V této kapitole je popsána kavítace a zároveň je zde odvozena základní Rayleigh-Plessetova rovnice. Upravená Rayleigh-Plessetova rovnice se zahrnutým vlivem magnetického pole je v kapitole 4.4.

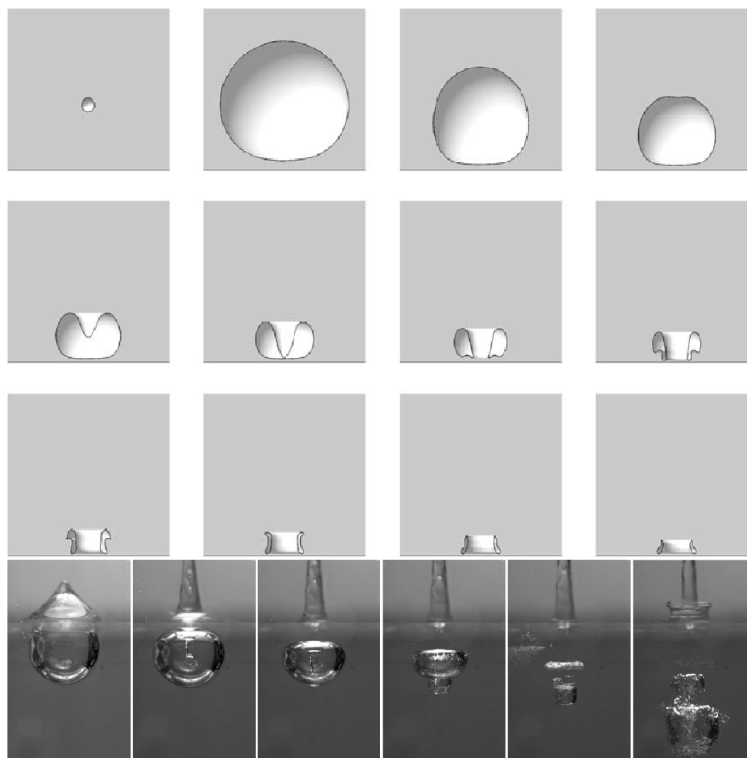
3.1 Popis kavitace

Kavítace je jev, kdy dochází k vytvoření bublinek v kapalině, jako následek poklesu tlaku v kapalině pod tlak sytých par dané kapaliny při dané teplotě. (Obrázek 2)

Tyto bublinky jsou naplněny parami okolní kapaliny a také plyny v kapalině obsaženými. Jestliže dojde k dalšímu snížení tlaku, bublina se zvětší. Jestliže naopak dojde ke zvýšení tlaku v okolní kapalině nad tlak sytých par, pak dojde k implozi bubliny (Obrázek 3).

Imploze bubliny následně způsobí tlakové vlny. Pokud dojde k implozi bubliny poblíž jakéhokoliv povrchu, dochází na něm k erozi, přičemž rychlost eroze závisí na typu materiálu. Při vytvoření mikrotrysky rovněž dojde k prudké kompresi plynů uvnitř bubliny a tedy dojde k rapidnímu zvýšení teploty.

Bubliny se přednostně začnou vytvářet na kavitačních jádrech. Kavitační jádro může být tvořeno například mechanickou nečistotou či nerozpuštěným plynem a narušuje spojitost kapaliny. [9] [15] [46]



Obrázek 3: Imploze bubliny je zahájena vytvořením mikrotrysky a to tak, že kapalina proniká blánou velmi malým otvorem na rozhraní mezi kapalinou a plynem a pod velkou rychlostí proudí na protější stěnu. Poté následuje rozdělení bubliny a její rozpuštění, nebo může dojít k rozdělení na větší počet malých bublin, či k opětovnému vzniku/zvětšení bubliny. [50] [53]

3.2 Typy kavitace

Hydrodynamická kavitace

Vzniká při proudění kapaliny takovou rychlostí, že v návaznosti poklesne tlak pod hodnotu tlaku sytých par. [46]

Akustická kavitace

Vzniká průchodem tlakové vlny, vyvolané kmitajícím pevným povrchem, kapalinou. Jestliže je hodnota amplitudy tlakové vlny dostatečná, pak dojde k „roztržení“ kapaliny a vzniku kavitace. [9] [46]

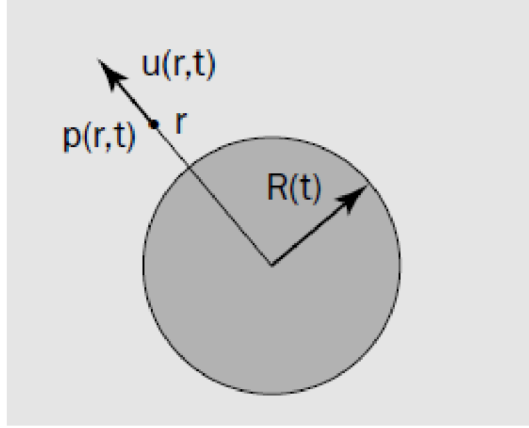
3.3 Rayleigh - Plessetova rovnice

Tato rovnice popisuje dynamiku kavitační bubliny. Její význam spočívá v určení časového průběhu vývinu poloměru bubliny a z toho pramenící možnost určení tlakového pole v kapalině. Jedná se o obyčejnou diferenciální nelineární rovnici. [15]

Následující odvození je platné pro tyto předpoklady

- Tekutina je nestlačitelná a Newtonská.
- Gravitace je zanedbána.

- Obsah vzduchu v bublině je konstantní, setrvačnost i přenos tepla jsou zanedbány.
- Bublina je nasycena parou, jejíž parciální tlak je roven tlaku par při dané teplotě okolní vody.



Obrázek 4: Bublina

Normálové napětí na rozhraní je

$$t_{RR}(R, t) = -p(R, t) + 2\nu \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (1)$$

Rovnováha normálových sil působících na rozhraní je dána

$$-t_{RR}(R, t) = p_v + p_g(t) - \frac{2\sigma}{R} \quad (2)$$

Jestliže předpokládáme adiabatickou transformaci plynu, pak okamžitý tlak plynu je propojen s počátečním tlakem p_{g0} vztahem

$$p_g(t) = p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} \quad (3)$$

Porovnáním rovnic (1) a (2) a následným vyjádřením tlaku na rozhraní bubliny vznikne

$$p(R, t) = p_v + p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} - \frac{2\sigma}{R} + 2\nu \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (4)$$

Ve velké vzdálenosti od bubliny je rychlost kapaliny považována za nulovou a hodnota tlaku je známá. Na počátku je bublina v rovnovážném stavu a tedy $\dot{R} = 0$. Z toho plyne rovnice (5)

$$p_{\infty 0} = p_{g0} + p_v - \frac{2\sigma}{R_0} \quad (5)$$

Díky kulové symetrii je tok kapaliny zajištěn díky přítomnosti zdroje nebo propadu, z čehož plyne, že proudění je potenciální.

Ze zákona zachování hmotnosti pro nestlačitelnou kapalinu $\text{div}(v) = 0$ plyne (6)

$$u(R, t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (6)$$

Pro tento konkrétní příklad platí, že viskózní člen v Navier-Stokesově rovnici je nulový a tedy pro viskózní i neviskózní kapalinu platí následující hybnostní rovnice (7)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{p}{r} \quad (7)$$

Po dosazení rovnice (6) do rovnice (7) vznikne

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (8)$$

Po integraci rovnice (8) a dosazení hodnot ve velké vzdálenosti od bubliny

$$\frac{p(r, t) - p_\infty(t)}{\rho} = \ddot{R} \frac{R^2}{r} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right] \quad (9)$$

Na rozhraní bubliny platí $r=R$. Po dosazení do (9)

$$\frac{p(r, t) - p_\infty(t)}{\rho} = \ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (10)$$

Poslední potřebná úprava spočívá ve vztahu

$$\frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\frac{2\dot{R}}{R} \quad (11)$$

Po dosazení rovnic (4) a (11) do rovnice (10) vznikne Rayleigh-Plessetova rovnice (12).

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] - \left(p_{\infty 0} - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} + \frac{2\sigma}{R} + 4\nu \frac{\dot{R}}{R} = p_v - p_\infty(t) \quad (12)$$

kde:

K [–]... Poissonova konstanta

p [Pa]... tlak kapaliny

r [m]... radiální polohový vektor

R [m]... poloměr bubliny

t [s]... čas

t_{RR} [Pa]... normálové (radiální) napětí

u [ms^{-1}]... normálová (radiální) složka rychlosti

ν [$Pa \cdot s$]... dynamická viskozita

ρ [kgm^{-3}]... hustota

σ [Nm^{-1}]... povrchové napětí mezi vodou a směsí plynů

Indexy:

g... tlak plynu

v... tlak par

∞ ... tlak ve velké vzdálenosti od bubliny

0... počáteční stav

Odvození bylo převzato z literatury [15].

3.4 Vliv povrchového náboje na Rayleigh-Plessetovu rovnici

Přítomnost náboje na povrchu bubliny byla dokázána². Náboj na povrchu bubliny je médium, přes které by magnetické pole mohlo ovlivňovat dynamiku bubliny. Z toho důvodu je nutné včlenit vliv náboje na povrchu bubliny do Rayleigh-Plessetovy rovnice. Následující rovnice je převzata z [20] a platí pro viskózní dielektrickou kapalinu.

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] - \left(p_{\infty 0} - p_v + \frac{2\sigma}{R_0} - \frac{Q^2}{8\pi\epsilon R_0^4} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} + 4\nu \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma}{R} - \frac{Q^2}{8\pi\epsilon R^4} = p_v - p_{\infty}(t) \quad (13)$$

kde:

Q [As]... náboj na povrchu bubliny

ϵ [$A^2kg^{-1}m^{-3}s^4$]... elektrická permitivita

V rovnici (13) je možné identifikovat členy $\frac{Q^2}{8\pi\epsilon R_0^4}$ a $\frac{Q^2}{8\pi\epsilon R^4}$ vztahující se k působení náboje na bublinu.

²Byl proveden pokus s bublinami, které byly vychýleny účinkem elektromagnetického pole, a tedy se prokázalo, že bubliny mají na svém povrchu negativní náboj [2]

4 Magnetické pole

V této kapitole jsou uvedeny základní rovnice popisující magnetické pole a rovněž je zde provedeno odvození upravené Rayleigh-Plessetovy rovnice.

4.1 Generování stacionárního magnetického pole

Magnetické látky se dělí na

1. feromagnetické
2. paramagnetické
3. diamagnetické

Tyto látky se liší ve způsobu, jakým ovlivňují magnetické pole. Zatímco feromagnetické látky magnetické pole značně zesilují a látky paramagnetické jej zesilují mírně, látky diamagnetické magnetické pole zeslabují. Rozřazení do jednotlivých kategorií je závislé na způsobu uspořádání dané látky. Ve feromagnetických látkách dochází k ovlivnění elektronů kroužících kolem jádra takovým způsobem, že směr jejich indukce je po připojení vnějšího pole orientován stejně jako vnější pole a tedy dojde k celkovému zesílení pole. Orientování elektronů je způsobeno Lorentzovou silou. Toto natočení zůstává konstantní i po odstranění působícího pole. Takto vznikají permanentní magnety generující stacionární magnetické pole. U látek diamagnetických nemůže k podobnému natočení dojít. Přirozené uspořádání je pak takového směru, že působí proti vnějšímu poli a tedy jeho celkovou velikost snižuje. [54]

4.2 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice popisují elektrické a magnetické pole.

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho_n \quad (14)$$

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad (15)$$

$$\operatorname{rot}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16)$$

$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

kde:

D [$Am^{-2}s$]... vektor elektrické indukce

ρ_n [$Am^{-3}s$]... hustota nábojů

B [$A^{-1}kgs^{-2}$]... vektor magnetické indukce

H [Am^{-1}]... vektor intenzity magnetického pole

j [Am^{-2}]... vektor hustoty elektrického proudu

t [s]... čas

E [$A^{-1}kgms^{-3}$]... vektor intenzity elektrického pole

Pro další práci bude využita rovnice (16). Tato rovnice vyjadřuje skutečnost, že magnetické pole je propojeno s polem elektrickým tak, že velikost rotace pole magnetické intenzity a směr osy, kolem které rotace probíhá, je rovna součtu vektoru hustoty elektrického proudu a parciální

časové derivace vektoru elektrické indukce. Vyplývá z ní rovněž vztah pro Lorentzovu sílu (rovnice 18). [54]

$$\vec{F} = Q_n (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (18)$$

kde:

F [$kgms^{-2}$]... Lorentzova síla

Q_n [As]... náboj

v [ms^{-1}]... rychlost částice

Lorentzova síla ovlivňuje částice při průchodu magnetickým polem čímž dochází k jejich vychýlení. [60]

4.3 Napětí vzniklé změnou magnetického toku v čase

Odvození je převzato z knihy [56].

Implicitní rovnice

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (19)$$

a

$$\text{div}(\vec{j}) = 0 \quad (20)$$

Ohmův zákon

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (21)$$

Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (22)$$

Ampérův zákon

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_m \vec{j} \quad (23)$$

kde:

μ_m [$A^{-2}kgms^{-2}$]... magnetická permeabilita

Rovnice magnetické indukce je odvozena aplikací operátoru rotor na Ohmův zákon (rovnice (21)).

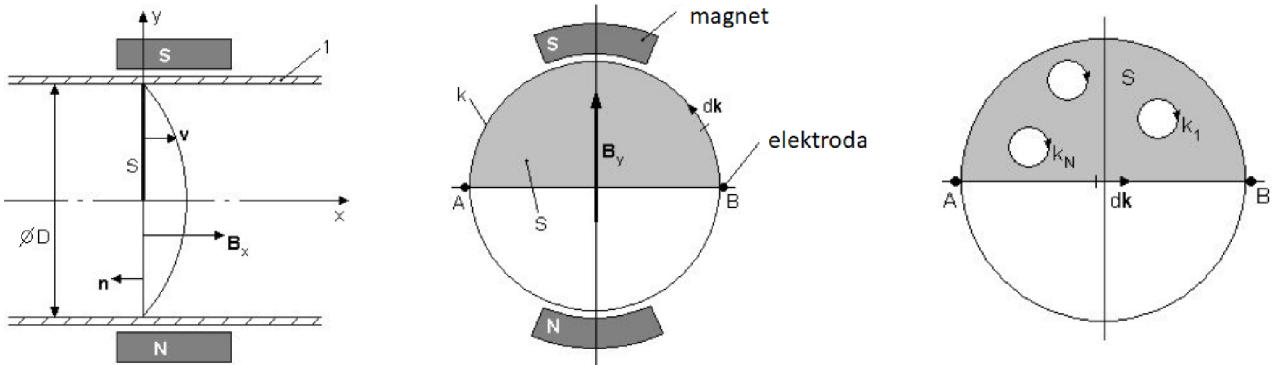
$$\text{rot} \left(\frac{\vec{j}}{\sigma} \right) = \text{rot}(\vec{E}) + \text{rot}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (24)$$

Následně je nahrazen $\text{rot}(\vec{E})$ pomocí 4. Maxwellovy rovnice a $\text{rot}(\vec{j})$ je nahrazen rotorem 3. Maxwellovy rovnice, kde je zanedbán vliv vektoru elektrické indukce. Také dojde k využití identity (rovnice (25))

$$\text{rotrot}\vec{B} = \text{rotdiv}(\vec{B}) - \nabla^2(\vec{B}) \quad (25)$$

Tímto způsobem je odvozena indukční rovnice (26). [56]

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rotrot}(\vec{v} \times \vec{B}) + \frac{l}{\mu_m \sigma} \nabla^2 \vec{B} \quad (26)$$



Obrázek 5: Pohybující se kavitální bubliny v potrubí, A a B jsou elektromagnetické sondy [14]

Z rovnice (26) je poté možné dále vyjít a získat rovnici (27) pro napětí mezi elektromagnetickými sondami A a B. [14]

$$U = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \vec{n} dS + D |\vec{B}_\gamma| v_s + \sum_{l=1}^N (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{k}_l \quad (27)$$

kde:

v_s [ms^{-1}]... střední rychlost

4.4 Rayleigh-Plessetova rovnice doplněná o působení magnetického pole

Tato rovnice vzniká syntézou základní RP rovnice a Lorentzovy síly. Lorentzova síla je odvozena na základě Maxwellovy rovnice (16). Tuto sílu je poté potřeba zahrnout do silové rovnováhy působící na rozhraní bubliny. Odvození je založeno na základě zákona zachování energie. Princip³ tkví v tom, že jestliže dojde za daný čas ke změně energie kinetické, pak se tatáž změna projeví v energii potenciální. Následující rovnice je převzata z [44].

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] + \frac{2\sigma}{R} + \left(-p_{\infty 0} + p_v - \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} + p_B = +p_v - p_{\infty}(t) \quad (28)$$

kde

$$p_B = C_0 v_1 |P_{H_2O}| |B| \frac{\rho N_A}{M_{H_2O}} L \quad (29)$$

kde:

P_{H_2O} [Cm]... elektrický dipólový moment

N_A [-]... Avogadrova konstanta

M_{H_2O} [$kgmol^{-1}$]... Molární hmotnost vody

L [m]... vzdálenost bubliny od stěny

C_0 [-]... konstanta

³Za předpokladu neuvažování tření

Alternativní rovnice

Jiné vyjádření vlivu magnetického pole na kavitální bublinu lze najít v práci [33]

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{4}{Re}\frac{\dot{R}}{R} + \frac{2}{3}NR\dot{R} + \frac{2}{We}\frac{1}{R} - p_{g0}\left(\frac{1}{R}\right)^{3\kappa} = \frac{p_{vap} - p_{\infty}}{|p_{vap} - p_{\infty}|} \quad (30)$$

kde

$$N = \frac{\sigma B_0^2 R_0}{|\rho(p_{vap} - p_{\infty})|^{0,5}} \quad (31)$$

$$We = \frac{|p_{vap} - p_{\infty}| R_0}{\gamma} \quad (32)$$

$$Re = \frac{R_0}{\nu} \left(\frac{|p_{vap} - p_{\infty}|}{\rho} \right)^{0,5} \quad (33)$$

Poslední možností, jak se dopracovat k tlaku magnetického pole působícího na bublinu je využít Maxwellova vyjádření pro pole, přičemž je zjištěno, že tlak působící na bublinu dosahuje až 80 000 Pa. [6]

5 Vzájemné ovlivnění

V této kapitole je podrobně uvedeno, jakým způsobem může magnetické pole ovlivnit molekuly vody a kavitaci. Je však na místě poznamenat, že vliv magnetického pole je značně diskutovanou a kontroverzní záležitostí. Srovnání výsledků je rovněž zkomplikováno rozdílnou magnetickou indukcí použitou v pokusech (od řádu desítek mT až po jednotky až desítky T). Stejně tak rozdílné je i složení vody v každém pokusu, což rovněž může značně ovlivnit výsledky. Dalším vlivem je rozdílnost použitých metod pro generování magnetického pole, přičemž v pokusech byly využity klasické stacionární magnety, supravodivé magnety i cívky generující jak stacionární, tak i nestacionární - alternující magnetické pole.

5.1 Vliv magnetického pole na vodu a její stavbu

Vzhledem k tomu, že voda je diamagnetická, lze u vody pozorovat takzvaný „Mojžíšův efekt“, kdy při působení magnetického pole vodní molekuly unikají z míst se silnější magnetickou indukcí do míst se slabší indukcí. [28] [36]

Vliv magnetického pole na stavbu vody není dosud příliš objasněný. Vedou se diskuze o možném zesílení či zeslabení vazeb. Pro možné zesílení vodíkových vazeb hovoří pokus s vypařováním vody, kdy pro vypaření jistého množství magnetizované vody bylo třeba vynaložit více energie, než pro vypaření nemagnetizované vody. Vysvětlit tento jev je možno tak, že došlo k zesílení vodíkových vazeb a tedy pro jejich rozbití a vypaření bylo nutno vynaložit více energie. [10] [57] Naprosto opačný výsledek však byl dosažen v experimentech [24], kde bylo množství vypařené magnetizované vody při stejném přísunu energie větší, než nemagnetizované. Při působení magnetického pole rovněž došlo ke zvýšení vypařené množství vody v pokusu [21].

Je však rovněž možné, že vlivem působícího magnetického pole dochází k neustálému proudění plynů nad volným povrchem nádoby. Proudění je způsobené vyšším parciálním tlakem vodní páry u volné hladiny, než v okolní atmosféře a jelikož působí Mojžíšův efekt, jsou vodní páry odpuzovány a okolní atmosféra přitahována, čili vzniká proudění. Toto proudění pak umožňuje efektivnější odpar kapaliny. [36]

Vliv na clustery

Magnetické pole také ovlivňuje počet clusterů a jejich uspořádání. Bylo zjištěno, že počet clusterů se zvýší. [58] Magnetické pole zeslabuje a rozbíjí vodíkové vazby uvnitř clusteru, čímž dojde k jeho rozdělení na větší počet menších clusterů, které však jsou mezi sebou vázány silnější vazbou a tedy tvoří stabilnější systémy. Rozbití vazby je způsobeno magnetickým polem, které přeorientuje vodní molekuly. [57] K jinému zjištění však došli autoři článku [25]. Autoři článku [25] zjistili, že se zvýší počet vodíkových vazeb a z toho plyne, že se zvětšila velikost vodního clusteru. S větším počtem vazeb pak roste kompaktnost a stabilita systému.

Vliv na elektrickou vodivost

Jednou z dalších ovlivněných vlastností vody je zvýšení elektrické vodivosti. [55] Zvýšení elektrické vodivosti je způsobeno takzvaným protonovým transferem. Protonový transfer vzniká, jestliže dojde k excitaci protonu, který kmitá kolem své rovnovážné polohy. Tato excitace je způsobená například magnetickým polem. Proton, tedy v tomto případě kationt vodíku, opustí svou kovalentní vazbu a „přeskočí“ ke druhému kyslíku. Kyslík není schopný udržet zvětšené množství protonů a tedy dojde k následnému dalšímu přeskoku kationtu vodíku. Tímto

způsobem dochází k protonové vodivosti. Pro dané médium je protonový transfer jediné možné vysvětlení zvýšení vodivosti, jelikož elektronový transfer v této soustavě není možný. [48] [49]

Vliv na povrchové napětí

Dalším vlivem na stavbu vody, který se projeví při působícím magnetickém poli, je změna viskozity a povrchového napětí. Zatímco autoři článků [10] [27] [48] [61] se po provedení experimentů či modelu přiklání k tvrzení, že povrchové napětí klesá, jiní autoři píší, že povrchové napětí bude lehce vzrůstat. [16] [17] [26] [57] Je tedy evidentní, že téma je značně kontroverzní. Ve většině vysvětlení se však počítá se zesílením vodíkové vazby a se změnou počtu vodních clusterů a jejich uspořádání (viz výše). Velký vliv na povrchové napětí má čistota vody. Při použití magnetického pole totiž dojde k ovlivnění iontů v kapalině. Jestliže jsou ionty v kapalině přítomny, což například pro kohoutkovou vodu zaručeně platí, je měření povrchového napětí silně ovlivněno, jelikož je měřeno pouze v dané vrstvě v kapalině a je tedy měřeno pouze pro danou vrstvu iontů. Pro změření přesného efektu magnetického pole na stavbu kapaliny je tedy nutné mít deionizovanou vodu s co nejmenším počtem příměsí [26]. Dalším nebezpečím, které vyvstává v souvislosti s hydrodynamickou kavitací v případě použití plastového potrubí, je nebezpečí znečištění vody plastovými částicemi, které jsou odkavitovány z plastového potrubí. Tyto částičky jsou totiž nesmáčivé a mohou značně ovlivnit povrchové napětí. Při pokusu došlo ke snížení povrchového napětí až o $0,013 \text{ Nm}^{-1}$, avšak toto snížení nebylo způsobeno magnetickým polem, nýbrž právě odkavitovanými plastovými částicemi. [3]

Vliv na viskozitu

Vliv magnetického pole na viskozitu je méně probádaný. To však neznamená, že by byl méně kontroverzní. Opět zde existují zastánci zvýšení [10] [18] [57] i snížení [48] viskozity.

Magnetická paměť vody

Tento efekt je charakterizován ovlivněním molekul vody i hodiny poté, co již magnetické pole není v přímém kontaktu s vodou. Jedna z možných hypotéz, je značný vliv rozhraní mezi plynem v bublině a okolní kapalinou. Při úplném odplynění vody již efekt magnetické paměti nebyl pozorován. Další hypotézou ovlivnění je vliv volných radikálů, ozonu a peroxidu vodíku [11]. Stejně ovlivnění bylo pozorováno i v pokusech autorů [6] [47].

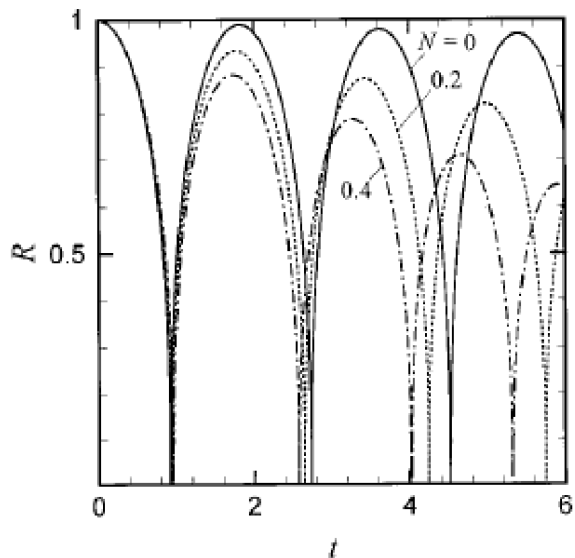
5.2 Vliv magnetického pole na kavitaci

Z matematických modelů plyne, že magnetické pole by mělo fungovat jako tlumič kavitace⁴. [1] [33] [44] Tyto modely jsou však pravděpodobně postaveny na konstantním povrchovém napětí, elektrické vodivosti a viskozitě, což se však z provedených pokusů (viz výše) nezdá jako univerzálně platné. Výsledky matematického modelování jsou na obrázcích (6),(7) a (8).

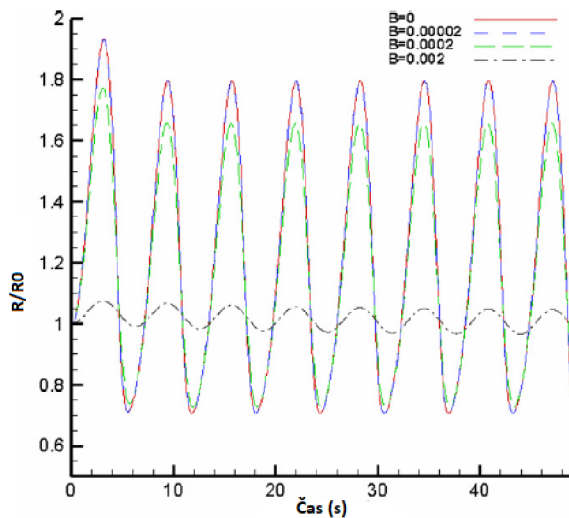
Z experimentálních výsledků není průkazné, jaký efekt magnetické pole na kavitaci má. Zatímco autoři článků [8] [22] [32] [51] popisují zvýšení kavitačního efektu díky působení magnetického pole⁵, jiní autoři oponují, a to buď snížením efektu na kavitaci [52], nebo není

⁴Má se na mysli akustická kavitace.

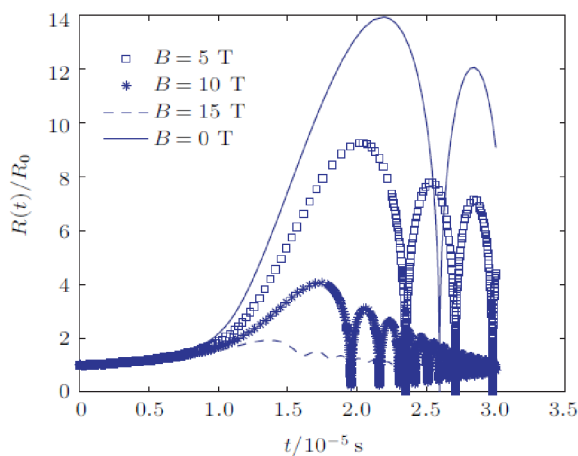
⁵ Tito autoři si vysvětlují větší úběr materiálu rozšířením kavitací zasažené oblasti. Rozšíření je způsobeno působením magnetického pole na nabitě rozhraní bubliny, které způsobí přitažení a odpuzení jednotlivých bublin a tedy jejich posun z centra kavitační oblasti na periferii a mimo ni. Na intenzitu kavitace nemá magnetické pole vliv.



Obrázek 6: Výsledek modelování vlivu magnetického pole při $We = 2000$ a $Re = 1000$ po dosazení do rovnice (30) [33].



Obrázek 7: Výsledek modelování vlivu magnetického pole na newtonskou kapalinu [1].



Obrázek 8: Výsledek modelování vlivu magnetického pole po dosazení do rovnice (28) [44].

efekt na kavitaci vůbec pozorován [23]. Za zmínku rovněž stojí upozornění, že kavitační práh může mít rozptyl až 20 % , a proto je velmi obtížné určit jakýkoliv cizí vliv, jestliže je řádově stejně velký. [6]

Vzhledem k tomu, že povrchové napětí mezi vodou a směsí plynů uvnitř bubliny ovlivňuje kavitační tlak a chování bubliny, jeho případné zvýšení by znamenalo snížení kavitačního tlaku společně s urychlením zániku bubliny [46]. Jelikož však dochází k velmi malým změnám v hodnotě povrchového napětí, nedá se očekávat značný vliv na kavitaci. Pakliže by docházelo ke zvýšení viskozity, mělo by rovněž dojít ke zvýšení antikavitačních vlastností [46].

6 Možnosti praktického využití kavitace ovlivněné magnetickým polem

V této kapitole je uveden stručný výčet možných použití, ať už magnetické pole kavitaci zeslabuje či zesiluje. Zvláštní pozornost je věnována zabíjení mikroorganismů (obzvláště sinic).

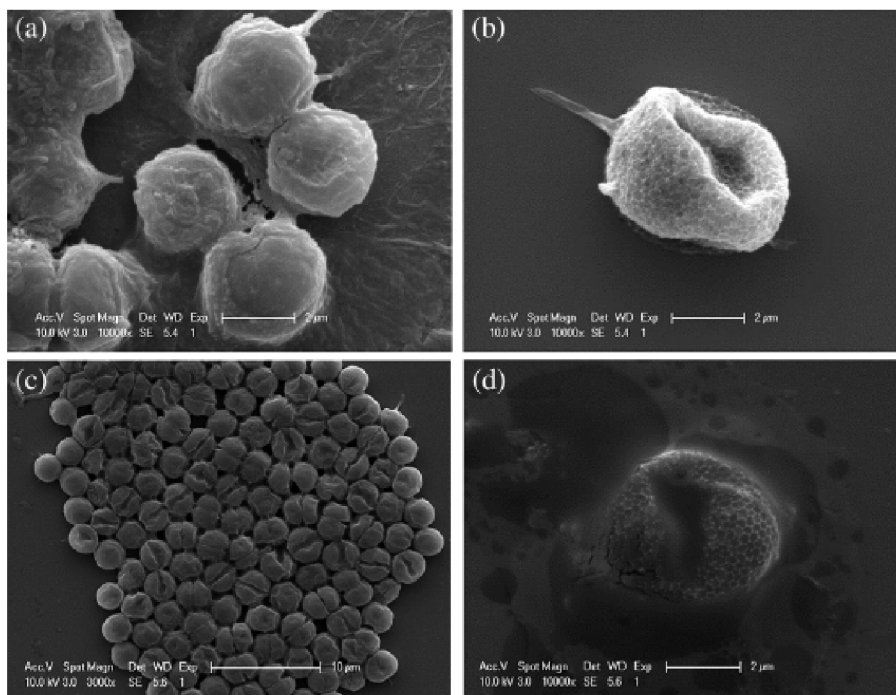
1. Zabíjení mikroorganismů ve vodě
2. Výroba nanoprášků
3. Odbourání léčiv
4. Tlumení kavitace

ad 1) Prozatím nebyl nalezen žádný významný vliv magnetického pole (při velikosti magnetické indukce do 8 T) na délku života, růst nebo reprodukci mikroorganismů. V magnetickém poli dochází pouze k natažení buněk podle směru působení magnetického pole. V některých případech může magnetické pole ovlivnit následnou úpravu vody (například ionizace). Samotné magnetické pole tedy s vysokou pravděpodobností nemá žádné dezinfekční účinky. [42] [43]

S tím, jak se zvyšují požadavky na úrodnost půdy, se zvyšuje i intenzita hnojení. Intenzivní hnojení se však následně projeví přemírou živin v okolních vodách (obzvláště dusík a fosfor). Přemíra živin a vhodné osvětlení je právě to, co potřebují k životu sinice (cyanobakterie). Sinice na hladině tvoří vodní květ, který brání průniku plynů do vody, čímž ubírají životní prostor rybám, rostlinám či rozkladným mikroorganismům a jsou schopné vypouštět toxiny, které negativně působí na vysoké procento organismů. [5] [29] Jelikož omezení hnojení nepřipadá, vzhledem k ceně a potřebnému množství potravin, v úvahu přichází na scénu použití prostředků, které upravují množství mikroorganismů ve vodě. Mezi možnostmi úpravy vody se řadí chemické přípravky (ozonace, chlorace, ...), mechanická úprava (kavitace hydrodynamická, akustická, stříhová atd.) a biologická úprava (jistě druhy ryb požírají sinice). [12]

Obzvláště silného efektu kavitace na mikroorganismus je dosaženo, jestliže mikroorganismus obsahuje vzduchové vakuoly. Takové vakuoly mají například sinice a při kavitaci dochází k poškození těchto vakuol (Obrázek 9b)). Sinice pak nemohou korigovat své umístění ve vodním sloupci a klesají ke dnu. Jestliže dojde pouze k porušení vakuol, pak sinice klesnou ke dnu, avšak jsou ještě stále živé a je zde možnost, že se jim podaří opravit vakuoly a vrátit se ke své funkčnosti. Výhodou však je, že toxin zůstane bezpečně uzavřen uvnitř sinic a riziko kontaminace je tedy daleko menší. Pokud je kavitace dostatečně silná, pak dojde nejenom k porušení vakuol, ale i ke zničení membrány (Obrázky 9c) a 9d)). Sinice je pak mrtvá, avšak může dojít ke kontaminaci okolní vody jejím toxinem [12] [29] [38] [39] [40]. Kavitace je však i v tomto případě schopná část toxinu odbourat [40].

Zdá se, že kavitace je nejlepší technologií pro odstraňování sinic z vod, jelikož při použití chemických látek sice dojde k ekonomicky nejvýhodnějšímu odstranění sinic, nevýhodou však jsou chemická rezidua ve vodě pocházející právě z těchto látek. Navíc může opět dojít k narušení buněčné membrány, což sice sinici spolehlivě zničí, avšak opět může dojít k uvolnění toxinu, přičemž ani není známo, jestli se toxin pomocí chemických látek alespoň částečně rozloží, či nikoliv. Z provedené studie plyne, že pro větší objemy a více znečištěnou vodu je lepší použití hydrodynamické kavitace, než akustické. [31]

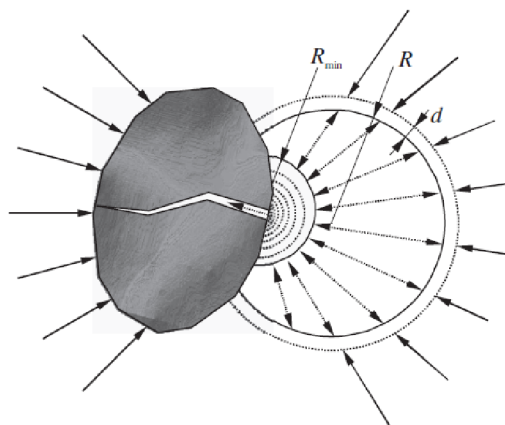


Obrázek 9: Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu: a) sinice před působením kavitace, b) po 10 minutách kavitace, c) po 30 minutách kavitace, d) po 60 minutách kavitace [38]

Při použití kavitace na bakterie *Escherichie Coli* se procento neaktivních bakterií zvýšilo z 5 % na 10 až 20 % a schopnost se dělit ztratilo 75 % bakterií. Není však známo, jestli je tato schopnost ztracená navždy. [41] Dále bylo zjištěno, že hlavním mechanismem působícím na bakterie bylo mechanické poškození. [4] Stejněho procentuálního úspěchu, tedy 75 %, bylo dosaženo i při odbourávání rotavirů z vody. [12] Nevýhodou kavitace je kavitační úbytek okolního materiálu. Tento materiál má velmi malou velikost a je tedy nutné dobře promyslet volbu materiálu trubice či kontejneru, popřípadě způsob generování kavitace, aby nedošlo ke zpětné kontaminaci vody.

Zesílení kavitace pomocí magnetického pole by mohlo být využito pro snížení energetické náročnosti k dosažení stejné intenzity kavitace, popřípadě by mohlo dojít k takovému zesílení kavitace, že by došlo k téměř úplnému odbourání mikroorganismů i jejich případných toxinů.

ad 2) Vzhledem k tomu, že kavitace začne nejčastěji vznikat na kavitačních jádrech, dá se využít tohoto faktu pro vytvoření nanoprášků. Při smísení malých částic materiálu (velikost částic přibližně 100 μm) s vodou a následně vyvolané kavitaci dojde k tvoření kavitačních bublin právě na površích částic a s implozí kavitační bubliny dojde k poškození povrchu a tedy i k oddělení části materiálu z částice. (Obrázek 10) [13]



Obrázek 10: Kavitační mikrotryska vznikající při implozi bubliny působí na částici a rozděluje ji na menší části [13]

Pokud magnetické pole zesiluje kavitační účinky, mohlo by pak dojít k použití této techniky i na velmi odolné materiály. Při použití na klasické materiály by mohl být snížen potřebný výkon nutný pro generování dostatečně silné kavitace.

ad 3) Kavitaci je možno použít i na odbourání léčiv z vody, přičemž hodnoty účinnosti odstranění léčiv z vody se po 15 minutách kavitování pohybují mezi 4 a 42 % [12]. Pokud magnetické pole kavitaci zesiluje, tak by mohlo dojít ke zvýšení účinnosti odstranění léčiv z vody.

ad 4) Pokud by bylo dokázáno, že magnetické pole má tlumící účinky na kavitaci, pak by se tohoto tlumení dalo využít všude tam, kde je kavitace na obtíž, pro příklad v potrubních systémech, v savkách turbín atd. Při připojení magnetů na potrubí se rovněž spekuluje o snížení náchylnosti k usazování vodního kamene. [60]

7 Experimentální zjištění vlivu magnetického pole vyvolaného stacionárními magnety na kavitaci

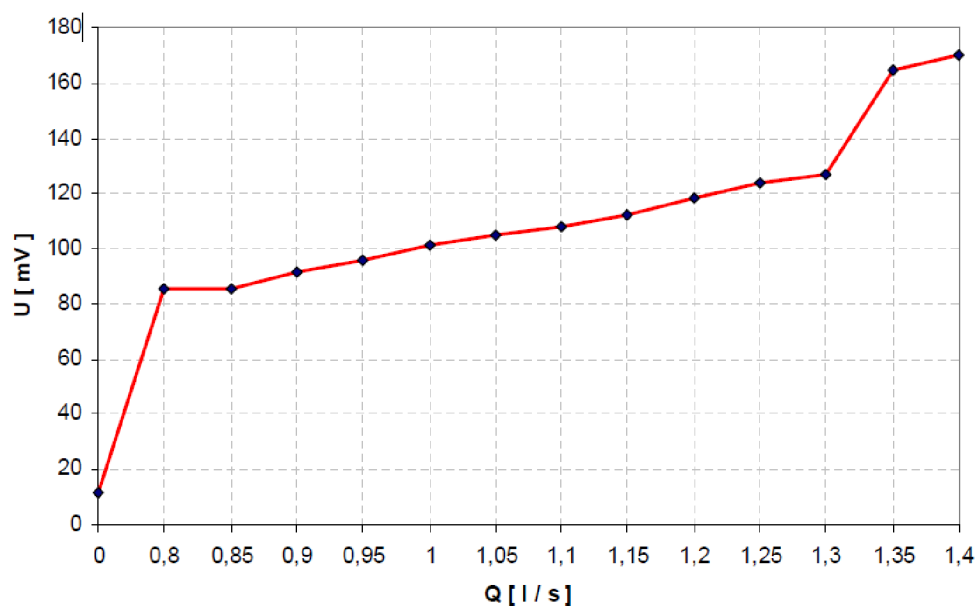
Experiment probíhal v těžké laboratoři fluidního inženýrství. Cílem bylo prakticky ověřit, zda působením magnetického pole dojde k zesílení (zeslabení) účinků kavitace, či nikoliv. Experiment byl rozdělen do tří pokusů. Pokus I byl zopakováním pokusu provedeném v [34]. Pokusy II a III se od sebe lišily velikostí magnetů a tedy i jejich velikostí magnetické indukce. Kapalinou v okruhu ve všech pokusech byla kohoutková voda.

7.1 Měření napětí pomocí sondy

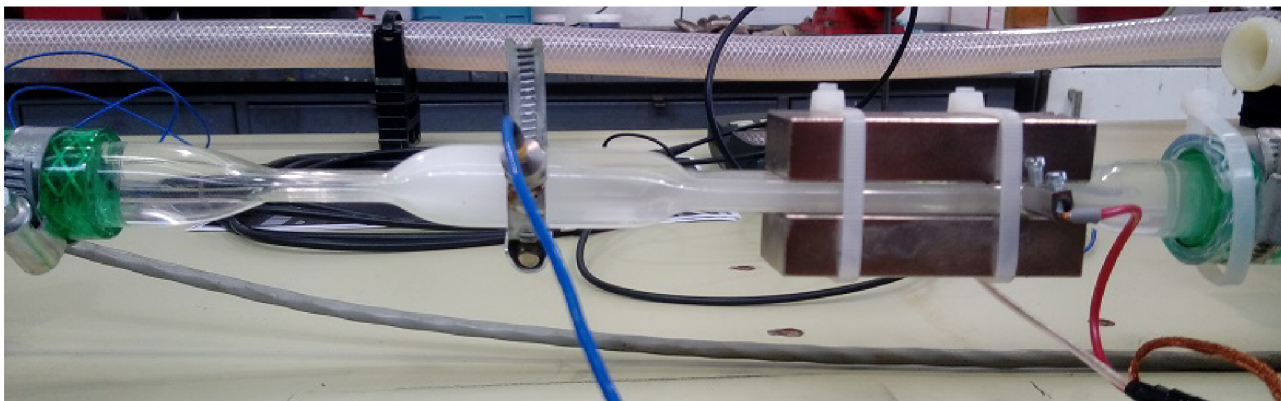
Vliv magnetického pole na kavitaci byl měřen pomocí elektromagnetické sondy (Obrázek 26). Tato sonda zaznamenávala změny v hodnotě napětí, které byly způsobeny přítomností a následnou implozí bublin. Jak již bylo zmíněno, bubliny mají na svém povrchu negativní náboj a tedy při zániku bubliny dochází k prudkému zmenšení její velikosti a tedy i k pohybu nábojů přítomných na povrchu bubliny. Pohyb náboje v magnetickém poli pak indukuje pole elektrické, které je následně měřeno pomocí elektromagnetické sondy. Způsob měření pomocí elektromagnetické sondy s sebou nepřináší žádné negativní ovlivnění (jak je popsáno v článku [19]), jelikož v tomto případě se jedná o kavitaci hydrodynamickou a nikoliv akustickou. V každém pokusu byla hodnota napětí měřena jako diference mezi hodnotami napětí na jednotlivých sondách.

7.2 Pokus I

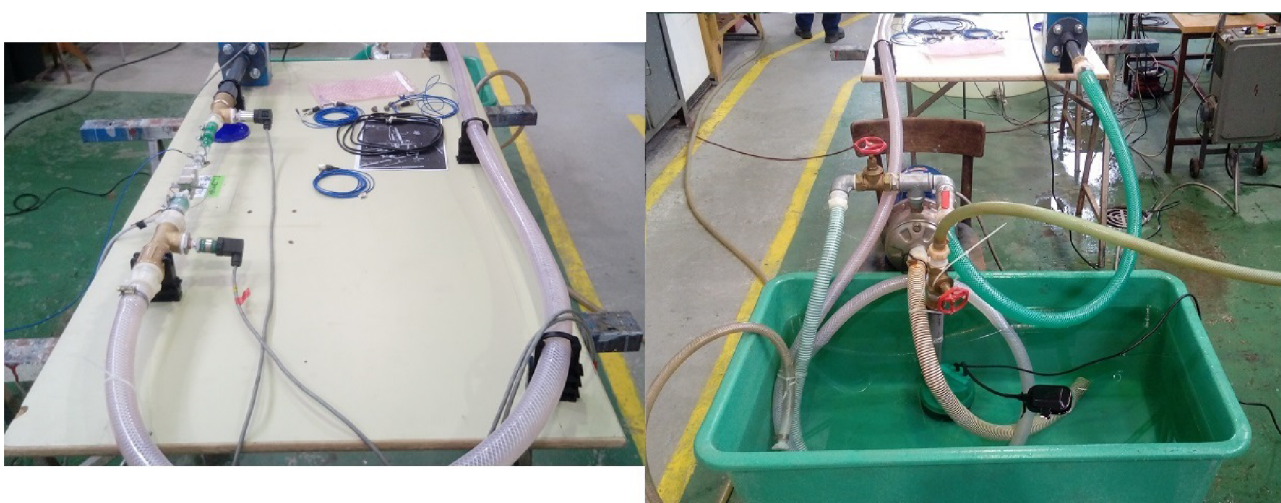
Nejprve bylo provedeno testovací zopakování pokusu popsaného v práci [34]. Principem bylo ověřit graf závislosti napětí na průtoku při přechodu z bezkavitačního do kavitačního proudění (Obrázek 11).



Obrázek 11: Graf závislosti napětí na průtoku při průtoku trubici. Skok na hodnotě $1,3 \text{ l/s}^{-1}$ je způsoben přechodem do kavitačního režimu. [34]



Obrázek 12: Detail kavitační oblasti se zapojeným akcelerometrem a přítomnými magnety nad elektromagnetickou sondou.



Obrázek 13: Ukázka testovací tratě v pokusu I

Hydraulický okruh

Hydraulický okruh (Obrázek 13) sestával z nádoby s kapalinou, indukčního průtokoměru, potrubí, čerpadla a kavitační trubice. Měřenými veličinami byly průtok a napětí. Průtok byl regulován šoupětem v obtokové větvi, přičemž při úplném otevření šoupěte byl průtok cca $0,9 \text{ l s}^{-1}$ a při úplném uzavření šoupěte byl průtok $1,4 \text{ l s}^{-1}$. Hodnoty pro 0 až $0,9 \text{ l s}^{-1}$ byly získány postupným otevíráním kulového ventilu. Teplota v okruhu byla udržována na přibližně $12 \text{ }^\circ\text{C}$ pomocí přísunu studené kohoutkové vody. Chlazení bylo nezbytně nutné, neboť díky použitému průměru a materiálu potrubí docházelo k intenzivnímu zahřívání vody v okruhu. Magnetická indukce mezi magnety byla $0,575 \text{ T}$.

7.3 Použité zařízení

Čerpadlo

Lowara FHE 40-200/75

Tlakověry

BD sensors DMP 331: rozsah 2,5 baru a 10 barů

Měřicí karta

National instruments BNC - 2110

Indukční průtokoměr

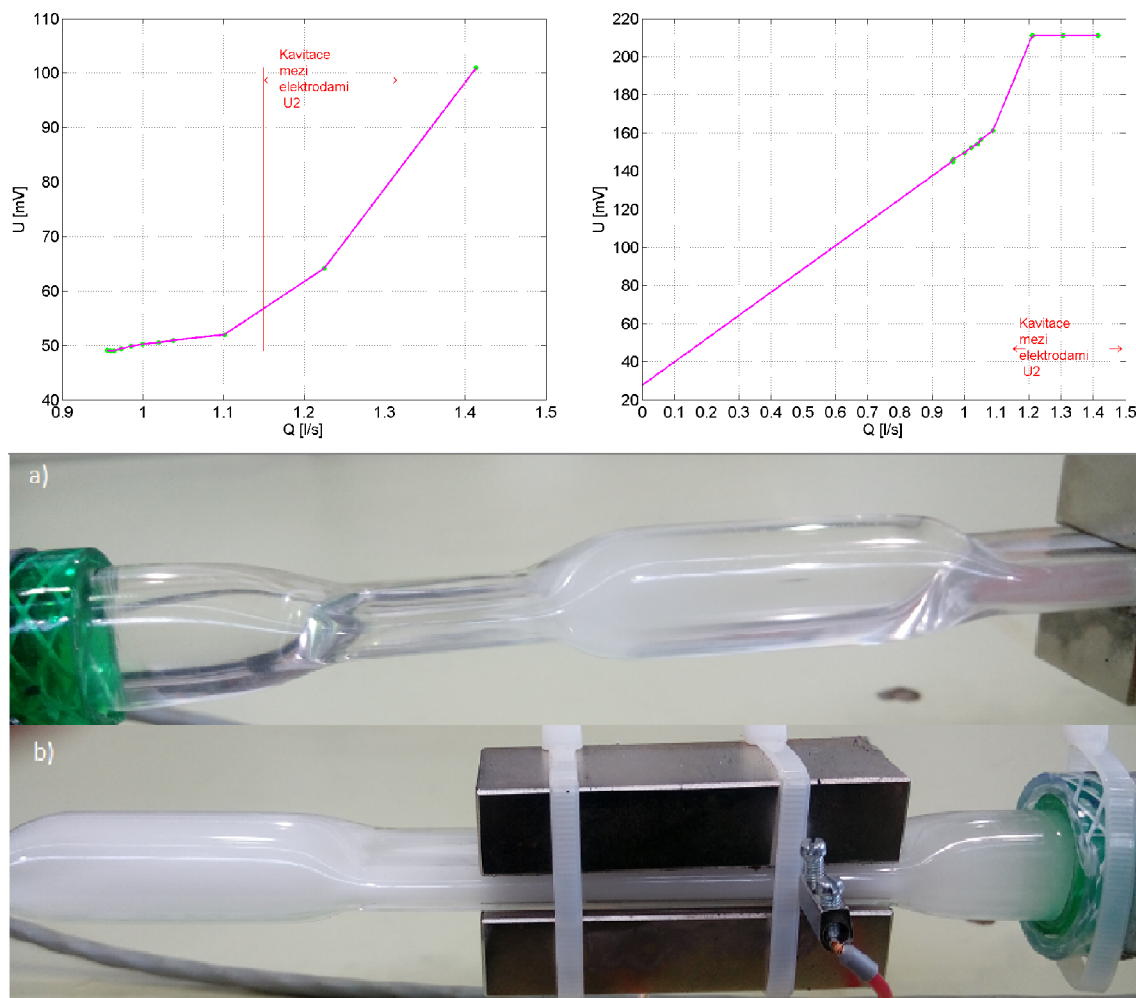
Sigma Brno SMC 32 T2NK

Akcelerometr

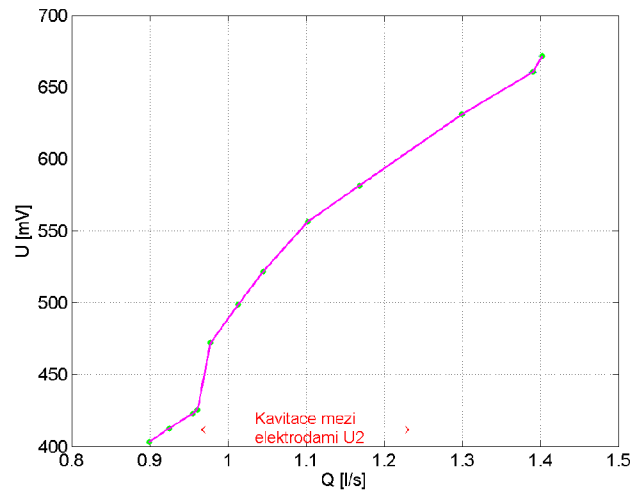
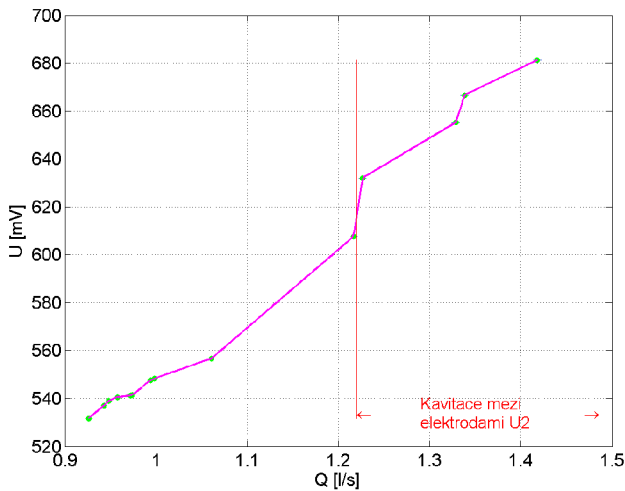
PCB Piezotronics 352A60 Sériové číslo: 158114

7.4 Výsledky pokusu I

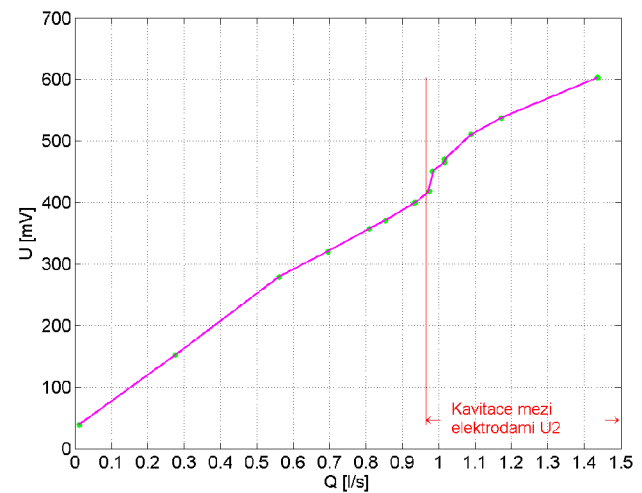
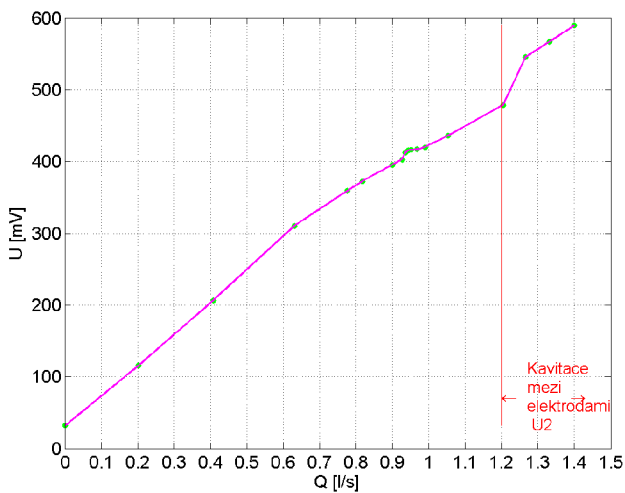
Nejprve byl proveden reprodukovatelný pokus v nerezovém potrubí. Bohužel nedošlo k naměření stejných, nebo alespoň obdobných hodnot. Následně došlo k výměně materiálu potrubí za plast a výsledný graf (Obrázek (14)) vykazuje stejné tvary, jako originální graf (Obrázek 11).



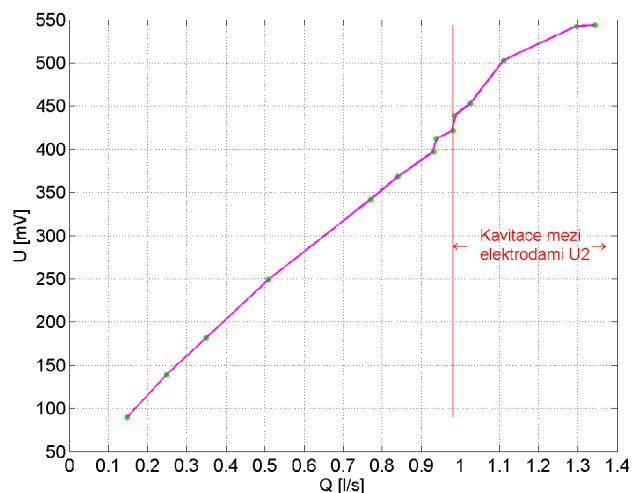
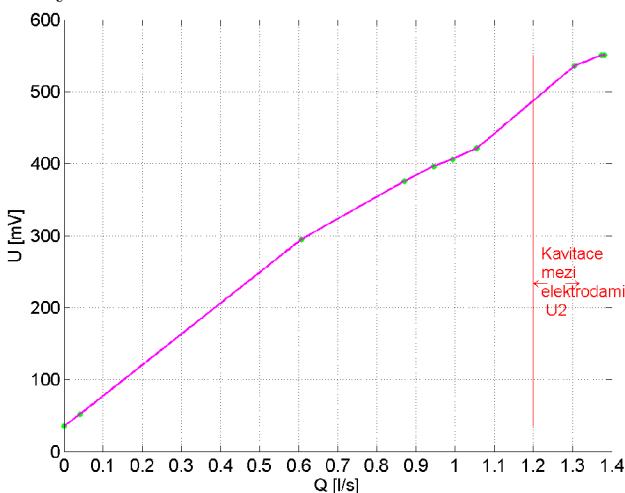
Obrázek 14: Graf závislosti napětí na průtoku. Měření probíhalo od nejmenší hodnoty průtoku po největší. Levý graf - měření bez magnetů, pravý graf - měření s magnety. Do hodnoty průtoku $1,1 \text{ l s}^{-1}$ se kavitace tvořila pouze ve vypouklé části trubice před magnety (část a)), po překročení této hodnoty se kavitace rozšířila mezi elektromagnetické sondy (část b)).



Obrázek 15: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



Obrázek 16: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



Obrázek 17: Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.

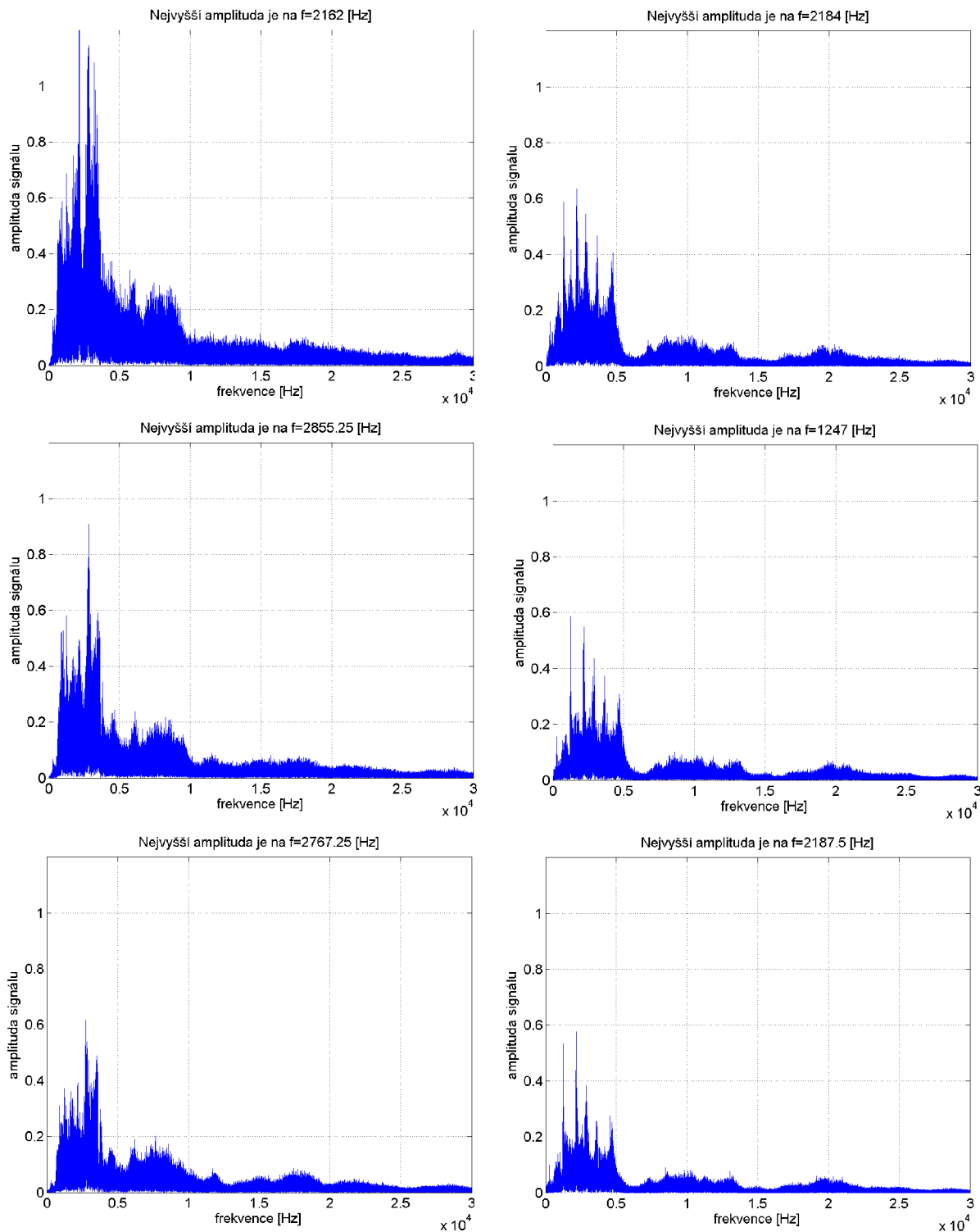
Rozdílné hodnoty průtoku, při kterém dojde k přechodu z bezkavitačního do kavitačního proudění (Obrázky 15, 16, 17), jsou způsobeny geometrií plexisklové trubice. Při měření od nejmenšího průtoku po největší bylo možné při velmi jemné a opatrné manipulaci s ventilem dosáhnout relativně vysokého průtoku, aniž by došlo k utržení kavitace.

Jelikož byly měřené hodnoty napětí velmi malé a jelikož měření probíhalo ve volném a neodstíněném prostoru laboratoře, vysoké hodnoty měřeného napětí v grafech (Obrázky 15, 16, 17) oproti grafu (Obrázek 14) mohou být způsobeny externím ovlivněním.

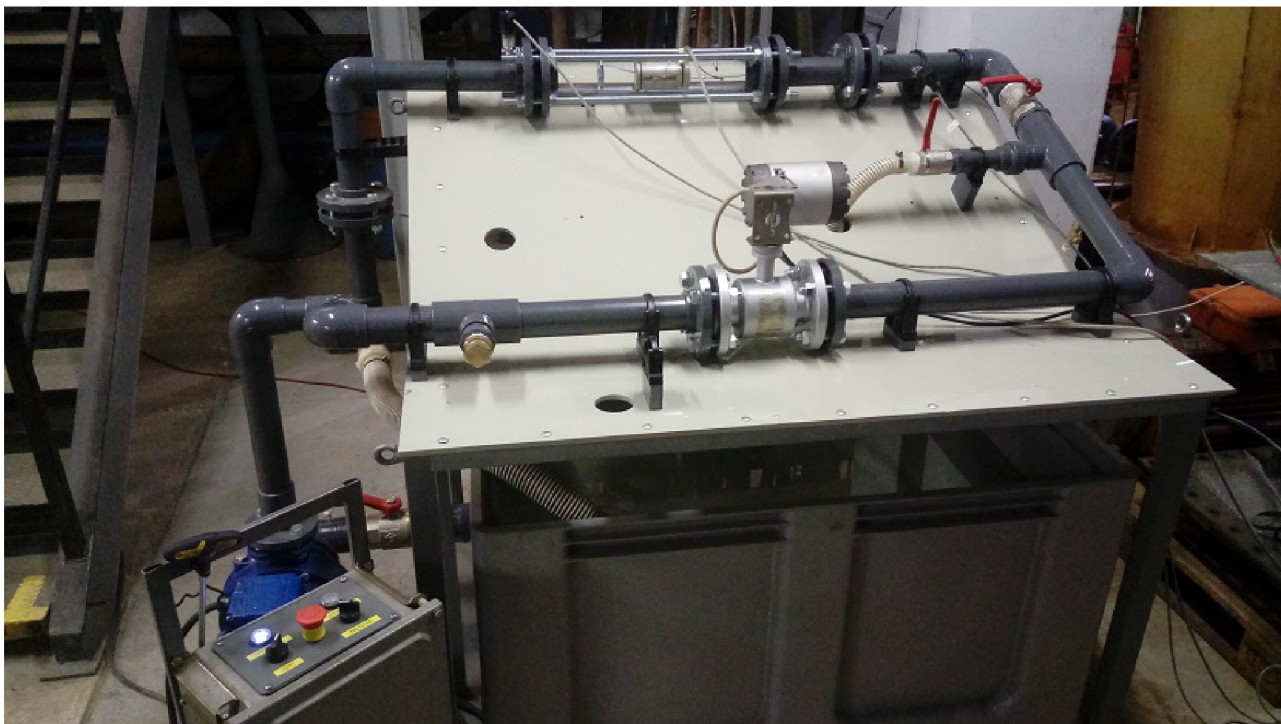
Vzhledem k tomu, že nerezové potrubí je uzemněné, zatímco plastové potrubí ne, existuje zde možnost ovlivnění měření statickou elektřinou. Toto se týká jak originálního pokusu, tak pokusu reprodukováného v plastovém potrubí. [7]

Jelikož po ukončení měření s měřicí kartou došlo k prasknutí plexisklové trubice, měření pomocí osciloskopu nebylo provedeno.

Rovněž byla v programu MATLAB provedena Fourierova transformace.



Obrázek 18: Fourierova transformace měřeného signálu z akcelerometru provedená v software MATLAB, 2.pokus - třetí měření



Obrázek 19: Ukázka testovací tratě ve 2. pokusu

7.5 Pokus II

V laboratoři byla sestavena testovací trať (Obrázek 19). Hydraulický okruh sestával z nádoby s kapalinou, indukčního průtokoměru, plastového potrubí, čerpadla, kulového ventilu, dvou tlakoměrů, akcelerometru a kavitační trubice z plexiskla, v níž byla umístěna válcová kavitační tryska s permanentními magnety (dále jen válcová tryska).

Válcová tryska se skládala z větší a menší části. Nejprve došlo k vytvoření obou částí, jako modelů, v programu Solidworks a následně byly vytištěny na 3D tiskárně z materiálu „Polyjet“. Materiál Polyjet byl zvolen, i přes jeho vysokou cenu, z důvodu jeho neporéznosti a nepropustnosti. Porovnání mezi modelem a realitou je na obrázcích (20, 21, 22, 23). Jako těsnění byly využity dva O-kroužky. Menší část válcové trysky je přitlačena tlakem proudící kapaliny na větší část válcové trysky, přičemž větší část válcové trysky byla na konkrétním místě v potrubí držena pomocí pojistného šroubu. Do válcové trysky byly následně vloženy neodymové magnety⁶ o velikosti 75x25x15 mm s přitlačnou silou odpovídající⁷ 50 kg a magnetickou indukci⁸ 0,6 T. (Obrázek 24)

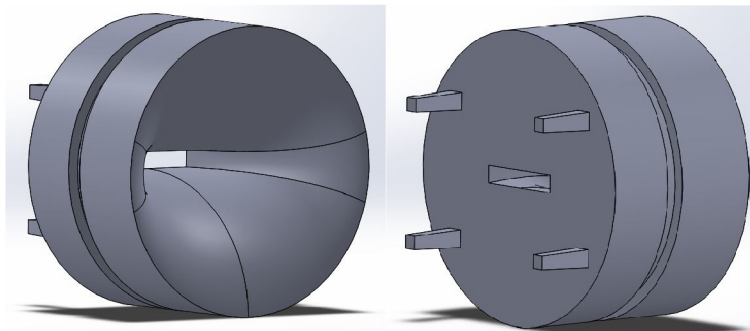
Magnety byly od sebe odděleny pomocí vhlodových okének, která zasahovala až do prostoru s proudící kapalinou (Obrázek 25). Vstupní průřez válcové trysky musel být menší, než průřez mezi magnety. Důvodem byl požadavek na implozi bublin mezi magnety. K implozi však dochází pouze při zvýšení tlaku a tedy při zvětšení průřezu.

V první části pokusu byly měřeny veličinami průtok, napětí a akcelerace. Napětí bylo měřeno pomocí měřicí karty. V každém kroku měření byla použita vzorkovací frekvence 80 kHz a každý krok měření trval 8 s, čili v každém kroku bylo naměřeno 640 000 hodnot. Vysoká vzorkovací frekvence byla zvolena pro možné ověření vysoké frekvence 24 kHz změřené

⁶Magnety byly pokryty ochranným lakem s dielektrickými vlastnostmi z důvodu zamezení koroze a zkratového proudu.

⁷Hodnota uvedená výrobcem v katalogovém listu

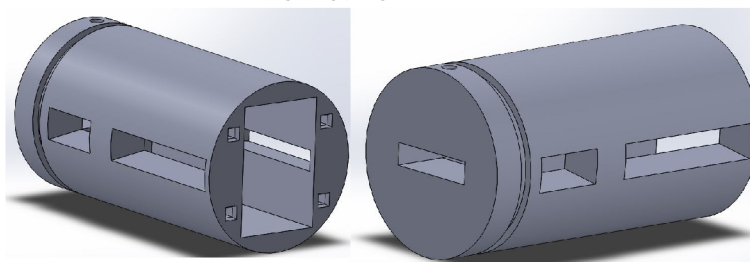
⁸Magnetická indukce byla změřena v již sestavené válcové trysce. Vzdálenost mezi magnety je 6,2 mm.



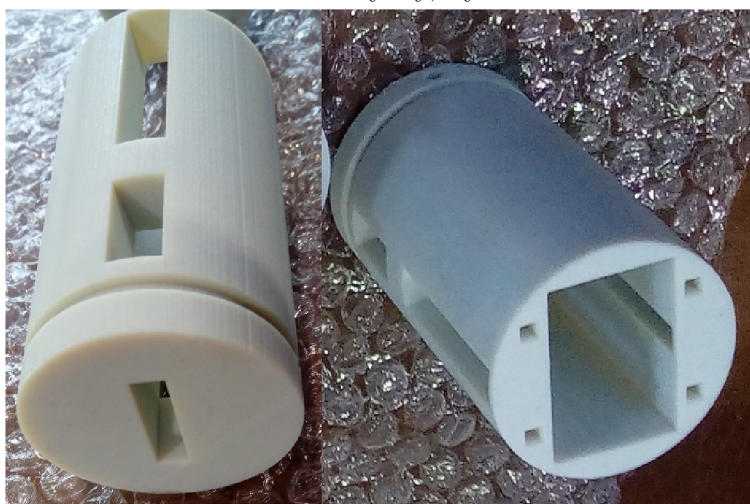
Obrázek 20: Menší část válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks



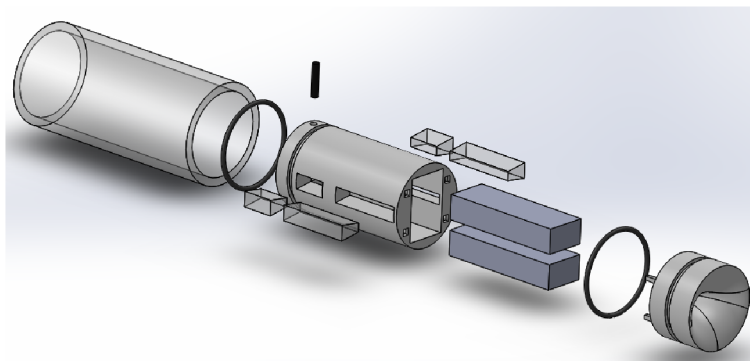
Obrázek 21: Menší část válcové trysky, vyrobeno na 3D tiskárně z materiálu Polyjet



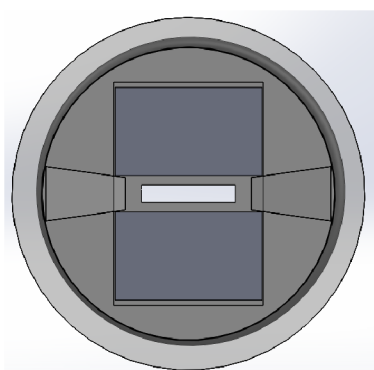
Obrázek 22: Větší část válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks



Obrázek 23: Větší část válcové trysky, vyrobeno na 3D tiskárně z materiálu Polyjet



Obrázek 24: Pohled na rozložené sestavení válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks. Mezi vlnová okénka pak byly vyvrtány otvory pro umístění sond.



Obrázek 25: Řez válcovou tryskou. O vlnová okénka jsou opřeny magnety. Je patrné, že vstupní průřez je menší, než průřez mezi magnety, a tedy může dojít k implozi bublin mezi magnety.

v pokusu [34]. Ve druhé části pokusu došlo k ověření změřených hodnot napětí pomocí osciloskopu se vzorkovací frekvencí 100 kHz a vzorkovacím časem 10 s. Průtok v okruhu byl regulován pomocí kulového ventilu. Každé měření probíhalo od nejmenšího průtoku po největší a následně od největšího průtoku po nejmenší. Na rozdíl od pokusu I teplota vody v okruhu nebyla konstantní, avšak změna teploty vody před pokusem a po pokusu nebyla větší než 10 °C.

7.6 Použité zařízení a výpočet nejistoty měření

Čerpadlo

Lowara FHE 40-200/75

Tlakoměry

BD sensors DMP 331: rozsah 2,5 baru a 10 baru

Měřicí karta

National instruments BNC - 2110

Osciloskop

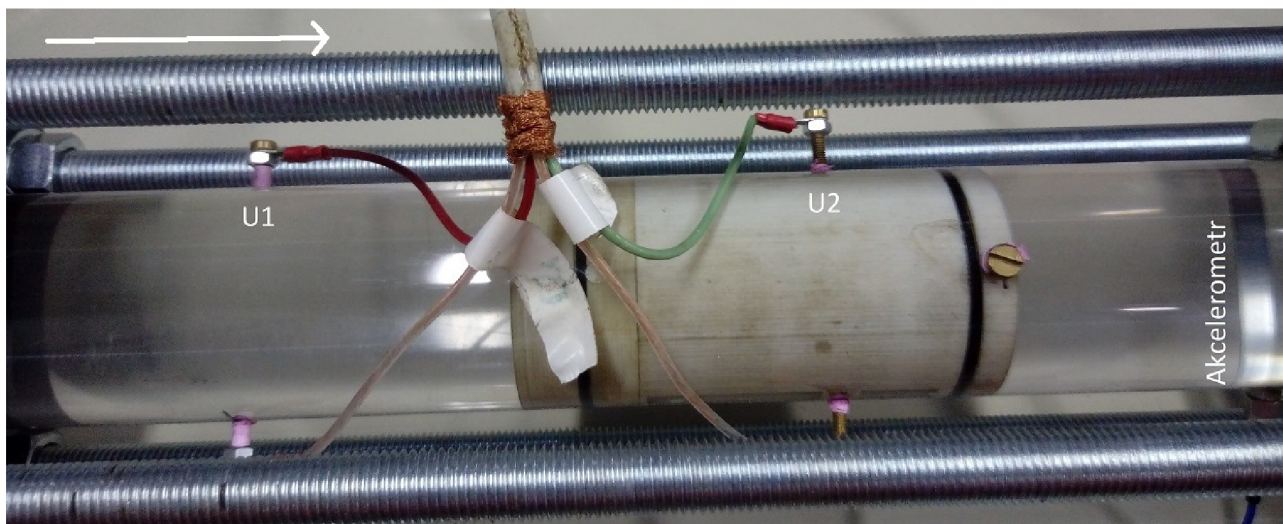
Teledyne LeCroy WaveRunner 610Zi

Indukční průtokoměr

MQI 99 - SN

Akcelerometr

PCB Piezotronics 352A60, sériové číslo: 158114



Obrázek 26: Válcová tryska v okruhu při pohledu shora, kolmo na válcovou trysku jsou umístěny elektrody. Šipka značí směr proudění kapaliny.

Výpočet nejistot měření

Vzhledem k tomu, že měřenými veličinami byly napětí a průtok, které byly následně vynášeny do grafu, došlo k vypočtení nejistoty měření (rovnice (35)) pomocí statistických metod a následně nejistoty měření z údajů poskytnutých výrobcem. Z těchto hodnot byla poté vypočtena kombinovaná nejistota měření (rovnice (36)). [45]

$$\tilde{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (34)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y})^2}{n(n-1)}} \quad (35)$$

Nejistota měření u_B je počítána dle vztahu určeného výrobcem zařízení [45]. Nejistota měření pro průtokoměr je počítána jako 0,3 %, jestliže je Q nad deseti procenty měřicího rozsahu. Rozsah činil $0,3 - 12 \text{ m s}^{-1}$, tedy pro průměr potrubí 50 mm po přepočtu $0,57 \text{ l s}^{-1}$ až $23,56 \text{ l s}^{-1}$. Hodnoty nižší než cca $0,5 \text{ l s}^{-1}$ již ani prakticky nebylo možné změřit, jelikož hodnota průtoku byla značně nestabilní. Nejistota měření pro měřicí kartu uvedená výrobcem dosahovala řádu jednotek mikrovoltů, a tedy byla vůči nejistotě u_A zanedbána. Ke stejnému zanedbání došlo i v případě osciloskopu.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (36)$$

7.7 Výsledky pokusu II

Nejistoty měření

Po dosazení změřených hodnot do software MATLAB byla vypočtena nejistota měření. Následuje příklad výpočtu pro průtok $Q = 1,4677 \text{ l s}^{-1}$.

$$n = 640000, \sum_{i=1}^n Q_i = 939332 \text{ l s}^{-1}$$

$$\tilde{y} = \frac{939332}{640000} = 1,4677 \text{ l s}^{-1}$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - 1,4677)^2}{640000(640000-1)}} = 8,61 \cdot 10^{-6} \text{ l s}^{-1}$$

$$u_B = 0,003 \cdot 1,4677 = 4,4031 \cdot 10^{-3} \text{ l s}^{-1}$$

$$u_C = \sqrt{(8,61 \cdot 10^{-6})^2 + (4,4031 \cdot 10^{-3})^2} = 4,4031 \cdot 10^{-3} \text{ l s}^{-1}$$

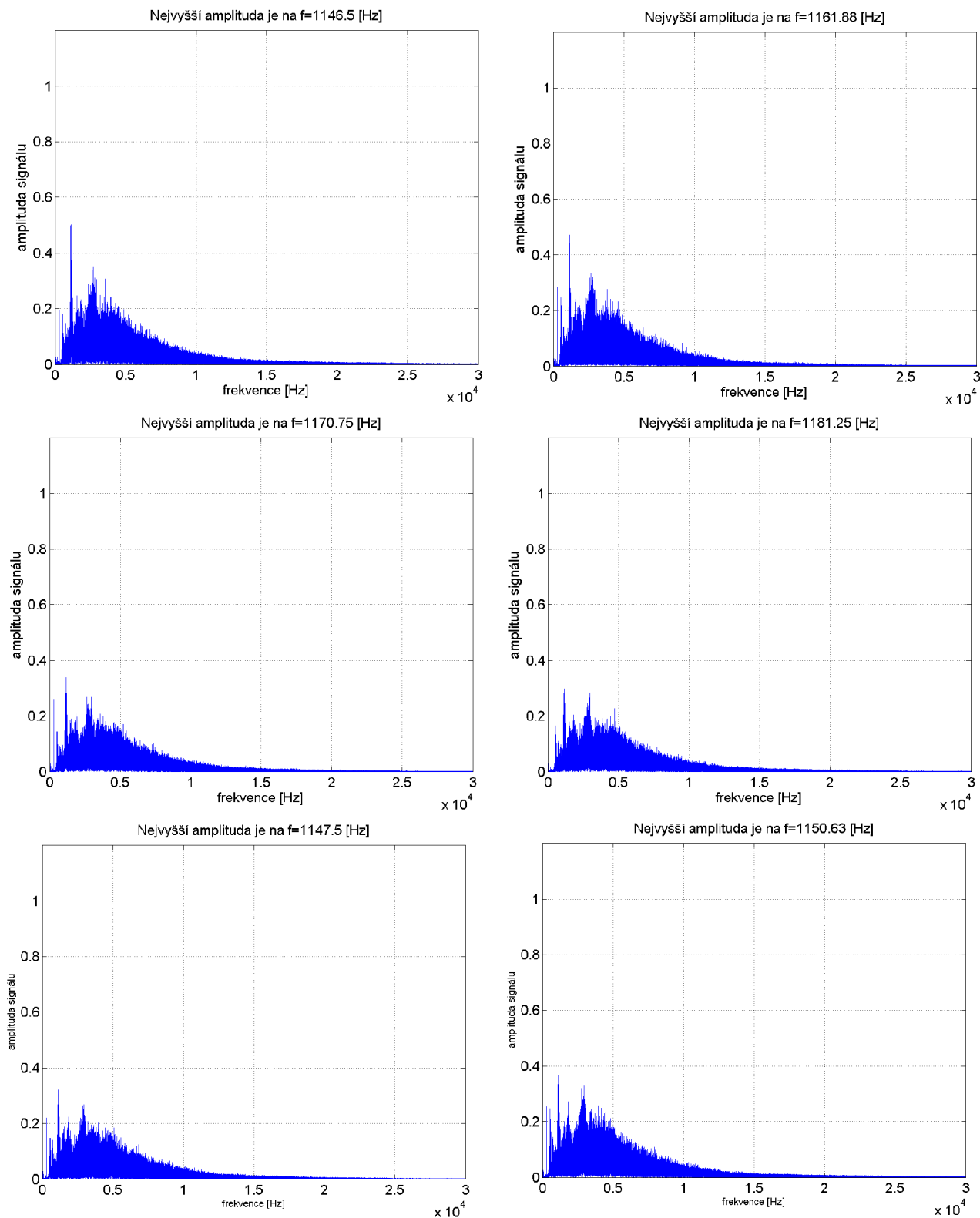
Obdobným způsobem, po dosazení odpovídajících hodnot, je vypočtena i nejistota měření napětí. Hodnoty nejistot měření jsou tak malé, že ač jsou v následujících grafech zavedeny, tak nejsou rozpoznatelné.

Výsledky měření

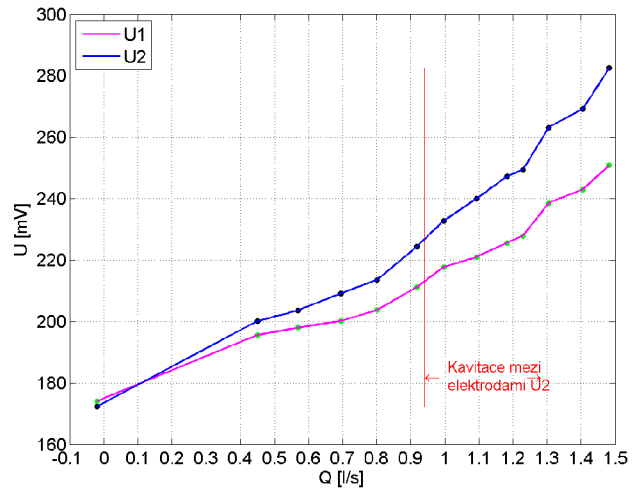
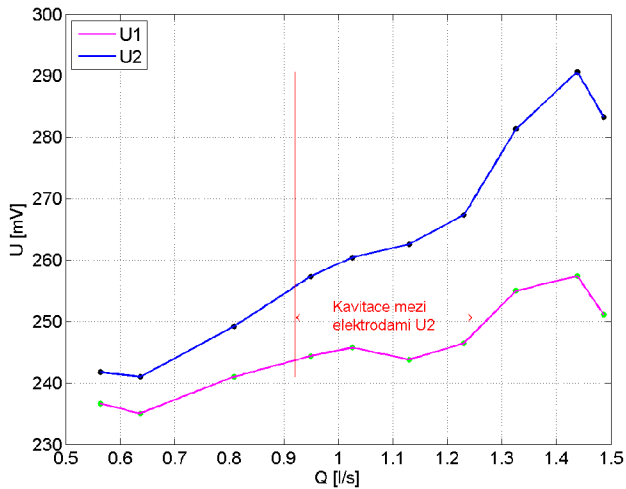
V programu MATLAB byla provedena Fourierova transformace pro každý krok. Ukázka výsledku je na (Obrázek 28). Výsledky měření závislosti napětí na průtoku jsou na obrázcích (Obrázek 29, Obrázek 30, Obrázek 31). Ve všech grafech tohoto pokusu je dodržováno označení U2 - elektromagnetická sonda uvnitř válcové trysky, U1 - elektromagnetická sonda před válcovou tryskou. Levý graf v každém obrázku znázorňuje postup od nejmenšího průtoku po největší. Pravý graf pak znázorňuje postup od největšího průtoku po nejmenší. Po provedení pokusu byly magnety vyjmuty a následným ohledáním bylo zjištěno, že ochranný lak byl kavitací dokonale odstraněn. Rovněž bylo zjištěno, že kavitace způsobila na povrchu magnetu nemalé škody (Obrázek 27).



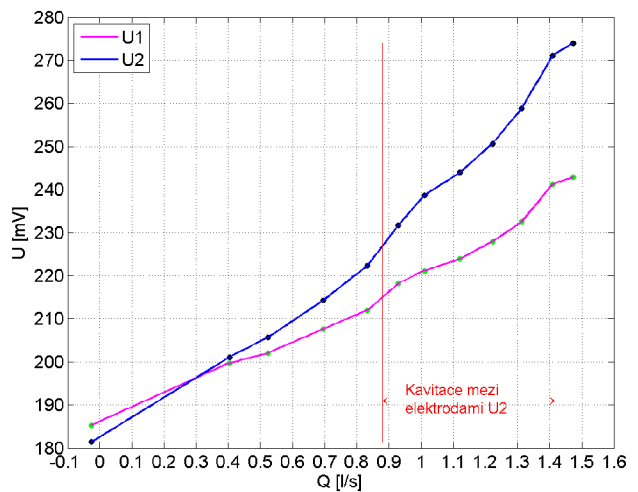
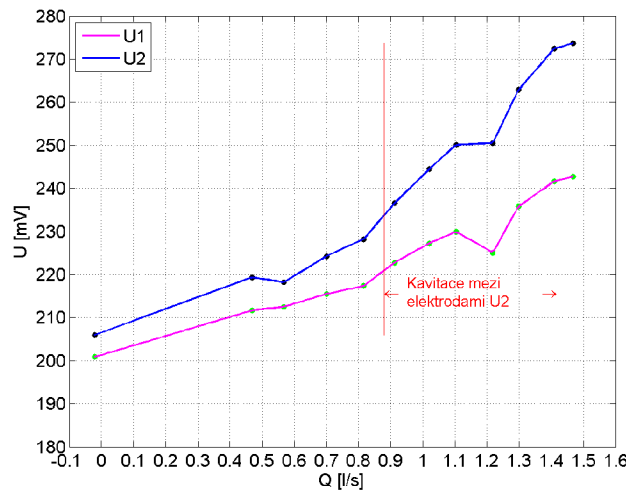
Obrázek 27: Magnet vytažený z válcové trysky po provedení experimentu.



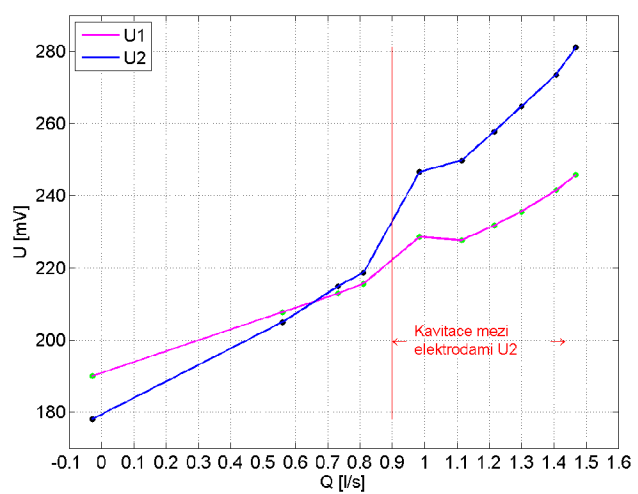
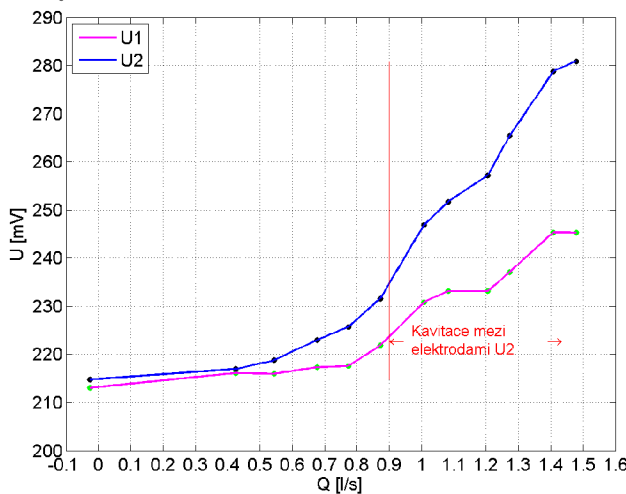
Obrázek 28: Fourierova transformace měřeného signálu z akcelerometru provedená v software MATLAB



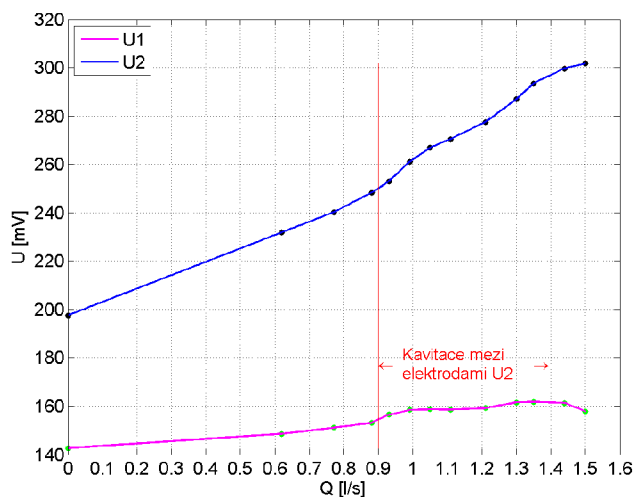
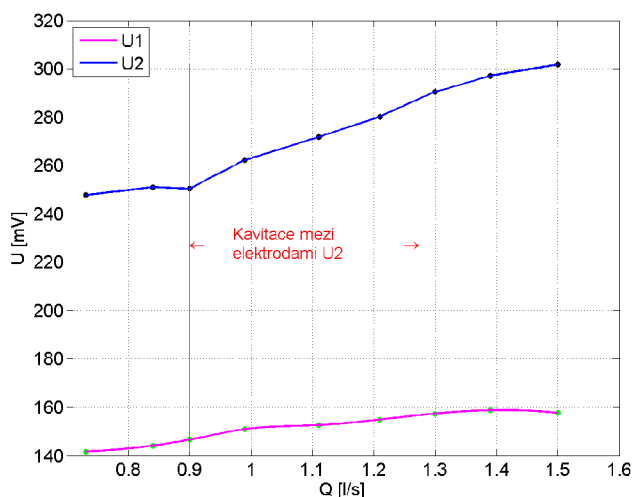
Obrázek 29: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



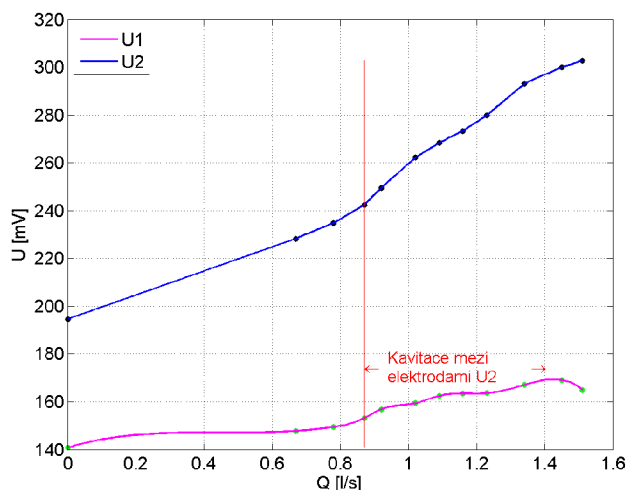
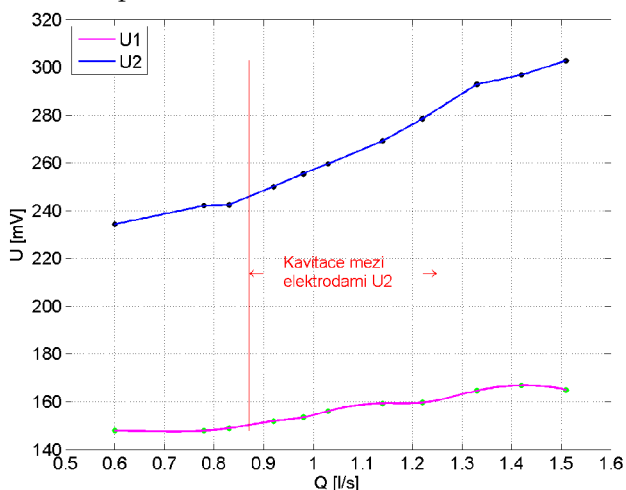
Obrázek 30: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



Obrázek 31: Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



Obrázek 32: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.



Obrázek 33: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.

Při měření měřicí kartou jsou hodnoty napětí pro velmi malé průtoky na obou elektrodách téměř stejné. Při měření od nejmenšího průtoku po největší jsou však hodnoty při malých průtocích vždy větší než hodnoty při malých průtocích při měření od největšího po nejmenší průtok. Rovněž se zdá, že ke změně sklonu spojnice bodů dochází jak u elektrod U2, tak u elektrod U1. Změna sklonu spojnice bodů je vždy větší pro elektrody U2. To je patrné obzvláště v grafech na obrázku (Obrázek 31). Mezi možné vysvětlení větší změny spojnice bodů mezi elektrodami U2 než mezi elektrodami U1 patří vznik kavitálních bublin, které mají na svém povrchu náboj, dále vliv magnetického pole a není možné zanedbat ani možný statický náboj vzniklý třením kapaliny v okruhu, který by se nejvíce projevil právě při kavitaci.

Při měření osciloskopem je vidět značný rozdíl v hodnotách napětí mezi elektrodami U1 a U2. Stejně jako u měření měřicí kartou jsou při nízkých průtocích vyšší hodnoty napětí při měření od nejmenšího průtoku k největšímu než je tomu při měření v opačném směru. Rovněž je vidět změna sklonu spojnice bodů, která je u elektrod U2 vždy větší než u elektrod U1.

7.8 Pokus III

V tomto pokusu byla v testovací trati vyměněna válcová tryska za plochou kavitační trysku s permanentními magnety (dále jen plochá tryska).



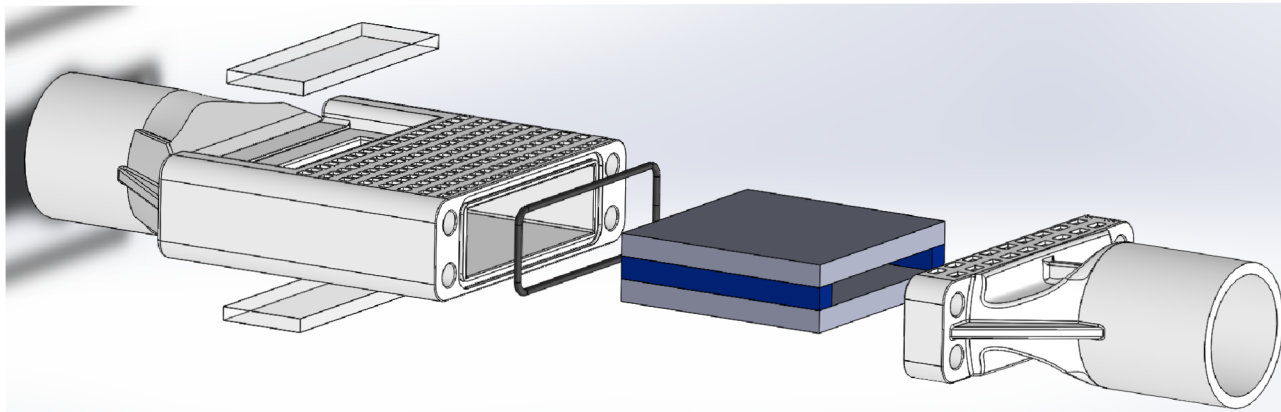
Obrázek 34: Hydraulická trať obsahující plochou kavitační trysku s permanentními magnety.

Plochá tryska byla složena ze dvou částí, jak je vidět na obrázcích (37) a (39). Tyto části byly následně vytisknuty na 3D tiskárně z materiálu „Polyjet“. Reálný vzhled po vytištění je na obrázcích (38) a (40). Do těchto částí byly vloženy neodymové magnety o velikosti 100x100x10 mm s přitlačnou silou odpovídající⁹ 100 kg. Vzdálenost mezi magnety byla zajištěna pomocí dvou rozpěrných plastových kvádrů o velikosti 10x100x10 mm. Tato vzdálenost a velká plocha magnetů je důvodem, proč magnetická indukce¹⁰ mezi magnety dosahovala pouze hodnot cca 0,2 až 0,3 T. Části ploché trysky jsou spojeny dohromady pomocí závitových tyčí a matic. Těsnění bylo realizováno pomocí O-kroužku. Magnety byly opět ošetřeny ochranným lakem pro zabránění vzniku koroze a zkratových proudů. V první části pokusu byly měřeny veličinami průtok, napětí a akcelerace. Napětí bylo měřeno pomocí měřicí karty. V každém kroku měření byla vzorkovací frekvence 24 kHz a každý krok měření trval 8,33 s, čili v každém kroku bylo naměřeno 200 000 hodnot. Ve druhé části pokusu došlo k ověření změřených hodnot napětí pomocí osciloskopu se vzorkovací frekvencí 100 kHz a vzorkovacím časem 10 s. Jelikož byly úchyty sond osciloskopu příliš malé, došlo k napojení sond osciloskopu na již přítomné kabely, které byly předtím zapojeny v měřicí kartě. Jelikož tvar grafu následně neodpovídal očekávání, došlo k zopakování měření. Opakované měření bylo rozdílné ve způsobu napojení osciloskopu na sondu. V opakovaném měření došlo k připájení (cín - měď) vodičů k elektrodám a následnému napojení sond osciloskopu na vodiče. Průtok v okruhu byl regulován mechanicky pomocí kulového ventilu. Každé měření prošlo od nejmenšího průtoku po největší a následně

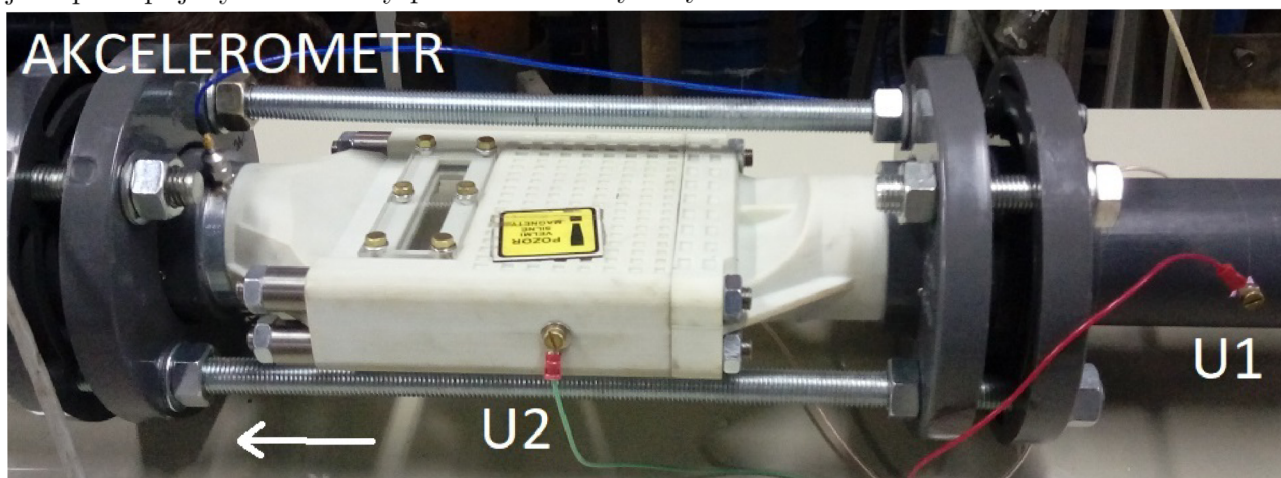
⁹Hodnota uvedená výrobcem v katalogovém listu

¹⁰Indukce byla měřena sondou v již zkompletovaném sestavení.

od největšího průtoku po nejmenší. Teplota vody v okruhu nebyla konstantní, avšak změna teploty vody před pokusem a po pokusu nebyla větší, než 10 °C.



Obrázek 35: Rozložené sestavení ploché trysky. Průhledová okénka jsou následně přišroubována k ploché trysce a slouží k identifikaci kavitačních bublin. Díly ploché trysky jsou pak spojeny dohromady pomocí závitových tyčí a matic.



Obrázek 36: Plochá tryska zapojená do okruhu. Šipka znázorňuje směr proudění kapaliny.

7.9 Použité zařízení a výpočet nejistoty měření

Čerpadlo

Lowara FHE 40-200/75

Tlakoměry

BD sensors DMP 331: rozsah 2,5 baru a 10 barů

Měřicí karta

National instruments BNC - 2110

Osciloskop

Teledyne LeCroy WaveRunner 610Zi

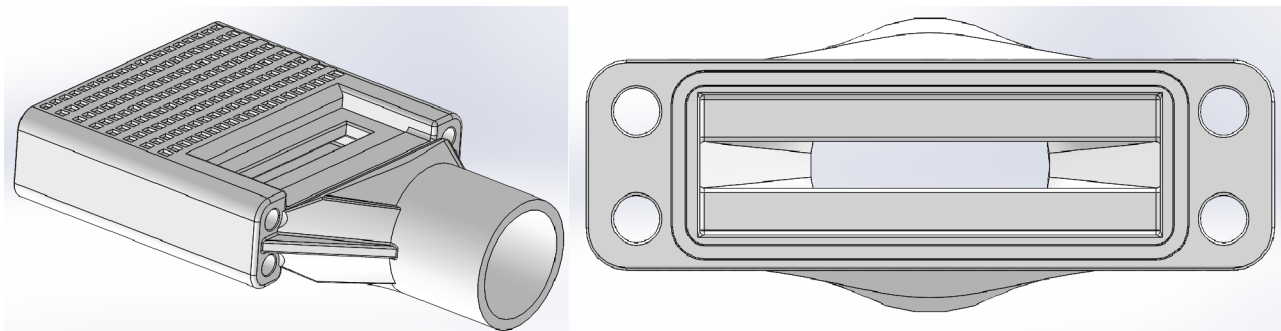
Indukční průtokoměr

MQI 99 - SN

Akcelerometr

PCB Piezotronics 352A60, sériové číslo: 158114

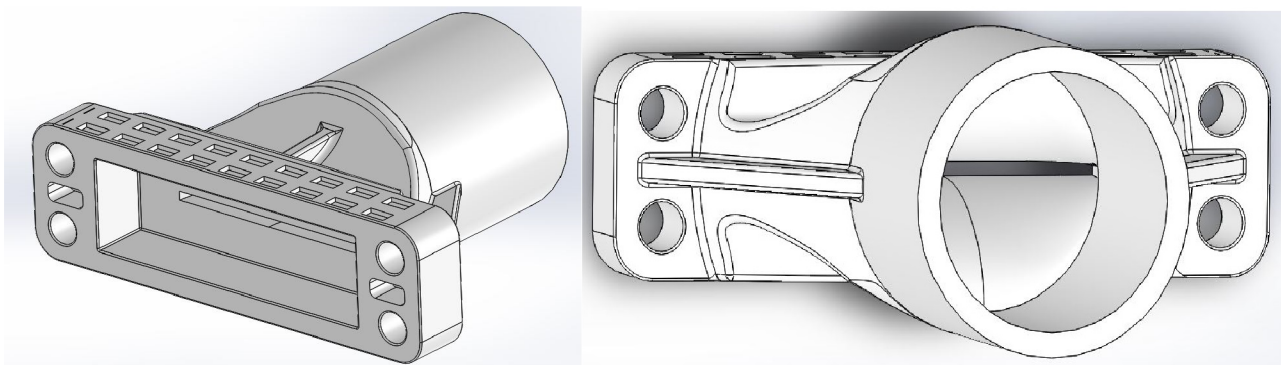
Nejistoty měření byly vypočteny stejným způsobem, jako v podkapitole 7.6.



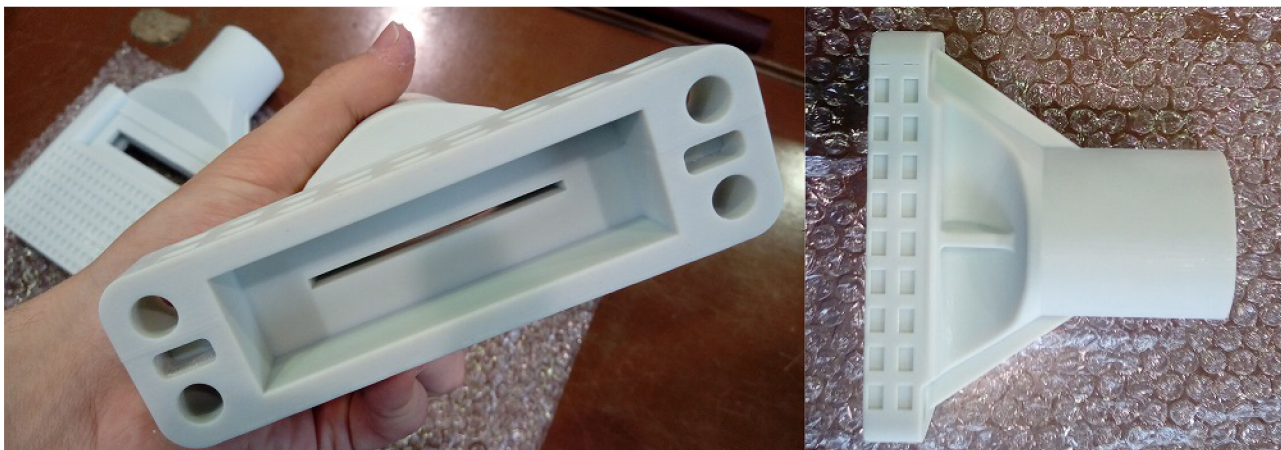
Obrázek 37: Větší část ploché trysky, model vytvořen v software Solidworks. Žebrování povrchu i žebra samotná slouží ke zvýšení tuhosti sestavy vzhledem k očekávanému značnému dynamickému namáhání kavitací.



Obrázek 38: Větší část ploché trysky, vyrobeno na 3D tiskárně

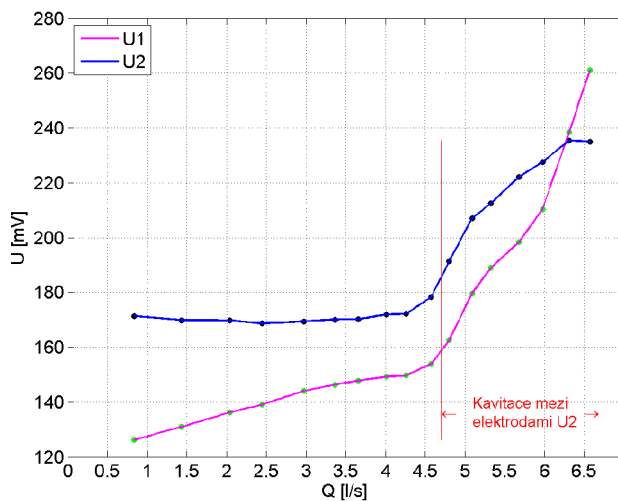
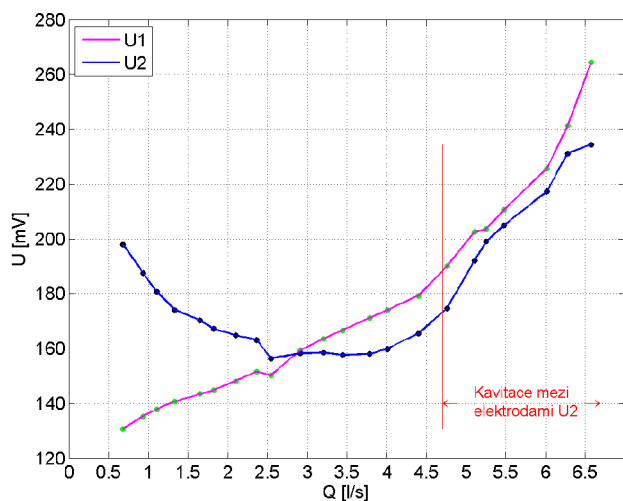


Obrázek 39: Menší část ploché trysky, vytvořeno v software Solidworks. Mezi otvory pro závitové tyče je vidět otvor určený k dostatečnému odvodu tepla při tisku na 3D tiskárně. Stejný otvor je i uvnitř větší části ploché trysky.

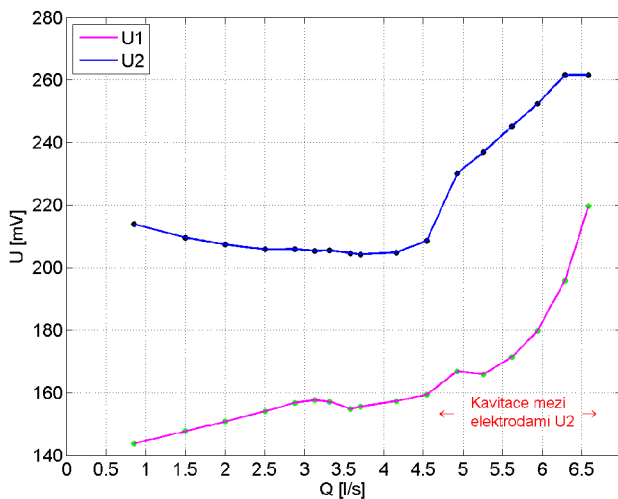
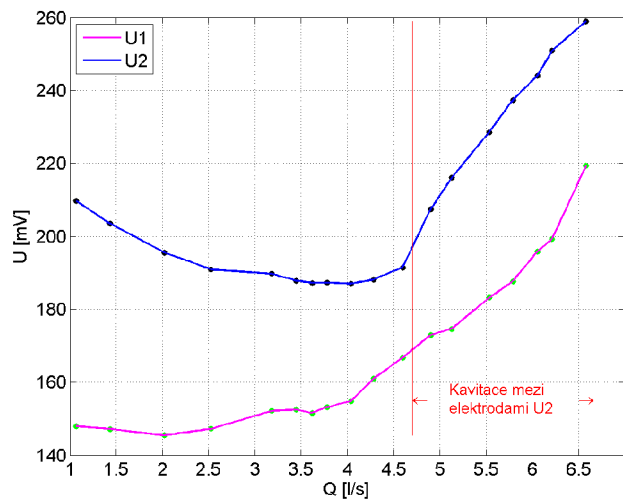


Obrázek 40: Menší část ploché trysky, vyrobeno na 3D tiskárně

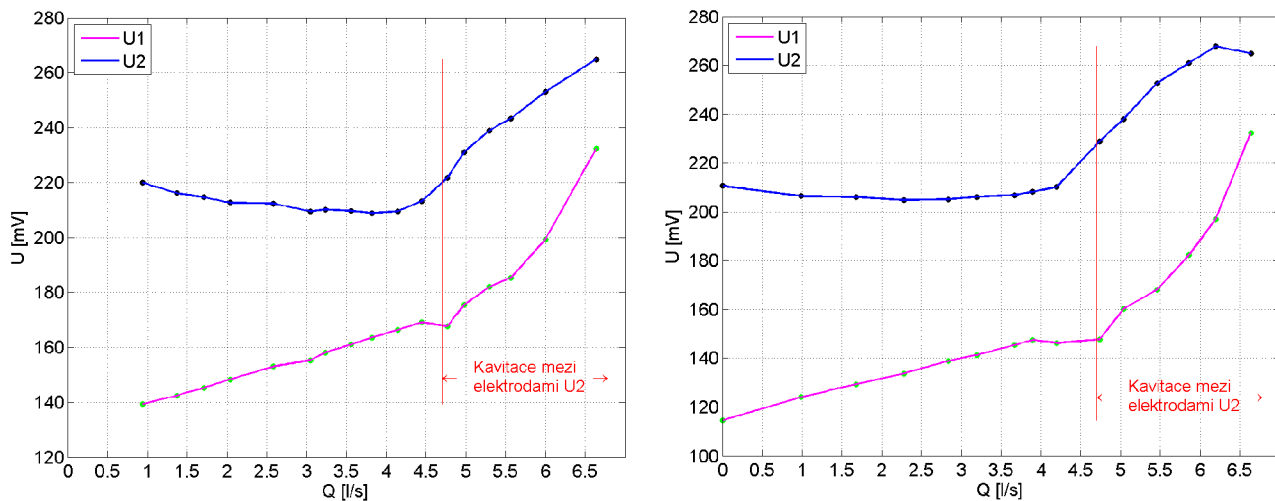
7.10 Výsledky pokusu III



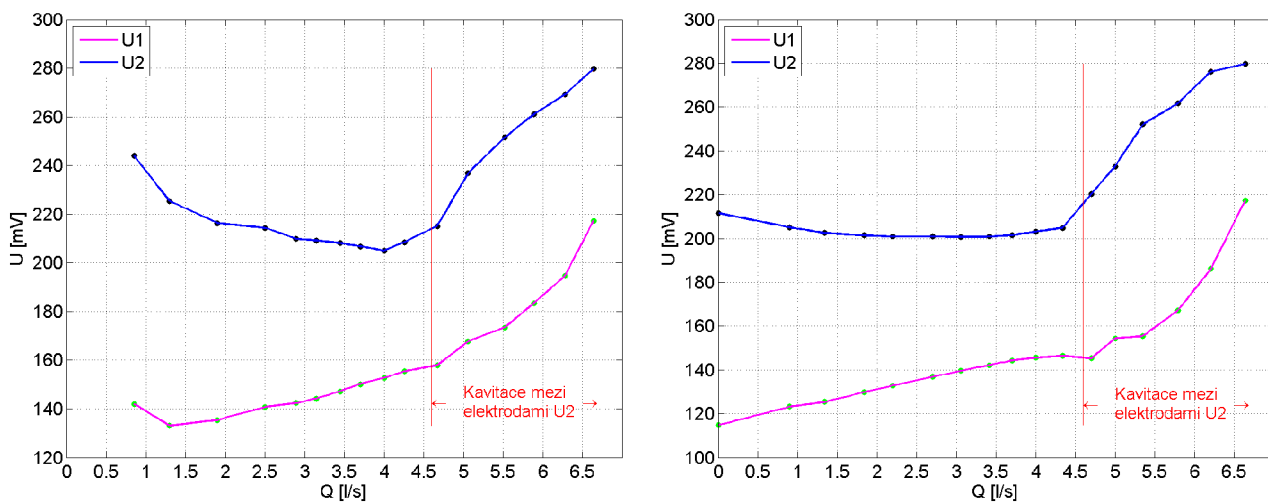
Obrázek 41: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



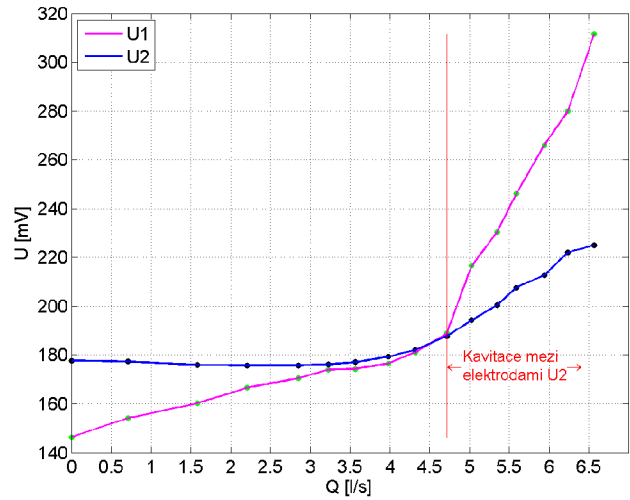
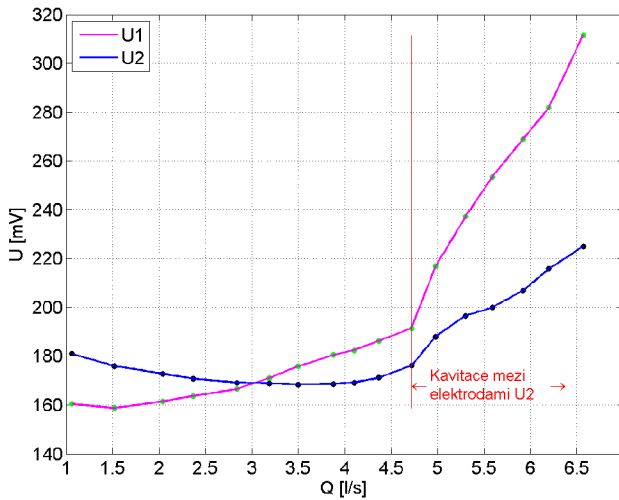
Obrázek 42: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.



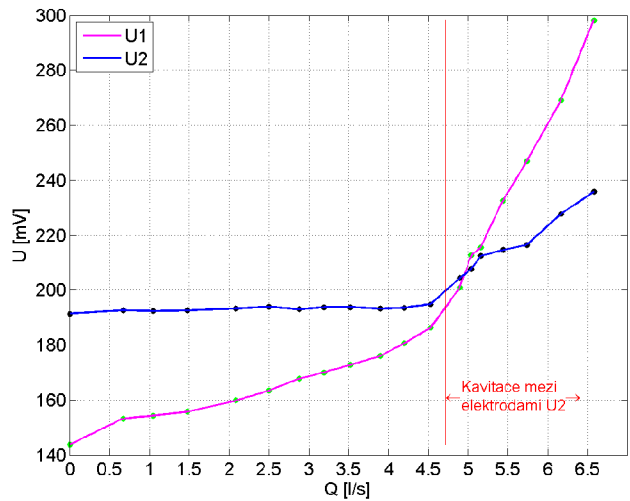
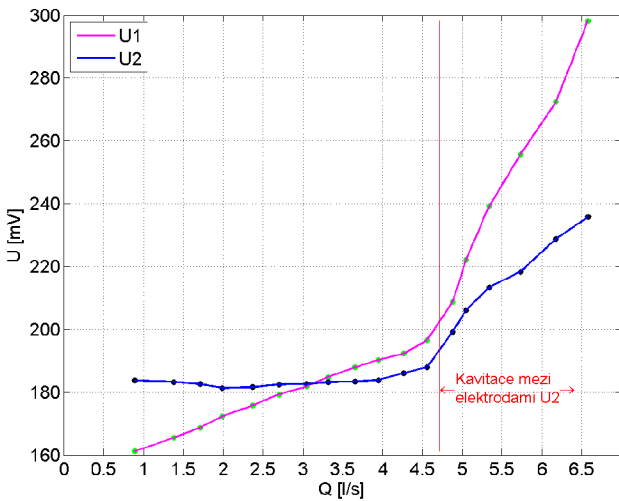
Obrázek 43: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.



Obrázek 44: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.

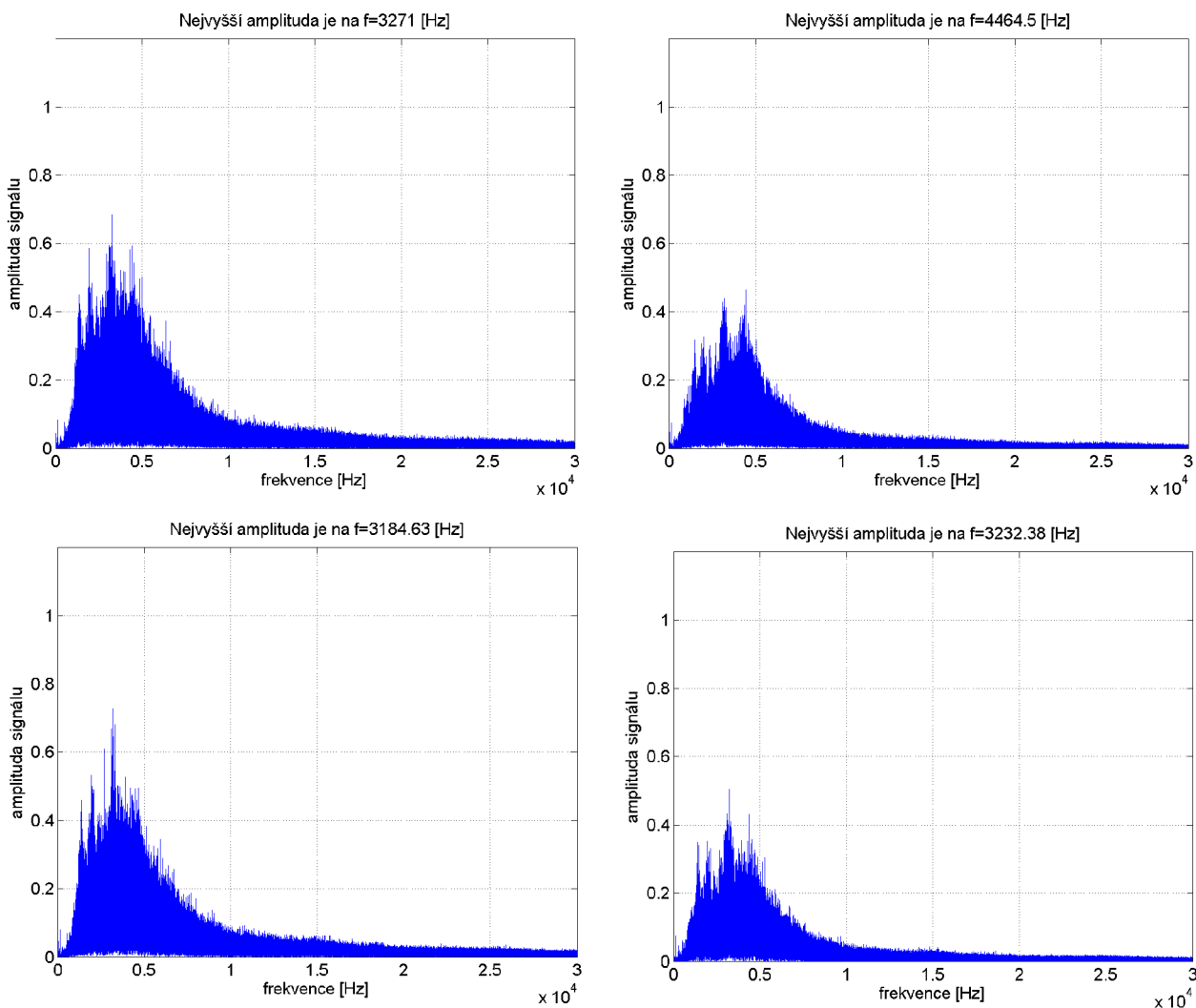


Obrázek 45: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.



Obrázek 46: Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - čtvrté měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.

Ve všech měřeních od nejmenšího průtoku po největší dochází až do hodnoty průtoku cca 4 l s^{-1} k poklesu hodnot měřeného napětí mezi elektrodami U2. Při měření od největšího průtoku k nejmenšímu je po přechodu z kavitacího do bezkavitacího proudění měřena téměř konstantní hodnota napětí mezi elektrodami U2. Po překročení prahového průtoku mezi bezkavitacím a kavitacím prouděním dojde ke zvýšení hodnot měřeného napětí jak pro elektrody U1 tak pro elektrody U2.



Obrázek 47: Fourierova transformace signálu změřeného akcelerometrem umístěným na ploché trysce. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvyšší hodnoty průtoků a tedy při nejintenzivnější kavitaci.

8 Diskuze

Z matematických simulací plyne, že magnetické pole by mělo mít na kavitaci tlumící efekt. Z externích experimentálních měření pak nebylo jasné, zda-li dojde k zesílení kavitace či nikoliv. Z provedených pokusů I, II a III se zdá, že účinkem magnetického pole může dojít k ovlivnění kavitace, jelikož po přechodu z bezkavitačního do kavitačního proudění došlo ke změně sklonu spojnice bodů. Rozdílem mezi pokusy a matematickým modelováním je fakt, že simulace jsou tvořeny pro osamocenou bublinu ve stojící kapalině, zatímco v pokusech bylo velké množství kavitačních bublin vzniklých hydrodynamickou kavitací v proudící kapalině. Navíc jsou v matematických modelech použity konstantní hodnoty pro povrchové napětí, viskozitu, elektrickou vodivost atd., což se z experimentálních měření nejeví, jako univerzálně platné a správné. Výsledky modelování a experimentů tedy nejsou v přímém rozporu.

V pokusu I při maximálním průtoku nebyly naměřeny vysoké frekvence 24 kHz, které byly změřeny v pokusu [34]. Jelikož tyto frekvence nebyly změřeny ani v žádném jiném experimentu, který probíhal od té doby v laboratoři fluidního inženýrství, existuje zde možnost, že se autorům originálního pokusu [34] povedlo zachytit buďto anomálii, nebo jev nesouvisející s kavitací. Dále byl v pokusu I patrný skok v hodnotě napětí v momentě, kdy dojde ke kavitaci v místě mezi sondami. Je však překvapivé, že při překročení hodnoty $1,21 \text{ ls}^{-1}$ již nedochází ke zvýšení hodnoty měřeného napětí, tak jako tomu bylo v pozdějších pokusech na téže trati (Obrázky 15, 16, 17).

Pro pokus II byla vytvořena válcová tryska. Válcová tryska obsahovala dva permanentní magnety, mezi kterými byla magnetická indukce rovna cca 0,6 T. Vliv magnetického pole na kavitaci byl měřen pomocí elektrod umístěných mezi vlnovými okénky. Vlnová okénka byla do válcové trysky umístěna pro získání přehledu o vývinu kavitace uvnitř válcové trysky. Vlnová okénka i elektrody zasahují až do oblasti s proudící kapalinou, čímž může docházet ke vzniku vírů a k ovlivnění jak proudění, tak imploze bublin. Tyto nepříznivé vlivy mohou ovlivnit měření. I přes to však byla zvolena varianta dvou rozdělených okének, neboť v případě pouze jednoho celistvého okénka by při vrtání otvoru pro sondu, nebo při následném provozu válcové trysky, mohlo dojít k prasknutí okénka a tedy k nefunkčnosti celého modelu.

Vzhledem k originálnímu pokusu [34] se skok při přechodu z bezkavitačního do kavitačního proudění nepovedlo zopakovat, nicméně v případě měření napětí pomocí osciloskopu je patrná změna sklonu spojnice bodů. Při porovnání měření napětí měřicí kartou a osciloskopem je patrné, že při měření osciloskopem jsou výsledky mnohem víc konzistentní, než při měření měřicí kartou. To může být způsobeno ne zcela vhodným zapojením elektrod a měřicí karty či nedostatečným odstíněním. Zároveň by došlo k vysvětlení velmi malého rozdílu mezi hodnotami U_1 a U_2 při měření měřicí kartou. Důvodem příklonu ke správnosti měření osciloskopem je rovněž fakt, že tvar grafů je podobný tvaru grafů změřených v originálním pokusu [34]. Rovněž je možné vysvětlit velký rozdíl v hodnotách napětí při měření osciloskopem, kdy mezi elektrodami ve válcové trysce je menší vzdálenost než mezi elektrodami před válcovou tryskou. Výsledné frekvence Fourierovy transformace jsou nižší, než v pokusu I, což je možné vysvětlit rozdílnou geometrií sestavy a rovněž využitím gumových O-kroužků, které fungují jako tlumiče kmitů.

V pokusu III si jsou grafy změřené měřicí kartou a osciloskopem (1. a 2. měření) po přechodu do kavitačního režimu velmi podobné. Podobnost však může být ovlivněna, možná až přímo způsobena faktem, že pro měřicí kartu i pro osciloskop byly využity stejné kabely připojené k elektrodám v ploché trysce. Jelikož ve II. pokusu došlo ke značnému rozdílu v měření při využití měřicí karty a osciloskopu, který se ve III. pokusu nepotvrdil a vzhledem

k tomu, že jediným rozdílem v zapojení osciloskopu je právě využití kabelů, existuje zde možnost neúmyslného částečného ovlivnění přenosu kabely, či jejich nedostatečného odstínění. Z toho důvodu bylo provedeno opakované měření (3. a 4. měření) pomocí osciloskopu, kdy byl osciloskop na elektrody připojen přes vodiče a nikoliv přes kabely. Počáteční hodnoty napětí U_2 se liší oproti 1. a 2. měření osciloskopem až o cca 70 mV. Jelikož však hodnoty napětí mezi elektrodami U_1 zůstávají přibližně stejné ve všech měřeních, nedá se předpokládat, že by snížení hodnot ve 3. a 4. měření bylo způsobeno připojením osciloskopu přes vodiče.

Grafy v pokusu III mají velmi zvláštní tvar, kdy hodnoty napětí v ploché trysce se zvyšujícím se průtokem nejprve klesají, nebo jsou konstantní, což je velmi obtížně vysvětlitelný jev. Vzhledem k tomu, že v I. ani ve II. pokusu nedošlo k naměření podobného jevu a vzhledem k tomu, že jediným rozdílem mezi II. a III. pokusem je výměna válcové trysky za plochou trysku, je zde vysoká pravděpodobnost, že tento jev je způsoben právě využitím větších magnetů. Pozoruhodné rovněž je, že k danému postupnému snižování hodnoty napětí v bezkavitačním režimu dochází ve velké míře pouze při měření průtoku směrem od nejmenšího k největšímu. V opačném směru k tomuto jevu dochází v daleko menší míře.

Dalším obtížně vysvětlitelným faktem je nesrovnalost hodnot mezi navazujícími měřeními. Například mezi posledním měřeným bodem na obrázku (Obrázek 41) vpravo a prvním měřeným bodem na obrázku (Obrázek 42) vlevo je časový rozdíl asi 2 minuty (v tomto čase došlo k vypnutí čerpadla, překontrolování okruhu a měřících zařízení a opětovnému zapnutí čerpadla). Hodnota napětí však za tuto dobu vzroste o cca 40 mV.

Při přechodu do kavitačního režimu jsou křivky měřené osciloskopem při 3. a 4. měření v ploché trysce mnohem strmější, než při měření osciloskopem ve válcové trysce. To je způsobeno větší plochou, na které dochází ke kavitační implozi, což rovněž znamená více nábojů přítomných v oblasti a tedy větší hodnotu přírůstku napětí. Zároveň je však ve 3. a 4. měření patrné, že přírůstek měřený mezi elektrodami U_1 je větší než mezi elektrodami U_2 . Tento fakt by mohl ukazovat na tlumení kavitace pomocí magnetického pole. Toto tlumení se však neprokázalo v pokusu II, a tedy se nedá z provedených experimentů přesně posoudit, jaké účinky magnetické pole na kavitaci má.

Je však nezbytně nutné poukázat na fakt, že skok v hodnotách napětí při přechodu do kavitačního režimu nemusí být nutně způsoben přítomností magnetů. Jelikož je potrubí plastové, tak zde existuje možnost ovlivnění měření statickou elektřinou, která se nejvíce projeví právě na bublinách přítomných v kapalině. Rovněž je potřeba zmínit, že měřené hodnoty napětí jsou velmi malé a vzhledem k tomu, že hydraulické okruhy nebyly od okolního prostředí jakkoliv izolovány, hrozí zde nebezpečí ovlivnění měření externími zdroji.

Nevýhodou použití stacionárních magnetů je fakt, že dochází k velmi rychlé degradaci magnetů. Tento problém je řešitelný oddělením kapaliny od magnetu pomocí vrstvy odolného materiálu, což však způsobuje značné snížení magnetické indukce mezi magnety. Pro zachování dostatečně velké magnetické indukce v oblasti by pak bylo potřeba značné navýšení počátečních investic pro koupi odpovídajících magnetů.

9 Závěr

V první části práce byly uvedeny základní pojmy pro další práci s textem. Následně byla popsána kavitace a odvozena Rayleigh-Plessetova rovnice. Jelikož mají bubliny na svém povrchu náboj, přes který může magnetické pole bubliny ovlivnit, byla uvedena modifikovaná Rayleigh-Plessetova rovnice s vlivem elektrického náboje.

Dále byla v rešerši zpracována teorie magnetického pole s uvedenými Maxwellovými rovnicemi a jejich následné využití pro výpočet napětí v trubce. Rovněž došlo k uvedení Rayleigh-Plessetových rovnic se zakomponovaným vlivem magnetického pole. Z matematických simulací plyne, že magnetické pole by mělo fungovat jako tlumič kavitace.

Poté došlo k detailnímu popsání vzájemného působení mezi magnetickým polem, vlastnostmi vody a kavitací. Vzájemné působení je značně kontroverzní téma a tedy se nedá s jistotou říci, jaký vliv magnetické pole na vlastnosti vody a kavitaci má. Následně byly uvedeny možnosti praktického využití působení magnetického pole na kavitaci.

Poslední část diplomové práce je věnována experimentu, přičemž nejprve došlo k vytvoření dvou modelů - válcové kavitační trysky s permanentními magnety a ploché kavitační trysky s permanentními magnety v programu Solidworks. Následně byly tyto modely vytištěny na 3D tiskárně z materiálu Polyjet. Z následujících měření poté plyne, že vliv magnetického pole na kavitaci není velký a nedá se dost dobře odlišit od ostatních vlivů. Z pokusu I a II plyne, že spíše dochází k zesílení kavitace, z pokusu III pak plyne spíše zeslabení kavitace. Opět se tedy nedá s určitostí říci, jaký vliv magnetické pole na kavitaci má a tedy se tento jev ani nedá doporučit pro využití v praxi.

Pro případnou navazující diplomovou práci by bylo vhodné změřit závislost napětí na průtoku v kovovém, izolovaném, uzemněném okruhu s možností tlakování, aby mohla být potlačena kavitace a mohl být změřen vliv změny rychlosti v důsledku změny průřezu. Rovněž by došlo k eliminaci rušivých vlivů okolí a statického náboje. Další možností je změna magnetické indukce v ploché trysce i ve válcové trysce. Změny může být dosaženo v ploché trysce změnou výšky plastových rozpěrných kvádrů a ve válcové trysce broušením dosedacích ploch vhlédových okének.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] ALIABADI, Abbas a Alireza TAKLIFI. The effect of magnetic field on dynamics of gas bubbles in visco-elastic fluids. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2012, **36**(6), 2567-2577 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.apm.2011.09.040. ISSN 0307904x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0307904X11005968>
- [2] ALTY, T. The Origin of the Electrical Charge on Small Particles in Water. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 1926, **112**(760), 235-251 [cit. 2018-03-03]. DOI: 10.1098/rspa.1926.0108. ISSN 1364-5021. Dostupné z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1926.0108>
- [3] AMIRI, M.C. a Ali A. DADKHAH. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2006, **278**(1-3), 252-255 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.12.046. ISSN 09277757. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775705010150>
- [4] ARROJO, S., Y. BENITO a A. MARTÍNEZ TARIFA. A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2008, **15**(5), 903-908 [cit. 2017-09-22]. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2007.11.001. ISSN 13504177. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350417707001848>
- [5] BABICA, Pavel, Luděk BLÁHA a Blahoslav MARŠÁLEK. Microcystiny - cyklické heptapeptidy sinic. In: *Centrum pro cyanobakterie a jejich toxiny* [online]. Brno, 2005 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://www.sinice.cz/index.php?pg=aktivity--popularizacni-cinnost>
- [6] BESOV, Alexey S. *Experimental investigation of the influence of magnetic field on the cavitation inception in pulse rarefaction waves in water*. Adelaide, 1997. Dostupné z: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSVS-1997/pdf/scan/sv970283.pdf
- [7] Beware of static electricity generated by flowing liquid. *Shimadzu: Excellence in science* [online]. ©2018 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.shimadzu.com/an/hplc/support/lib/lctalk/14/14lab.html>
- [8] BOLOGA, M.K., S.P. KOZYREV, Y.N. PAUKOV, K.K. SHALNEV a I.A. SHALOBASOV. Experimental investigation of effect of external magnetic and electric fields on cavitation and erosion. *Proc. conf. on cavitation*. Edinburgh, 1974, , C177/74.
- [9] BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knižnice inženýra.
- [10] CAI, Ran, Hongwei YANG, Jinsong HE a Wanpeng ZHU. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *Journal of Molecular Structure*

- [online]. 2009, **938**(1-3), 15-19 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.molstruc.2009.08.037. ISSN 00222860. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022286009005559>
- [11] COLIC, Miroslav a Dwain MORSE. The elusive mechanism of the magnetic 'memory' of water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 1999, **154**(1-2), 167-174 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/S0927-7757(98)00894-2. ISSN 09277757. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775798008942>
- [12] DULAR, Matevž, Tjaša GRIESSLER-BULC, Ion GUTIERREZ-AGUIRRE, et al. Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2016, 29, 577-588 [cit. 2017-09-15]. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.10.010. ISSN 13504177. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350417715300535>
- [13] DVORSKY, Richard, Jiri LUNACEK a Ales SLIVA. Dynamics analysis of cavitation disintegration of microparticles during nanopowder preparation in a new Water Jet Mill (WJM) device. *Advanced Powder Technology* [online]. 2011, **22**(5), 639-643 [cit. 2018-03-08]. DOI: 10.1016/j.appt.2010.09.008. ISSN 09218831. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921883110001718>
- [14] FIALOVÁ, S.; POCHYLÝ, F. Mutual effects of cavitation and electromagnetic field. In *Cavitation and dynamic problems - IAHRWG 2015 - Proceedings*. first. Slovenia: Faculty of Technologies and Systems, 2015. s. 35-42. ISBN: 978-961-6770-31-6.
- [15] FRANC, Jean-Pierre a Jean-Marie MICHEL. *Fundamentals of cavitation* [online]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004 [cit. 2018-02-01]. ISBN 978-140-2022-333. Dostupné z: <http://www.springer.com/cn/book/9781402022326>
- [16] FUJIMURA, Y a M IINO. Magnetic field increases the surface tension of water. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, 156, 012028- [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1088/1742-6596/156/1/012028. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/156/i=1/a=012028?key=crossref.b945cda72511f074e12ba171d5ec24b5>
- [17] FUJIMURA, Yuu a Masaaki IINO. The surface tension of water under high magnetic fields. *Journal of Applied Physics* [online]. 2008, **103**(12), 124903- [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1063/1.2940128. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2940128>
- [18] GHOURI, S. A. a M. S. ANSARI. Increase of water viscosity under the influence of magnetic field. *Journal of Applied Physics* [online]. 2006, **100**(6), 066101- [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1063/1.2347702. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2347702>
- [19] GIMENEZ, G. Electrical pulses produced by cavitation bubbles. *Journal of Physics D: Applied Physics* [online]. 1979, **12**(4), L25-L27 [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1088/0022-3727/12/4/001. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0022-3727/12/i=4/a=001?key=crossref.0ecee7338532e3856a725da01a8814d8>

- [20] GRIGOR'EV, A. I. a A. N. ZHAROV. Stability of the equilibrium states of a charged bubble in a dielectric liquid. *Technical Physics* [online]. 2000, **45**(4), 389-395 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1134/1.1259640. ISSN 1063-7842.
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/1.1259640>
- [21] GUO, Yun-Zhu, Da-Chuan YIN, Hui-Ling CAO, et al. Evaporation Rate of Water as a Function of a Magnetic Field and Field Gradient. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2012, **13**(12), 16916-16928 [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.3390/ijms131216916. ISSN 1422-0067.
Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1422-0067/13/12/16916>
- [22] HALDEEV, E.V., S.P. KOZYREV, K.K. SHALNEV, I.A. SHALOBASOV a Y.S. ZVRAGINCEV. Remarks concerning magnetic fields in liquid. *Electronic machining of materials*. 1974, **3**(57), 56-59.
- [23] HAMMITT, F. *Effects of magnetic and electric fields upon cavitation in conducting and non-conducting liquids - Russian research results* [online]. 1974 [cit. 2017-09-13]. UMR1780. Dostupné z: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/5303>
- [24] HOLYSZ, Lucyna, Aleksandra SZCZES a Emil CHIBOWSKI. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2007, **316**(2), 996-1002 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.jcis.2007.08.026. ISSN 00219797. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021979707011782>
- [25] CHANG, Kai-Tai a Cheng-I. WENG. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *Journal of Applied Physics* [online]. 2006, **100**(4), 043917- [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1063/1.2335971. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2335971>
- [26] CHEN, Long, Chuan Jun LI a Zhong Ming REN. Variation of Surface Tension of Water in High Magnetic Field. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, 750-752, 2279-2282 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.750-752.2279. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.750-752.2279>
- [27] CHO, Young I. a Sung-Hyuk LEE. Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer* [online]. 2005, **32**(1-2), 1-9 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.03.019. ISSN 07351933. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0735193304001976>
- [28] IWASAKA, M. a S. UENO. Structure of water molecules under 14 T magnetic field. *Journal of Applied Physics* [online]. 1998, **83**(11), 6459-6461 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1063/1.367737. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.367737>
- [29] JANČULA, Daniel, Přemysl MIKULA, Blahoslav MARŠÁLEK, Pavel RUDOLF a František POCHYLÝ. Selective method for cyanobacterial bloom removal: hydraulic jet cavitation experience. *Aquaculture International* [online]. 2014, **22**(2), 509-521 [cit. 2017-09-14]. DOI: 10.1007/s10499-013-9660-7. ISSN 0967-6120.
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10499-013-9660-7>

- [30] JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 3. dopl. a opr. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 1998. ISBN 80-718-2070-9
- [31] JYOTI, K.K a A.B PANDIT. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal* [online]. 2001, **7**(3), 201-212 [cit. 2016-01-31]. DOI: 10.1016/S1369-703X(00)00128-5. ISSN 1369703X. dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X00001285>
- [32] KAMIYAMA, Shinichi, Kazuo KOIKE a Hiroshi KAWAGUCHI. Effects of a Magnetic Field on Cavitation Damage: Experiments in Tap Water. *Bulletin of JSME* [online]. 1982, **25**(209), 1690-1695 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1299/jsme1958.25.1690. ISSN 1881-1426. Dostupné z: <http://joi.jlcs.jst.go.jp/JST.Journalarchive/jsme1958/25.1690?from=CrossRef>
- [33] KANG, K. H., I. S. KANG a C. M. LEE. Effects of a uniform magnetic field on a growing or collapsing bubble in a weakly viscous conducting fluid. *Physics of Fluids* [online]. 2002, **14**(1), 29-40 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1063/1.1425410. ISSN 1070-6631. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1425410>
- [34] KANTOR, D. *Vliv kavitace na vlastnosti elektromagnetického pole*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2007. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, Csc.
- [35] KIRKHAM, M. B. *Principles of soil and plant water relations* [online]. Second edition. Boston: Elsevier, 2014 [cit. 2018-03-09]. ISBN 978-0-12-420022-7. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124200227010016>
- [36] KITAZAWA, Koichi, Yasuhiro IKEZOE, Hiromichi UETAKE a Noriyuki HIROTA. Magnetic field effects on water, air and powders. *Physica B: Condensed Matter* [online]. 2001, **294-295**, 709-714 [cit. 2018-03-17]. DOI: 10.1016/S0921-4526(00)00749-3. ISSN 09214526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921452600007493>
- [37] LÁNY, Petr, František TREML, Zdeněk POSPÍŠIL a Dagmar ZENDULKOVÁ. *Infekční choroby zvířat II: Virové a prionové infekce*. 1. vyd. Brno, 2014. ISBN 978-80-7305-706-0.
- [38] LI, Pan, Yuan SONG a Shuili YU. Removal of *Microcystis aeruginosa* using hydrodynamic cavitation: Performance and mechanisms. *Water Research* [online]. 2014, **62**, 241-248 [cit. 2017-09-14]. DOI: 10.1016/j.watres.2014.05.052. ISSN 00431354. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135414004242>
- [39] LI, Pan, Yuan SONG, Shuili YU a Hee-Deung PARK. The effect of hydrodynamic cavitation on *Microcystis aeruginosa*: Physical and chemical factors. *Chemosphere* [online]. 2015, **136**, 245-251 [cit. 2017-09-14]. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.017. ISSN 00456535. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653515004804>
- [40] MEDINA, Victor F., Chris S. GRIGGS a Catherine THOMAS. Evaluation of the Destruction of the Harmful Cyanobacteria, *Microcystis aeruginosa*, with a Cavitation and Superoxide Generating Water Treatment Reactor. *Bulletin of Environmental*

- Contamination and Toxicology* [online]. 2016, **96**(6), 791-796 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1007/s00128-016-1742-6. ISSN 0007-4861. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00128-016-1742-6>
- [41] MEZULE, L., S. TSYFANSKY, V. YAKUSHEVICH a T. JUHNA. A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of *Escherichia coli*. *Desalination* [online]. 2009, **248**(1-3), 152-159 [cit. 2017-09-17]. DOI: 10.1016/j.desal.2008.05.051. ISSN 00119164. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S00119164090005803>
- [42] MIYAKOSHI, Junji. Effects of static magnetic fields at the cellular level. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* [online]. 2005, **87**(2-3), 213-223 [cit. 2017-06-21]. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.008. ISSN 00796107. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079610704001117>
- [43] MIYAKOSHI, Junji. The review of cellular effects of a static magnetic field. *Science and Technology of Advanced Materials* [online]. 2016, **7**(4), 305-307 [cit. 2017-06-21]. DOI: 10.1016/j.stam.2006.01.004. ISSN 1468-6996. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.stam.2006.01.004>
- [44] MO, Run-Yang, Lin-Yan WU, Si-Nan ZHAN a Yin-Hong ZHANG. Effect of magnetic field on single-bubble in water. *Acta Physica Sinica* [online]. 2015, 2015, **64**(12) [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.7498/aps.64.124301. ISSN 1000-3290. Dostupné z: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/10.7498/aps.64.124301>
- [45] *Nejistoty v měření I: Vyjadřování nejistot* [online]. Automa, 2001, **2001**(7-8) [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf
- [46] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-030-0206-0.
- [47] PANG Xiao Feng. The Experimental Evidences of the Magnetism of Water by Magnetic-Field Treatment. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2014, **24**(5), 1-6 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1109/TASC.2014.2340455. ISSN 1051-8223. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6872774>
- [48] PANG, Xiao-Feng a Bo DENG. The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B: Condensed Matter* [online]. 2008, **403**(19-20), 3571-3577 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.physb.2008.05.032. ISSN 09214526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921452608002494>
- [49] PANG, Xiao-feng a H J W MÜLLER-KIRSTEN. Dynamic properties of proton transfer in hydrogen-bonded molecular systems. *Journal of Physics: Condensed Matter* [online]. 2000, **12**(6), 885-906 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1088/0953-8984/12/6/312. ISSN 0953-8984. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0953-8984/12/i=6/a=312?key=crossref.0b98b17ea70c2463e2f2591ab13b3ff7>
- [50] PEARSON, A., J.R. BLAKE a S.R. OTTO. Jets in bubbles. *Journal of Engineering Mathematics* [online]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004, **48**(3), 391-412 [cit. 2018-02-18]. DOI: 10.1023/B:engi.0000018172.53498.a2. ISSN 0022-0833.

- [51] SHALNEV, K.K. a I.A. SHALOBASOV. Influence of magnetic field on cavitation and erosion. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH SECTION FOR HYDRAULIC MACHINERY, EQUIPMENT AND CAVITATION. *Symposium Stockholm: Transactions*. Svenska Centrankommitten for Internationella Ingenjorskongresser, 1970, H1 (1-11).
- [52] SHALNEV, K.K., I.A. SHALOBASOV a U.C. ZYIAGENCEF. Influence of direction of magnetic field vector on cavitation and erosion. *Akad. Nauk. SSR*, 1973, **213**(3), 574-576.
- [53] SUPPONEN, Outi, Danail OBRESCHKOW, Philippe KOBEL a Mohamed FARHAT. Detailed Jet Dynamics in a Collapsing Bubble. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2015, 656, 012038- [cit. 2018-02-18]. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012038. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/656/i=1/a=012038?key=crossref.7b883d5a7aab00e295f0a514eb3c6e4d>
- [54] SZÁNTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-730-0096-2.
- [55] SZCZEŚ, A., E. CHIBOWSKI, L. HOLYSZ a P. RAFALSKI. Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2011, **50**(1), 124-127 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.cep.2010.12.005. ISSN 02552701. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0255270110003144>
- [56] TILLACK, M.S. a N.B. MORLEY. Magnetohydrodynamics. *Standard handbook for electrical engineers*. 14th ed. London: McGraw-Hill, 1999, s. 4-7. ISBN 0070220050.
- [57] TOLEDO, Evelyn J.L., Teodorico C. RAMALHO a Zuy M. MAGRIOTIS. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *Journal of Molecular Structure* [online]. 2008, **888**(1-3), 409-415 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.molstruc.2008.01.010. ISSN 00222860. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022286008000434>
- [58] USANOV, A. D., S. S. ULYANOV, N. S. ILYUKHINA a D. A. USANOV. Monitoring of changes in cluster structures in water under AC magnetic field. *Optics and Spectroscopy* [online]. 2016, **120**(1), 82-85 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1134/S0030400X16010239. ISSN 0030-400x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S0030400X16010239>
- [59] VOTAVA, Miroslav. *Lékařská mikrobiologie obecná*. 2. přeprac. vyd. Brno: Neptun, 2005. ISBN 80-868-5000-5.
- [60] ZAIDI, Nur Syamimi, Johan SOHAILI, Khalida MUDA a Mika SILLANPÄÄ. *Magnetic Field Application and its Potential in Water and Wastewater Treatment Systems* [online]. 2013, **43**(3), 206-240 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1080/15422119.2013.794148. ISSN 1542-2119. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15422119.2013.794148>

- [61] ZHONG-FENG, HUO, ZHAO QIAN a ZHANG YING-HUA. Experimental Study on effects of magnetization on surface tension of water. *Procedia Engineering* [online]. 2011, 26, 501-505 [cit. 2017-09-13]. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2198. ISSN 18777058. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811050417>

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

B [$A^{-1}kg s^{-2}$]... vektor magnetické indukce,
 C_0 [-]... konstanta
 D [$Am^{-2}s$]... vektor elektrické indukce,
 E [$A^{-1}kgms^{-3}$] ... vektor intenzity elektrického pole
 F [$kgms^{-2}$]... Lorentzova síla
 H [Am^{-1}] ... vektor intenzity magnetického pole,
 j [Am^{-2}]... vektor hustoty elektrického proudu,
 K [-]... Poissonova konstanta,
 L [m]... vzdálenost bubliny od stěny,
 M_{H_2O} [$kgmol^{-1}$]... Molární hmotnost vody,
 N_A [-]... Avogadrova konstanta,
 p [Pa]... tlak kapaliny,
 P_{H_2O} [Cm]... elektrický dipólový moment,
 Q [As]... náboj na povrchu bubliny
 Q_n [As]... náboj
 r [m]... radiální polohový vektor,
 R [m]... poloměr bubliny,
 t [s] ... čas,
 t_{RR} [Pa]... normálové (radiální) napětí,
 u [ms^{-1}]... normálová (radiální) složka rychlosti,
 v [ms^{-1}]... rychlost částice
 v_s [ms^{-1}]... střední rychlost
 ϵ [$A^2kg^{-1}m^{-3}s^4$]... elektrická permitivita
 μ_0 [$mkgs^{-2}A^{-2}$]... magnetická permeabilita vakua,
 ν [$Pa \cdot s$]... dynamická viskozita,
 ρ [kgm^{-3}]... hustota,
 ρ_n [$Am^{-3}s$]... hustota nábojů,
 σ [Nm^{-1}]... povrchové napětí mezi vodou a směsí plynů,

Indexy:

g... tlak plynu,

v... tlak par,

∞ ... tlak ve velké vzdálenosti od bubliny,

0... počáteční stav

12 Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

1	Model molekuly vody tvaru tetraedru. [35]	11
2	Fázový diagram znázorňující princip kavitace, p_v značí tlak sytých par pro danou teplotu [15]	13
3	Imploze kavitační bubliny	14
4	Bublina	15
5	Pohybující se kavitační bubliny v potrubí, A a B jsou elektromagnetické sondy [14]	20
6	Výsledek modelování vlivu magnetického pole při $We = 2000$ a $Re = 1000$ po dosazení do rovnice (30) [33].	24
7	Výsledek modelování vlivu magnetického pole na newtonskou kapalinu [1].	24
8	Výsledek modelování vlivu magnetického pole po dosazení do rovnice (28) [44].	24
9	Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu: a) sinice před působením kavitace, b) po 10 minutách kavitace, c) po 30 minutách kavitace, d) po 60 minutách kavitace [38]	27
10	Kavitační mikrotryska vznikající při implozi bubliny působí na částici a rozděluje ji na menší části [13]	28
11	Graf závislosti napětí na průtoku při průtoku trubici. Skok na hodnotě $1,3 \text{ l s}^{-1}$ je způsoben přechodem do kavitačního režimu. [34]	29
12	Detail kavitační oblasti se zapojeným akcelerometrem a přítomnými magnety nad elektromagnetickou sondou.	30
13	Ukázka testovací tratě v pokusu I	30
14	Graf závislosti napětí na průtoku. Měření probíhalo od nejmenší hodnoty průtoku po největší. Levý graf - měření bez magnetů, pravý graf - měření s magnety. Do hodnoty průtoku $1,1 \text{ l s}^{-1}$ se kavitace tvořila pouze ve vypouklé části trubice před magnety (část a)), po překročení této hodnoty se kavitace rozšířila mezi elektromagnetické sondy (část b)).	31
15	Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřící karty.	32
16	Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřící karty.	32
17	Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřící karty.	32
18	Fourierova transformace měřeného signálu z akcelerometru provedená v software MATLAB, 2.pokus - třetí měření	34
19	Ukázka testovací tratě ve 2. pokusu	35
20	Menší část válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks	36
21	Menší část válcové trysky, vyrobeno na 3D tiskárně z materiálu Polyjet	36
22	Větší část válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks	36
23	Větší část válcové trysky, vyrobeno na 3D tiskárně z materiálu Polyjet	36
24	Pohled na rozložené sestavení válcové trysky, vytvořeno v software Solidworks. Mezi vlnedová okénka pak byly vyvrtány otvory pro umístění sond.	37

25	Řez válcovou tryskou. O vlnová okénka jsou opřeny magnety. Je patrné, že vstupní průřez je menší, než průřez mezi magnety, a tedy může dojít k implozi bublin mezi magnety.	37
26	Válcová tryska v okruhu při pohledu shora, kolmo na válcovou trysku jsou umístěny elektrody. Šipka značí směr proudění kapaliny.	38
27	Magnet vytažený z válcové trysky po provedení experimentu.	39
28	Fourierova transformace měřeného signálu z akcelerometru provedená v software MATLAB	40
29	Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.	41
30	Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.	41
31	Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.	41
32	Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	42
33	Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	42
34	Hydraulická trať obsahující plochou kavitační trysku s permanentními magnety.	43
35	Rozložené sestavení ploché trysky. Průhledová okénka jsou následně přišroubována k ploché trysce a slouží k identifikaci kavitačních bublin. Díly ploché trysky jsou pak spojeny dohromady pomocí závitových tyčí a matic.	44
36	Plochá tryska zapojená do okruhu. Šipka znázorňuje směr proudění kapaliny.	44
37	Větší část ploché trysky, model vytvořen v software Solidworks. Žebrování povrchu i žebra samotná slouží ke zvýšení tuhosti sestavy vzhledem k očekávanému značnému dynamickému namáhání kavitací.	45
38	Větší část ploché trysky, vyrobeno na 3D tiskárně	45
39	Menší část ploché trysky, vytvořeno v software Solidworks. Mezi otvory pro závitové tyče je vidět otvor určený k dostatečnému odvodu tepla při tisku na 3D tiskárně. Stejný otvor je i uvnitř větší části ploché trysky.	45
40	Menší část ploché trysky, vyrobeno na 3D tiskárně	45
41	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.	46
42	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí měřicí karty.	46
43	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - první měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	47
44	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - druhé měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	47

45	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - třetí měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	48
46	Plochá tryska: Graf závislosti napětí na průtoku - čtvrté měření. Vlevo měření od nejmenšího průtoku po největší, vpravo od největšího průtoku po nejmenší. Napětí měřeno pomocí osciloskopu.	48
47	Fourierova transformace signálu změřeného akcelerometrem umístěným na ploché trysce. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvyšší hodnoty průtoků a tedy při nejintenzivnější kavitaci.	49

Seznam tabulek

13 Seznam příloh

Složka FFT obsahuje výsledky měření po Fourierově transformaci pro všechny pokusy. Slovem nahoru je označován postup měření od nejmenšího průtoku po největší. Slovem dolů je označován postup od největšího průtoku po nejmenší.