

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# **VYUŽITÍ KAVITACE V TECHNICKÉ PRAXI**

CAVITATION IN ENGINEERING PRACTICE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. MARTIN KIANIČKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. Ing. FRANTIŠEK POCHYLÝ, CSc.**

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav  
Akademický rok 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Martin Kianička

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

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:

### **Využití kavitace v technické praxi**

v anglickém jazyce:

### **Cavitation in engineering practice**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitace je spojena s rychlými změnami tlaku a skupenství. Změny probíhají velkou rychlostí a jsou nestacionární. Těchto skutečností lze využívat pro likvidaci mikroorganismů.

Cíle diplomové práce:

- Literární rešerše
- Sestavení hydraulického obvodu, návrh kavitační trubice na říčním člunu
- Experimentální ověření vlivu kavitace na vlastnosti vody obsahující sinice

Seznam odborné literatury:

- Internet
- Noskiewicz.J.: Kavítace, Academia Praha 1969

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. František Pochylý, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně dne 20.11.2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práce je složená ze tří částí. První část je literární rešerše, zabývající se objasněním pojmu kavitace, sinice a také nahlíží na současný stav využívání kavitace.

Druhá část se zabývá návrhem, sestavením a konstrukčním řešením hydraulického obvodu na říčním člunu.

Ve třetí části je experimentální ověření vlivu kavitace na několik druhů sinic obsažených ve vodě.

Návrh říčního člunu s hydraulickým obvodem, včetně samotného obvodu a kavitační trubice byly prováděny v programu SolidWorks, výpočty, jejich zpracování a grafy v programu Microsoft Excel.

## **Klíčová slova:**

kavitace, sinice, hydraulický obvod, kavitační trubice

## **Abstract**

This diploma thesis contains three parts. The first part is a background research which deals with notions such as cavitation and cyanobacteria. It also contains current phase in the use of cavitation.

The second part deals with design, composition and constructional solution of hydraulic circuit on the riverboat.

The third part deals with experimental certification of the cavitation effect on the cyanobacteria in the water.

Design of the riverboat with the hydraulic circuit including the circuit itself and the cavitation tube was created in SolidWorks program, calculations, it's processing and graphs were created in Microsoft Excel.

## **Key words:**

cavitation, cyanobacteria, hydraulic circuit, cavitation tube

## **Bibliografická citace**

KIANIČKA, M. *Využití kavitace v technické praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 52 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací pod vedením vedoucího diplomové práce prof. Ing. Františka Pochylého, CSc. a literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. 5. 2010

---

Martin Kianička

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval všem lidem, kteří mě svým přístupem a radami pomohli k vypracování této diplomové práce, především pak vedoucím diplomové práce prof. Ing. Františku Pochylému, CSc. za jeho rady, postřehy a podnětné návrhy při řešení dané problematiky. Dále pak ostatním zaměstnancům Odboru fluidního inženýrství, kteří mi byli nápomocni, zejména panu Ing. Martinu Hudcovi za jeho pomoc při měření v laboratoři a také svým blízkým za trpělivost, kterou se mnou měli.

## Obsah

1. ÚVOD .....	9
1.1 Řešený problém.....	9
1.2 Cíl diplomové práce .....	9
2. KAVITACE .....	10
2.1 Kavitační jevy .....	10
2.2 Podstata kavitačního jevu .....	11
2.3 Kavitační jádro a kavitační bublina .....	12
2.4 Vývoj a typy kavitací .....	12
2.5 Kavitační parametr .....	15
2.6 Využití kavitace .....	15
2.6.1 Ruská torpéda.....	15
2.6.2 Stomatologie .....	15
2.6.3 Desinfekce .....	15
2.6.4 Desintegrace vláknitých struktur v aktivovaném kalu.....	16
2.6.5 Potravinářský průmysl.....	16
2.6.6 Kosmetika .....	16
3. SINICE (ODDĚLENÍ CYANOBACTERIA) .....	16
3. 1 Stavba buněk .....	16
3.2 Struktury u sinic.....	17
3.3 Ekologie .....	18
3.4 Vodní květ.....	19
3.5 Zástupci .....	19
3.5.1 Microcystis.....	19
3.6 Význam pro člověka.....	20
3.7 Fyzikální princip hubení sinic působením hydrodynamické kavitace.....	21
4. SESTAVENÍ HYDRAULICKÉHO OBVODU NA ŘÍČNÍM ČLUNU.....	22
4.1 Princip a funkce .....	23
4.2 Kavitační trubice .....	24
4.2.1 Důvod vzniku kavitace v trubici .....	25
4.3 Stanovení ztrátového součinitele $\xi$ kavitační trubice .....	26



---

4.3.1 Obvod pro měření ztrátového součinitele $\xi$ .....	27
4.3.2 Postup měření .....	31
4.3.3 Výpočet.....	31
4.3.4 Použitá měřicí technika .....	34
4.4 Postup výpočtu ztrát hydraulického obvodu na říčním člunu.....	35
4.5 Konstrukční řešení kolene potrubí pro výtok kapaliny.....	38
4.6 Reakční síla kapaliny .....	40
4.6.1 Výpočet reakční síly .....	40
5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU KAVITACE NA VODU.....	42
OBSAHUJÍCÍ SINICE .....	42
5.1 Hydraulická trať pro experiment, popis, funkce .....	42
5.2 Průběh experimentu.....	43
6. ZÁVĚR .....	48
Seznam použitých symbolů .....	51
Seznam obrázků .....	52

## 1. ÚVOD

### 1.1 Řešený problém

Kavitace je fyzikální jev v kapalině, spojený s rychlými změnami tlaku a skupenství. Tyto změny probíhají velkou rychlostí a jsou nestacionární. Kavitace je obecně vnímána jako jev nepříznivý, při provozu hydraulických strojů či zařízení se snažíme kavitačním jevům vyhýbat a předcházet jim. Dochází při ní k narušování materiálu stroje, snižování jeho účinnosti a podobně.

Existuje však i mnoho způsobů, jak jevu kavitace využívat. V mnoha odvětvích lidské činnosti se dnes kavitace využívá, ať už je to medicína, kosmetika, potravinářský průmysl nebo vojenství. Jedna z možností využívání kavitace a jejich destruktivních účinků je také hubení mikroorganismů obsažených ve vodě. Jde o metodu ekologickou a nenákladnou.

### 1.2 Cíl diplomové práce

Cílem této práce je rešerše na téma kavitace, sinice a současný stav využívání kavitace. Dalšími cíly jsou návrh hydraulického obvodu na říční člun, který by byl schopen při svém provozu efektivního hubení sinic ve vodní nádrži, jako je přehrada či rybník a v neposlední řadě je to experimentální ověření vlivu kavitace na vlastnosti vody obsahující sinice.

## 2. KAVITACE [1]

### 2.1 Kavitační jevy

Při obtékání pevných těles kapalinou vznikají za určitého stavu kapaliny, např. tlaku a teplotě, malé prostory naplněné parami kapaliny nebo plynem, nebo parou i plynem (vznik parních nebo plynových bublin). Obdobný jev vzniká též ve stojící kapalině, v níž se pohybuje pevné těleso (kmitá). Tento jev nazýváme kavitace.

Kavitace je dlouhodobý problém v technické praxi. Již kolem roku 1895 s ní vyvstaly problémy při stavbě lodí u lodních šroubů. Kavitace způsobovala jednak snížení výkonu (nedosažení návrhových hodnot), jednak značné a rychlé poškozování obtékaných částí. Problému kavitace se věnuje značná pozornost. S hloubkou poznání se rozšiřovala oblast strojů a zařízení, v níž se zjišťovala kavitace. V současné době je výskyt kavitace zaznamenáván zejména u vodních turbín, hydrodynamických i hydrostatických čerpadel, v hydrodynamických převodech, v armaturách, v proudových přístrojích, v hydrodynamických ložiskách, u vodou chlazených spalovacích motorů, v ozubených převodech, u lodních šroubů a torpéd.

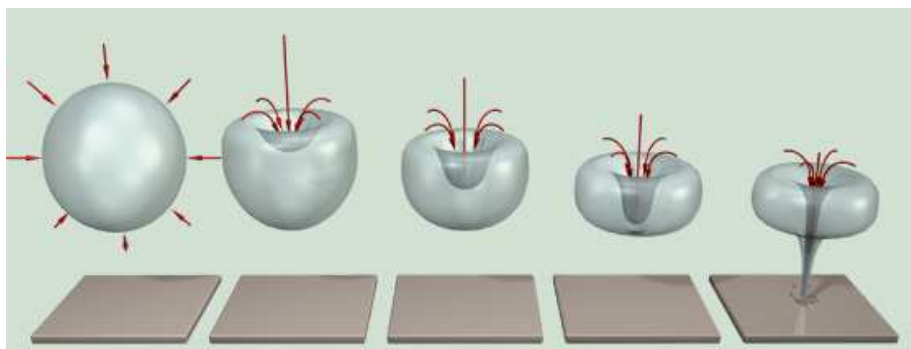


*Obr. 1: Kavitace na lodním šroubu*

Samotný kavitační jev byl poprvé popsán v roce 1895 S. W. Barnabym, který jej vysvětluje jako tvoření parních bublin. Od té doby bylo vydáno značné množství publikací o kavitaci a kavitačních účincích. S vývojem poznání kavitace se sjednocovaly názory na kavitační jev, včetně vytváření definic a pojmů.

## 2.2 Podstata kavitačního jevu

Kavitací nazýváme jev v kapalině, který se vyznačuje vznikem, vývojem a zánikem kavitačních dutin- bublin. Název kavitace vychází z latinského slova „cavitas“, které obecně znamená dutinu.



Obr. 2: Imploze kavitační bubliny

Kavitace v kapalině představuje narušení její spjitosti. Vzniká při dosažení určitého stavu kapaliny v daném místě. Tento stav je zejména určen tlakem a teplotou kapaliny. Tedy poklesne- li v daném místě tlak na hodnotu tlaku nasycených par při dané teplotě kapaliny, dochází k poruše souvislosti kapaliny a vzniká pozorovatelná malá kavitační bublina. V případě, že hodnota tlaku klesá nebo zůstane stejná, bublina se postupně zvětšuje. Při vzniku kavitační bubliny se v proudící kapalině tato bublina přemísťuje do oblasti vyššího tlaku než je kavitační tlak a zde prudce zaniká, imploduje. Při zániku bubliny v blízkosti obtékané stěny nebo přímo na stěně dochází po určité době působení kavitace k poškození povrchu materiálu, které se nazývá kavitační erozí. Kavitace probíhá rychlostí zvuku a skokem při ní narůstá napětí. Při zániku bubliny dochází taktéž na zlomky sekundy k obrovskému lokálnímu nárůstu teploty.



Obr. 3: Kavitační eroze povrchu materiálu

## 2.3 Kavitační jádro a kavitační bublina

Kavitační bubliny se objevují v místech porušení soudržnosti kapaliny. Aby se porušila tato soudržnost, musí být překonány kohezní síly molekul, jejichž projevem je pevnost kapaliny. Molekuly musí být na některém místě odtrženy od sebe. Pevnost kapaliny se liší podle stupně čistoty. Podle Bogačeva pro absolutně čistou vodu činí pevnost 1013 MPa. Skutečná kapalina, která nikdy není čistá, obsahuje různé příměsi, jako bubliny nerozpuštěného plynu nebo mechanické příměsi, má pevnost nižší a podle výpočtů Zeldoviče činí asi 202 MPa. Experimentálně zjištěná pevnost se však pohybuje ve výši  $10^4$  až  $10^6$  Pa, je tedy značně nižší než u čisté kapaliny.

Usuzuje se, že největší vliv na snížení pevnosti kapaliny mají zejména volné nerozpuštěné plyny, které tvoří tzv. kavitační jádra. Mechanické částčky dobře smáčivé kapalinou nesnižují mez pevnosti kapaliny, pokud fázové rozhraní mezi kapalinou a pevnou částčkou je schopné přenášet napětí větší, než kohezní síly. Podobně plyny rozpuštěné v kapalině také nesnižují její pevnost.

Předpokládá se, že kavitační jádra tvořená volnými nerozpuštěnými plyny jsou v mikroskopických štěrbinách nebo trhlinách na povrchu obtékaných stěn nebo na mikroskopických částčkách obsažených v kapalině.

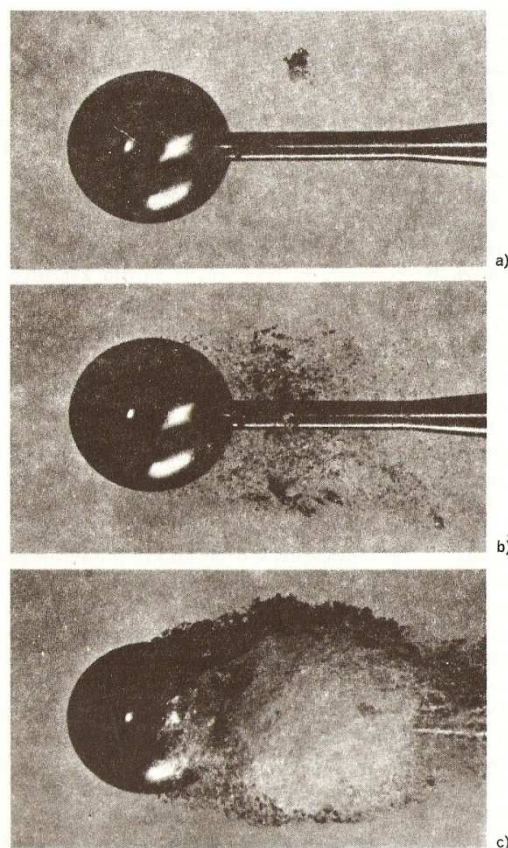
Kavitační bubliny vznikají z kavitačního jádra. Za určitých podmínek kapaliny dosáhne kavitační jádro kritické velikosti, po níž začne růst, až se stává viditelné pouhým okem jako kavitační bublina.

## 2.4 Vývoj a typy kavitací

V kapalině se nachází velké množství kavitačních jader o různé počáteční velikosti. Při dosažení určitého kavitačního tlaku budou jádra stejné velikosti explodovat současně. Aby kavitační jádro dorostlo do kritické velikosti, potřebuje určitý čas. Podle různých zdrojů se uvádí různé časy. Pro bublinu o velikosti 0,025 jde o čas od 10  $\mu$ s po 30 až 100 ms. Znamená to, že při určité délce oblasti s kavitačním tlakem proběhnou některá kavitační jádra, aniž by dorostla do kritické velikosti a explodovala. Okamžik explozivního růstu kavitační bubliny se nazývá *počátek kavitace*.

Shluk kavitačních bublin tvoří v kapalině *kavitační oblast*, která je ohraničena buď úplně kapalinou nebo kapalinou a pevnou stěnou. Kavitate vyvinutá do takového stupně, že kavitační oblast ovlivňuje proudové poměry v hydraulickém stroji či zařízení do té míry, že jsou ovlivněny též jejich energetické parametry (průtok, účinnost a podobně) se nazývá *plně*

*vyvinutá kavitace*. Kavitace, jejíž stupeň vývoje je mezi počátkem kavitace a plně vyvinutou kavitací se označuje jako *částečně vyvinutá kavitace*.



Obr. 4: a) počátek kavitace; b) částečně vyvinutá kavitace; c) plně vyvinutá kavitace

Kavitační oblast mívá různé tvary a jejich název se odvozuje podle charakteristického tvaru či místa výskytu. *Oblast kapsovitá* se vytváří za obtékanými tělesy, *plošná oblast* se přimyká k povrchu tělesa, *vláknovitá* se projevuje sledem kavitačních bublin ve tvaru vlákna (např. za vrtulovým kolem), *spárová* pak vzniká na výstupu ze spár hydraulických strojů.

Podle chování kavitační oblasti ji lze označit jako *přemísťující*, jestliže se pohybuje ve směru proudu. V této oblasti se nacházejí obvykle jednotlivé kavitační bubliny, nebo jen malý počet. Bubliny se na své dráze vyvíjejí a zanikají. Oblast je kvazistacionární, i když se při pozorování prostým okem jeví jako stacionární. Kavitační oblast vznikající u obtékaného tělesa v místech utrženého proudění lze označit jako *připojenou*, *nepřemísťující*. Nepřemísťuje se opět jen ve smyslu kvazistacionárním, protože uvnitř oblasti probíhá cyklický proces složený z růstu oblasti, zpětného naplňování oblasti kapalinou (proti směru hlavního proudu) a utržení oblasti s jejím odplavením. Tento proces se stále opakuje. Jestliže



kavitační oblast stále roste, takže její uzavření je až za obtékaným tělesem, označuje se jako *superkavitace*.



Obr. 5: Superkavitace

Nejčastější příčinou vzniku kavitace v hydraulických strojích je dynamický pokles tlaku při průchodu kanály nebo při obtékání profilů. Takto vzniklá kavitace se označuje jako *hydrodynamická*.

K hydrodynamické kavitaci také náleží kavitace *vírová*. Tou se rozumí kavitace, která vzniká v jádře víru nacházejícího se v kapalině, jako důsledek hydrodynamického snížení tlaku v porovnání s poměry v obklopující kapalině. Vzniká za obtékanými tělesy, profily, nerovnostmi (výstupky) za podmínky

$$p_{kav} > p_{vír} = p_k - \frac{\rho v_{vír}^2}{2} \quad (2.1)$$

kde  $v_{vír} = \frac{rv}{r_{vír}}$ ,  $p_k$  je tlak v okolní kapalině,  $v$  je rychlost na okraji víru o poloměru  $r$ ,  $v_{vír}$  je rychlost v jádře víru na poloměru  $r_{vír}$ .

Kavitace může také vzniknout v klidné, neproudící kapalině. Může se vyvolat zavedením vysokofrekvenční tlakové vlny velké amplitudy do kapaliny. Tlakové vlny se vyvolají kmitáním pevného tělesa ponořeného v kapalině. Vyvolané tlakové akustické vlny rozkmitají kapalinu a jako důsledek změn jejich amplitudy vznikají a zanikají kavitační bubliny. Takto záměrně vyvinutá kavitace se nazývá *akustická*.

Kavitace v klidné vodě se může také vyvolat kmitáním pevných povrchů stěn v kapalině, které vybudí tlakovou vlnu. Kmitá-li pevný povrch, může se při vzdalování povrchu od kapaliny tlak v kapalině snížit až na kavitační tlak (tlak nasycených par), takže vzniknou kavitační bubliny. Velikost poklesu tlaku závisí zejména na zrychlení povrchu. Tento druh kavitace se označuje jako *vibrační*, na rozdíl od záměrně vyvolané kavitace akustické.

## 2.5 Kavitační parametr

Při hodnocení kavitace a jejího vzniku v hydraulických zařízeních nebo strojích nelze vystačit jen s členěním kavitace tak, jak bylo uvedeno v předchozím textu. Je nutno posuzovat kavitaci kvantitativně. Tomuto účelu slouží například kavitační parametr  $K$ .

$$K = \frac{2(p_1 - p_n)}{\rho v_{\max}^2} \quad (2.2)$$

kde  $v_{\max}$  je maximální rychlost kapaliny (např. v zúženém místě trubice),  $p_n$  je tlak nasycených par,  $p_1$  je tlak na vstupu.

## 2.6 Využití kavitace [2]

Kavitace bývá obecně vnímána jako jev negativní, nežádoucí. V současné době však existuje mnoho oblastí, kde se destruktivních účinků kavitace s úspěchem využívá. Tato tematika byla podrobně zpracována v mojí bakalářské práci, proto budou nyní zmíněny jen základy.

### 2.6.1 Ruská torpéda

Zbraňový systém nazývaný VA-111 Škval (Vichřice) lze stručně charakterizovat jako raketou poháněné torpédo. Škval je unikátní zbraní, protože dosahuje rychlosti více než  $100 \text{ ms}^{-1}$  (první zprávy hovořily dokonce o rychlosti zvuku). Je toho docíleno kombinací raketového motoru a efektu superkavitace, díky čemuž je povrch ponořeného tělesa obtékán plynem, který vytváří kolem tělesa jakousi "bublinu" s minimálním odporem.

### 2.6.2 Stomatologie

Jev kavitace se využívá i v medicíně, a to například ve stomatologii na odstraňování zubního kamene. Ve vhodném mediu ultrazvukové vlnění způsobuje tvorbu mikrobublin, které obsahují velké množství kinetické energie. Mikrobubliny pronikají mezi povrch zubů a nánosy zubního kamene a eliminují jej.

### 2.6.3 Desinfekce

Využívá se při ní také akustická kavitace, kdy při ponoření lékařských nástrojů do roztoku isopropylalkoholu uvolněná energie při zániku bublinek trhá buněčné stěny mikrobů a tím je zabíjí. Účinnost této metody výrazně naroste s tlakem, takže za vhodných podmínek nepřežijí ani bakteriální spóry. Některé komplexní lékařské nástroje, např. endoskop, jsou na teplo citlivé, avšak jejich dezinfekce je nezbytná. Vzhledem k tomu, že nová metoda je rychlejší než dosud používané, mohla by se uplatnit zvláště u nich. Není vyloučeno ani využití při dezinfekci vody, pasterizaci potravin či úpravě odpadních vod.



### 2.6.4 Desintegrace vláknitých struktur v aktivovaném kalu

Jako perspektivní způsoby desintegrace vláknitých struktur v aktivovaném kalu byly vyhodnoceny metody mechanické, zejména metody na principu hydrodynamické kavitace a desintegrace ultrazvukem. V laboratorním měřítku byl aktivovaný kal desintegrovan mechanickým a ultrazvukovým desintegrátorem a poté provedeno hodnocení sedimentačních vlastností kalu.

### 2.6.5 Potravinářský průmysl

Využívá se zde opět akustické kavitace, a to především k homogenizaci mléka, výrobě sterilovaných nekyselých potravin nebo pro výrobu ultračisté vody bez použití chemických desinfekčních prostředků.

### 2.6.6 Kosmetika

Komerčně zřejmě odvětví, kde se kavitace využívá nejčastěji. Moderní se stala tzv. neinvazivní liposukce využívající akustické (ultrazvukové) kavitace na rozrušování podkožního tuku. Dalším využitím je například kavitační peeling na regeneraci pokožky.

## 3. SINICE (ODDĚLENÍ CYANOBACTERIA) [3], [4], [5]

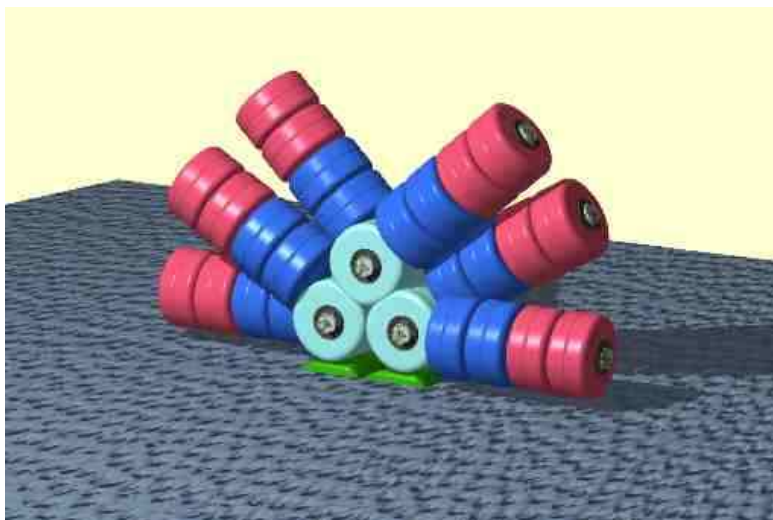
Sinice jsou velmi drobné a velmi jednoduché autotrofní prokaryotické organismy. Jsou evolučně nesmírně staré a jsou schopné žít téměř ve všech biotopech na zemské kouli. V současné chvíli je jich popsáno několik tisíc druhů v zhruba 200 rodech, ale toto číslo jistě ještě velmi vzroste. Český název sinice pochází z termínu “sinný” = modrý. To je v podstatě překlad “latinského” názvu, z řeckého cyanos = modrý.

### 3. 1 Stavba buněk

Je velmi jednoduchá – nemají jako prokaryota žádné jádro ani mitochondrie, Golgiho aparát, endoplasmatické retikulum, vakuoly atd. Nejnapadnějším útvarem uvnitř buňky sinice jsou thylakoidy - ploché váčky s fotosyntetickým aparátem. V membráně thylakoidu jsou obsaženy chlorofyl *a*,  $\alpha$ - i  $\beta$ - karoten a xanthofyly.

Na povrchu thylakoidálního váčku se nachází tzv. fykobilizómy. Jsou to drobné útvary (struktura viz Obr. 6), které obsahují specifická barviva, zvaná fykobiliny (fykobiliproteiny). Tyto fykobiliny jsou 3 – dva z nich jsou modré pigmenty (c-fykocyanin a allofykocyanin) a jeden je červený (c-fykoerythrin). Tyto pigmenty plní funkci světlosběrné antény. Značná

citlivost tohoto typu světlosběrné antény umožňuje m.j. fotosyntézu sinic při velmi nízké hladině osvětlení – hluboko pod hladinou vody, v půdě, uvnitř kamenů, v jeskyních atd.



Obr. 6: Struktura fycobilizómu

Genetickou informaci sinic nese složitě vinutá kruhová molekula ( $\gamma$ ) DNA. Jako u všech prokaryot, není DNA oddělena od ostatní protoplasmy žádnou jadernou membránou. Buňčná stěna sinic je dost pevná, vrstevnatá a vykazuje gramnegativní reakci. V buňce jsou přítomny ještě karboxyzómy, což jsou drobná tělíska ve tvaru mnohostěnu, pozorovatelná v transmisním elektronovém mikroskopu (TEM). Obsahují enzym RUBISCO, který je mimo jiné zodpovědný za fixaci  $\text{CO}_2$  v Calvinově cyklu. Karboxyzómy jsou analogií pyrenoidů vyskytujících se u eukaryot. Zásobní látkou je sinicový škrob.

### 3.2 Struktury u sinic

Sinice mají několik struktur, které jsou specifické právě jen pro ně. Jsou to:

#### 1. Aerotopy

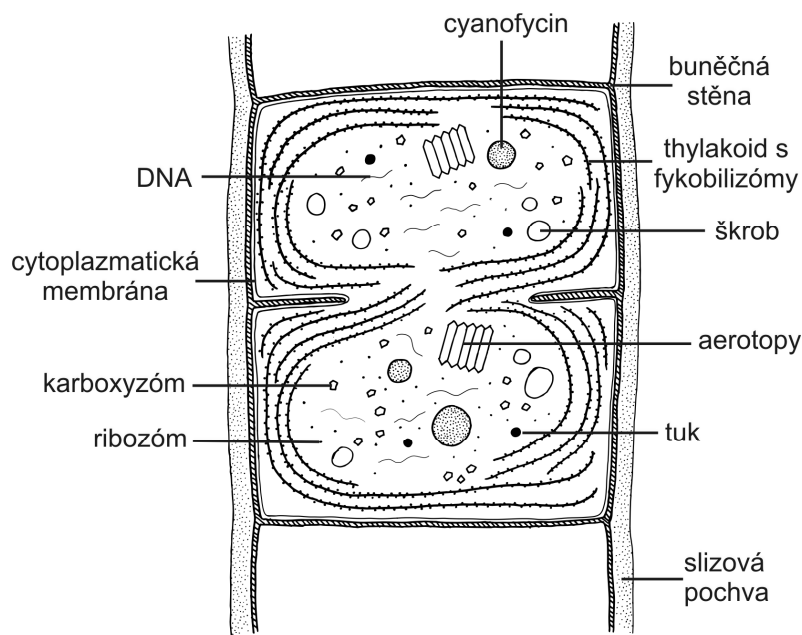
Jedná se o válcovité struktury ve tvaru mnohostěnu. V buňce je jich většinou přítomno mnoho. Na příčném průřezu připomínají včelí plást. Jejich stěna je složená z glykoproteinů a je propustná pro všechny plyny rozpuštěné ve vodě. Směs těchto plynů uvnitř aerotopů pak sinice nadlehčuje a umožňuje jim snadno splývat ve vodním sloupci. Tyto organely jsou jedinou strukturou v živých buňkách, která je naplněná plynem. Sinice si je mohou tvořit a dezorganizovat v závislosti na abiotických faktorech prostředí a tím regulovat svoji polohu ve vodním sloupci.

## 2. Heterocyty

Jsou to tlustostěnné buňky, větší než jsou buňky vegetativní. V optickém mikroskopu se jejich obsah jeví jako prázdný, ale fotosystém I (tj. ten, co nedělá kyslík) v nich funguje. Vznikají z vegetativních buněk. Za účasti nitrogenázy se v nich fixuje vzdušný dusík, vzniká amoniak, ten je vázaný jako glutamin a v této formě je transportován do sousedních buněk.

## 3. Akinety

Vznikají z jedné nebo více vegetativních buněk a bývají ještě větší než heterocyty. Slouží k přežití nepříznivých podmínek.



Obr. 7: Stavba a struktura buňky sinice

## 3.3 Ekologie

Žijí téměř všude – ve sladkovodním i mořském planktonu, v nárostech, v půdě, na smáčených stěnách, uvnitř kamenů... Typické je pro ně osazování všech extrémních biotopů, s výjimkou extrémně kyselých lokalit. Pro planktonní druhy je typická schopnost vytvářet při nadbytku živin tzv. vodní květ. Mnohé druhy jsou navíc jedovaté, takže způsobují značné vodohospodářské problémy.

Sinice často vstupují do velmi provázaných symbiotických vztahů, tvoří fykobiont (rostlinnou složku) lišejníků, vstupují do symbiózy i s jätrovkami (*Blasia*), hlevíky (*Anthoceros*), kapradinami (*Azolla*), nahosemennými (např. různými cykasy) atd. Ze sinic procesem zvaným primární endosymbióza vznikly rovněž první chloroplasty.

Sinice jsou i výrazný geologický činitel. Pro naše území má největší význam tvorba travertinu. Jde o to, že srážení rozpuštěných solí (vápenatých a železitých) z minerálních vod závisí na teplotě a koncentraci  $\text{CO}_2$ . Sinice jsou schopné v těchto minerálních vodách žít. Jejich fotosyntézou se ve vodě sníží koncentrace  $\text{CO}_2$ , soli se vysráží a vzniká hornina travertin.

### 3.4 Vodní květ

Sinice jsou častým původcem jevu známého jako vodní květ, při němž dochází k přemnožení některých vodních fotosyntetizujících organismů nad určitou míru. Problém představuje především vodní květ v sladkovodních nádržích, které jsou využívány jako zdroj pitné vody a k rekreaci. Při rozvoji vodního květu jsou ve větším množství do vody uvolňovány cyanotoxiny. Rizikové pro rozvoj sinicového vodního květu jsou zejména vodní plochy s vyšší hodnotou pH, vyšší teplotou vody a vysokým obsahem živin (především fosforu). Mnohdy vodní květ způsobuje nadměrné vypouštění živin do vody, tedy tzv. eutrofizace vod.



Obr. 8: Vodní květ

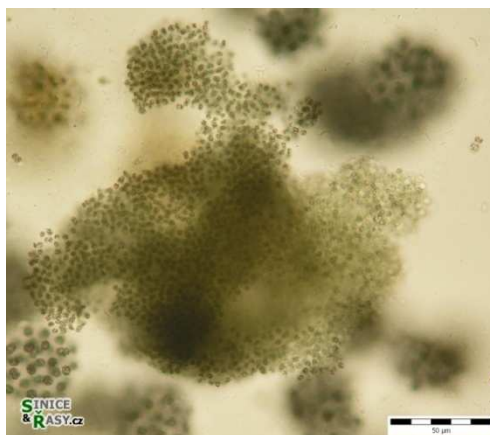
### 3.5 Zástupci

Z obrovského množství zástupců vybírám rod *Microcystis* z řádu Chroococcales, na kterém byl prováděn úspěšný experiment, viz kapitola 5.

#### 3.5.1 *Microcystis*

Výlučně planktonní rod, jsou to kulovité buňky v nepravidelných v koloniích, s nápadně viditelnými aerotopy. Nejčastější součást vodních květů. Ve 20. letech byla v Jihoafrické republice u druhu *M. toxica* poprvé popsána toxicita sinic (ovšem už Kützing v 19. století pojmenoval jeden z druhů *M. ichthyoblabe* (ichthyoblabe = rybí mor), tudíž o toxicitě této sinice pro ryby už věděl). Nejčastější zástupci u nás jsou *M. aeruginosa*, která má

typické prolamované kolonie a úzký lem kolem okraje kolonie a *M. wesenbergii*, která má pevný sliz a “střevovité” části kolonie. *M. ichthyoblabe* má nepravidelné kolonie, často subkolonie a velmi malé buňky.



Obr. 9: *Microcystis ichthyoblabe*, rybník Krajina, Třeboňsko



Obr. 10: *Microcystis flos-aque*

### 3.6 Význam pro člověka

Sinice mají do jisté míry nezanedbatelný hospodářský význam. Kromě negativního vlivu sinic ve vodě a vodního květu na ekonomiku a lidské zdraví, mají sinice mnoho kladných stránek. Především obsahují v sušině vysoké koncentrace proteinů (až 70 %), mnohem více než například zelené řasy. Sinice rodu *Arthrospira* (známá pod komerčním názvem *Spirulina*) se pěstuje v mnoha zemích na výrobu vitamínových tablet. Obsahuje mimo jiné ve velké míře vitamíny (vitamín B<sub>12</sub>) a karoteny. Především v nezápadních civilizacích byly sinice dříve nedílnou součástí jídelníčku a v některých případech (Čad) se k přípravě pokrmů užívají dosud.

Některé pigmenty sinic (fykobiliny), zejména fykocyanin, se používají jako netoxická barviva, díky nimž se pozorují metabolické procesy probíhající v buňkách různých

organismů. Jiné látky obsažené v sinicích by se mohly do budoucna stát výchozí surovinou pro výrobu protirakovinných a protizánětlivých léků, antibiotik a antivirotik. Kosmické agentury NASA a ESA uvažují o zapojení sinic do stravy kosmonautů na budoucích vesmírných misích na velkou vzdálenost, některé sinice jsou schopné růst i na měsíční půdě. Uvažuje se o užití sinic pro výrobu biopaliv.

Tato práce se však zabývá právě negativním působením sinic ve vodě, respektive snahou a možnostmi jejich hubení pomocí působení hydrodynamické kavitace.

### 3.7 Fyzikální princip hubení sinic působením hydrodynamické kavitace

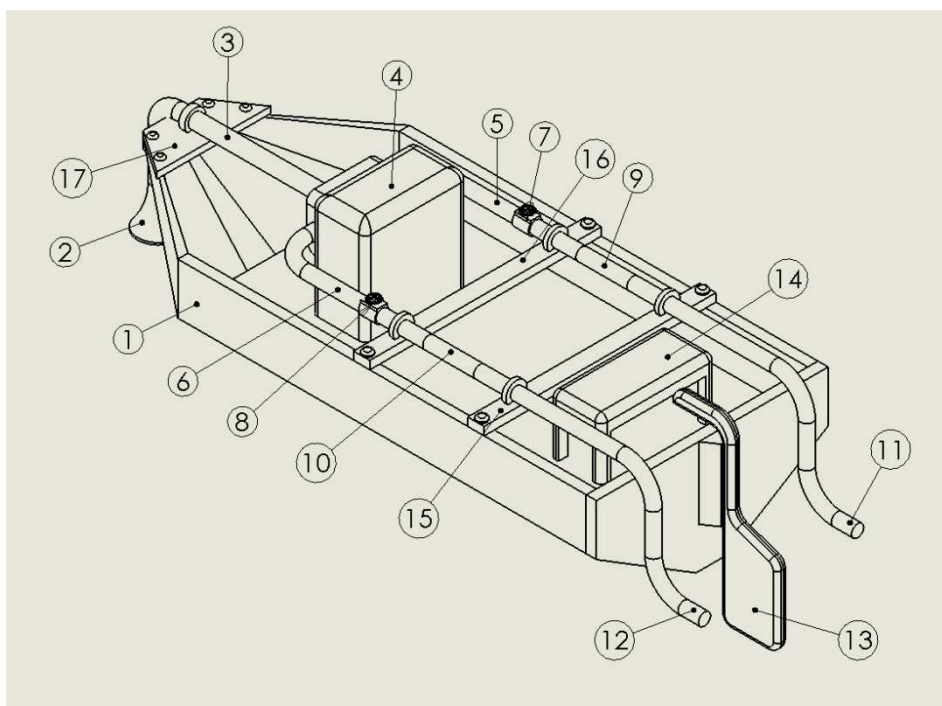
Jak bylo řečeno v kapitole 2, kavitace probíhá rychlostí zvuku, je provázená lokálním nárůstem teploty a destruktivními účinky. Hlavní princip hubení sinic pomocí kavitace spočívá ve vystavení sinic těmto destruktivním účinkům, čímž dojde k popraskání aerotopů (plynových měchýřků, viz Obr. 7) uvnitř sinice a tím k jejímu potopení z hladiny na dno. Dalším efektem je také roztrhání celých kolonií (shluků) sinic na jednotlivé buňky, což má opět za následek jejich pokles na dno. Při delším vystavení sinic kavitaci dochází navíc také k prasknutí samotné buněčné stěny.

K potvrzení této hypotézy došlo pomocí experimentu, viz kapitola 5.2.



## 4. SESTAVENÍ HYDRAULICKÉHO OBVODU NA ŘÍČNÍM ČLUNU

Naší snahou je hubení sinic vyskytujících se v rybnících či přehradách pomocí mobilní kavitační stanice, tedy říčního člunu s nainstalovaným hydraulickým obvodem. Ten byl navržen dle následujícího obrázku:



Obr. 11: Schéma člunu s obvodem

### Hlavní části člunu a hydraulického obvodu:

1- člun, 2- rozšíření na sacím potrubí, 3- sací potrubí čerpadla, 4- hasičské čerpadlo, 5, 6- výtlačné potrubí čerpadla, 7, 8- škrťací ventily, 9, 10- kavitační trubice, 11, 12- výtok kapaliny z obvodu, 13- kormidlo člunu, 14- sedátko pro obsluhu člunu, 15, 16, 17- podpory potrubí

## 4.1 Princip a funkce

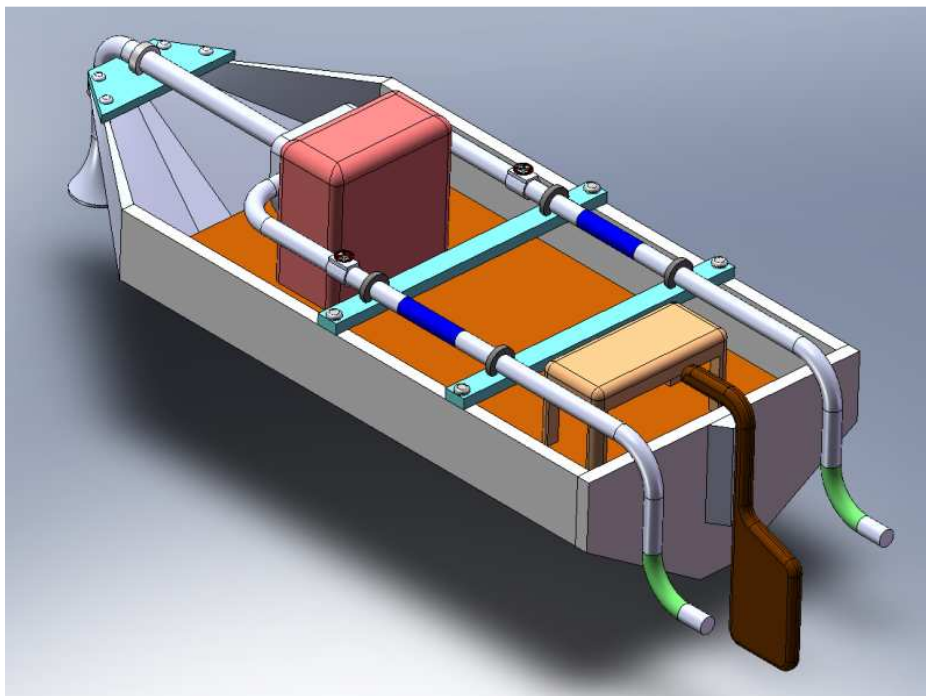
Na člunu je umístěno hasičské čerpadlo (4) poháněné vlastním spalovacím motorem. Toto čerpadlo má jedno sání (3) a dva výtlaky (5) a (6). Loďka bude při svém pohybu po vodě nasávat sacím potrubím s rozšířením (2) vodu z přehrady či rybníka obsahující sinice. V obou větvích výtlačného potrubí je umístěna kavitační trubice, kde bude docházet ke kavitaci a tím k hubení sinic ve vodě obsažených. Takto upravená voda je poté vypouštěna zpět do rybníka.

Pohyb člunu je zajištěn díky reakční síle kapaliny na výtokové potrubí (11) a (12), viz kapitola 4.6.

Pro případnou regulaci průtoku každou větví výtlačného potrubí slouží redukční ventily (7) a (8). Pro zamezení vibrací potrubí jsou na člunu umístěny podpory potrubí (16), (17) a (18).

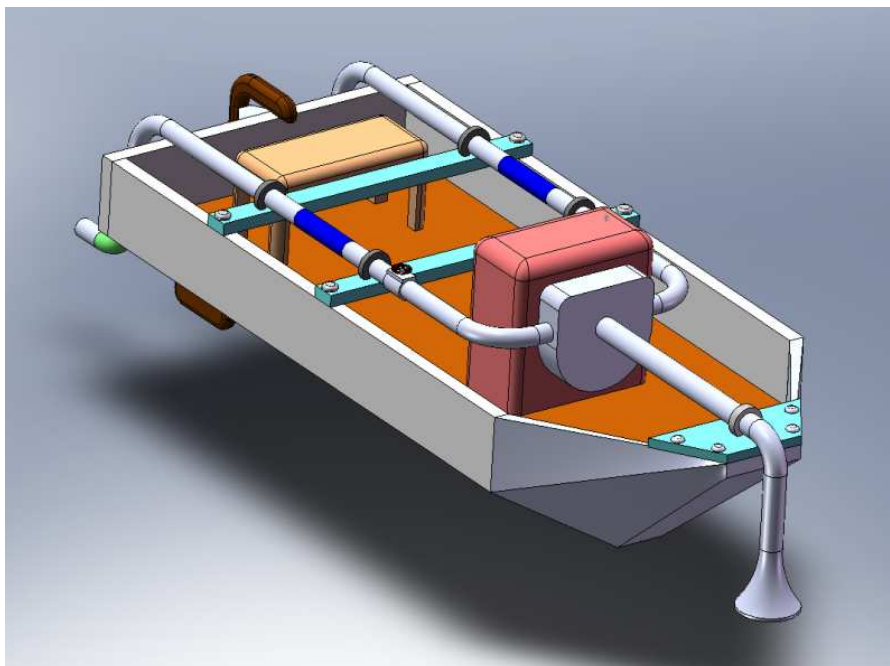
Směr jízdy člunu je řešen buď pomocí kormidla (13) nebo pomocí natáčecích kolen na výtoku z každé z větví (11) a (12), viz kapitola 4.5.

3D model člunu s obvodem:



Obr. 12: Model člunu s obvodem, pohled 1





Obr. 13: Model člunu s obvodem, pohled 2

## 4.2 Kavitační trubice

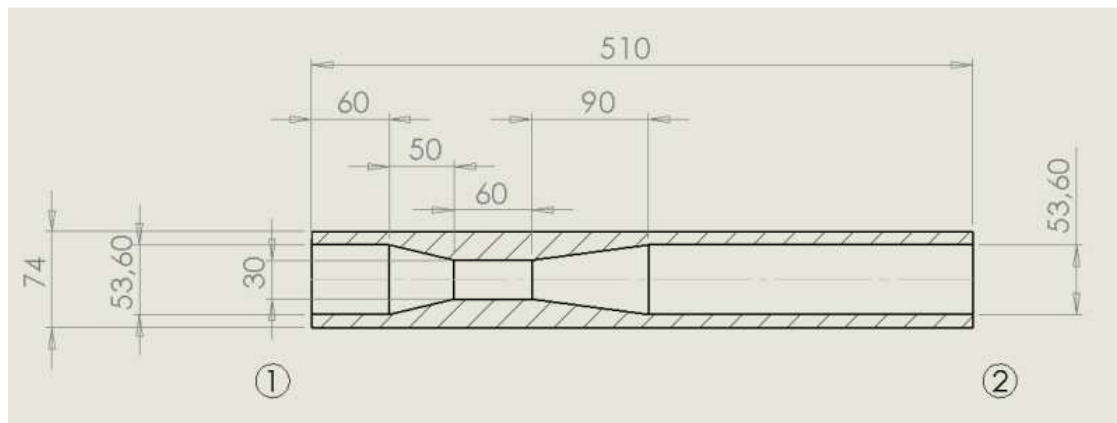
Kavitační trubice je zásadní částí celého obvodu. Dochází v ní hydrodynamické kavitaci vody a tím i k hubení sinic či mikroorganismů.

Kavitační trubice byla vyrobena na základě zkušeností s kavitační trubicí, jež byla použita pro mou bakalářskou práci, viz Obr. 14.



Obr. 14: Původní kavitační trubice (s plně vyvinutou kavitací)

Nová trubice byla upravena tak, aby vyhovovala všem parametrům hydraulického obvodu i hasičského čerpadla, viz Obr. 15 (řez) a Obr. 20 (foto):

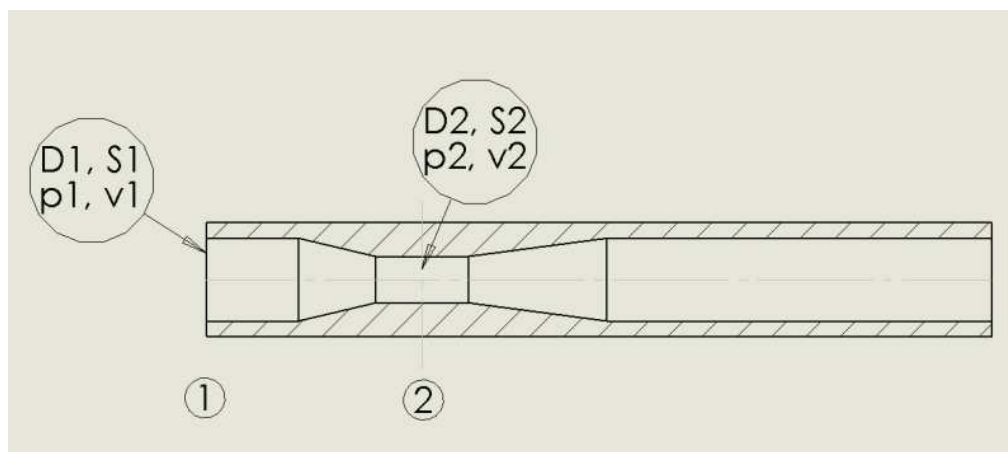


Obr. 15: Kavitační trubice-řez

Místo 1 je vstupní průřez o velikosti 53,6 mm, místo 2 potom průřez výstupní o stejném průměru. V místě zúžení, dlouhém 60 mm, je průřez 30mm. Celková délka trubice je 510 mm.

#### 4.2.1 Důvod vzniku kavitace v trubici

Jak bylo již řečeno dříve, kavitace vzniká díky lokálnímu poklesu tlaku na hodnotu tlaku nasycených par. Tlak v tomto konkrétním případě poklesne díky zúžení vstupního průměru na průměr zúžení trubice.



Obr. 16: Kavitační trubice-řez, 2

Podle zákona zachování hmoty (rovnice kontinuity) platí:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (4.1)$$

$$v_2 = \frac{v_1 S_1}{S_2} \quad (4.2)$$

kde  $v_1$ , resp.  $S_1$  je rychlost, resp. průřez odpovídající místu 1,  $v_2$ , resp.  $S_2$  je rychlost, resp. průřez odpovídající místu 2.

Z rovnice (4.2) tedy plyne, že při stejné rychlosti  $v_1$  a průřezu  $S_1$  a zmenšení průřezu  $S_2$  se rychlost  $v_2$  zvětší. Dále podle zákona zachování energie (Bernoulliho rovnice) platí:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + Y_{z1,2} \quad (4.3)$$

$$p_2 = \rho \cdot \left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) - Y_{z1,2} \quad (4.4)$$

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 + v_2^2) - Y_{z1,2} \quad (4.5)$$

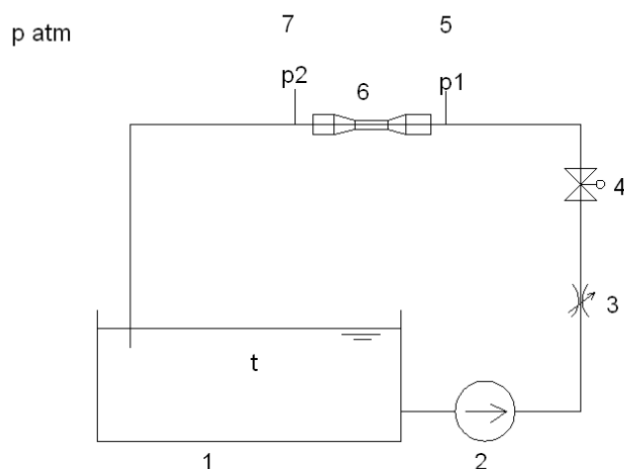
kde  $p_1$  resp.  $p_2$  je tlak odpovídající místu 1 resp. 2,  $\rho$  je hustota vody,  $g$  je gravitační zrychlení a  $h_1$  resp.  $h_2$  je vertikální výška bodu 1 resp. 2 od vztažné roviny a  $Y_{z1,2}$  je ztrátová měrná energie mezi body 1 a 2. Pro náš výpočet platí  $h_1 = h_2$ .

Z rovnice (4.5) tedy plyne, že při konstantním tlaku na vstupu  $p_1$ , hustotě kapaliny a hustotě na vstupu  $v_1$ , poklesne tlak  $p_2$  o hodnotu  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_1^2 + v_2^2) - Y_{z1,2}$ .

### 4.3 Stanovení ztrátového součinitele $\xi$ kavitační trubice

Pro výpočet ztrátové měrné energie v hydraulickém obvodu umístěného na říčním člunu je nutné znát také součinitel místní ztráty  $\xi$  pro danou singularitu- kavitační trubici. Díky tomu, že v trubici probíhá kavitace, tedy dvoufázové proudění kapaliny (vody) a plynu (vzduchu), nelze ztrátový součinitel odečíst například z tabulek, jako je to možné při proudění pouze kapaliny. Proto byl v laboratořích ústavu sestaven speciální obvod pro experimentální změření ztrátového součinitele  $\xi$ , ve kterém byla použita táž trubice, jako v hydraulickém obvodu na říčním člunu.

#### 4.3.1 Obvod pro měření ztrátového součinitele $\xi$



Obr. 17: Schéma obvodu

Samotný obvod se skládal z nádrže s vodou (1), kde byla měřena i teplota vody  $t$ , odstředivého čerpadla (2), indukčního průtokoměru (3), škrtkového ventilu (4), kavitační trubice (6). Před tou byl umístěn tlakový snímač  $p_1$  (5) pro měření tlaku kapaliny na vstupu do trubice, za ní potom tlakový snímač  $p_2$  (7) pro měření tlaku kapaliny na výstupu z trubice. Dále se snímal také tlak atmosférický.

Dále se pro měření využíval frekvenční měnič pro změnu otáček čerpadla a počítač s vlastním měřícím programem a měřicí kartou, na kterém byly vyhodnocovány jednotlivé měřené veličiny.

Následují fotografie sestaveného obvodu i jeho jednotlivých částí.



*Obr 18: Hydraulický obvod*



*Obr. 19: Indukční průtokoměr*

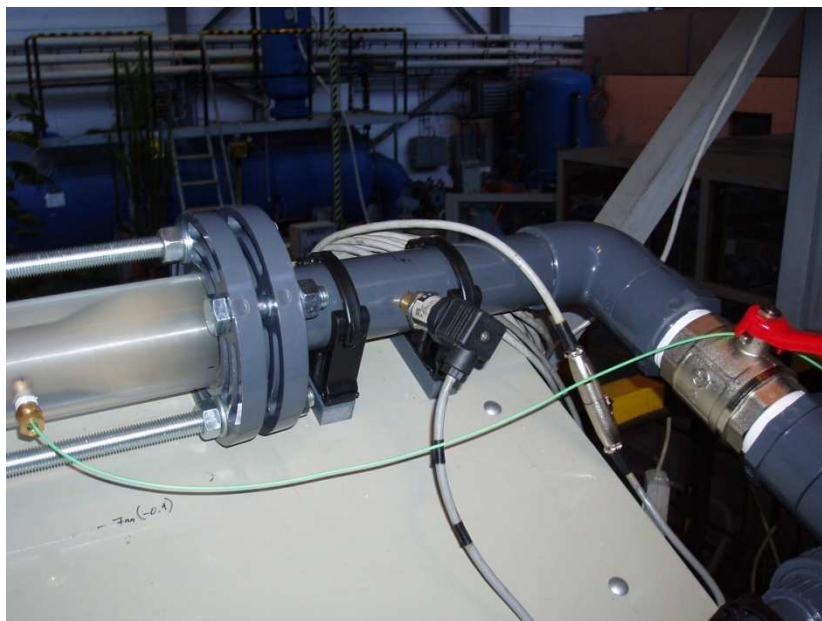


*Obr. 20: Kavitační trubice*

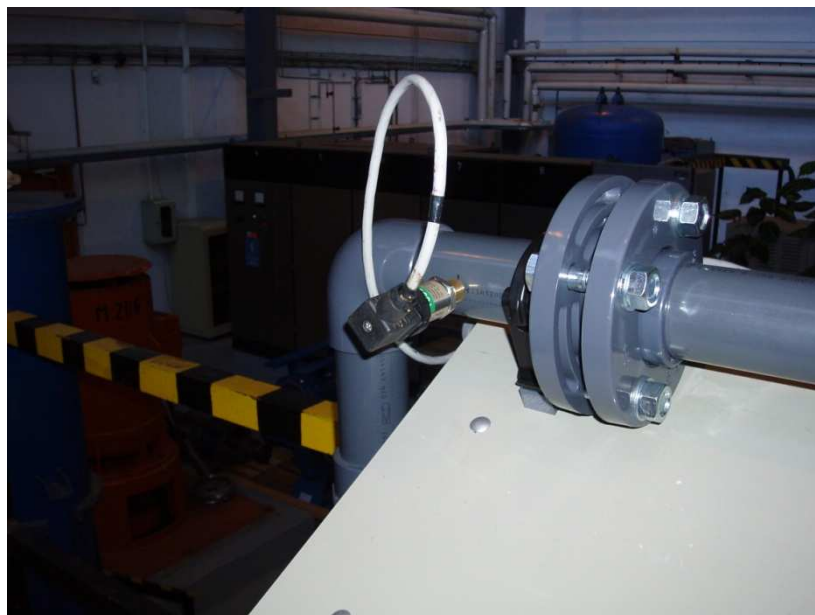


*Obr. 21: Odstředivé čerpadlo*

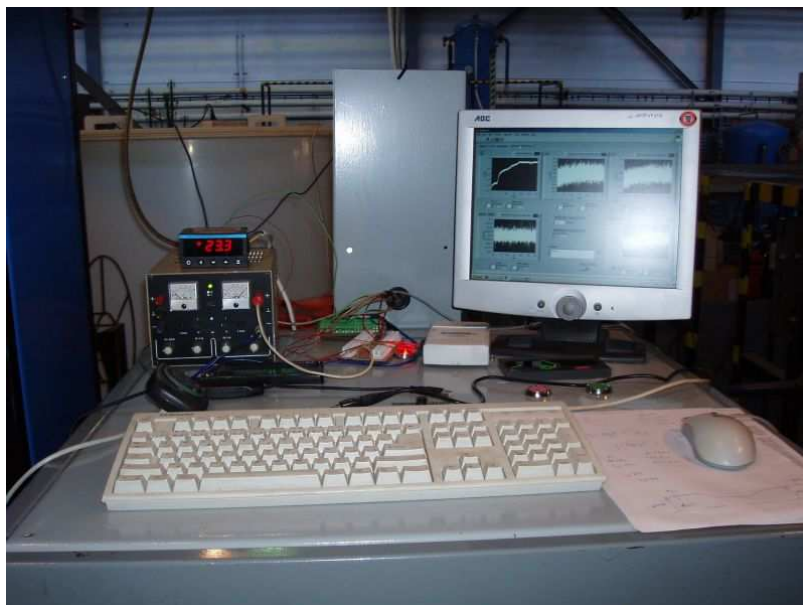




Obr. 22: Tlakový snímač  $p_1$



Obr. 23: Tlakový snímač  $p_2$



Obr. 24: Počítač s měřicí kartou a programem

#### 4.3.2 Postup měření

Z nádrže (1) se pomocí čerpadla (2) čerpala voda do hydraulického obvodu. Pomocí indukčního průtokoměru (3), tlakových snímačů  $p_1$  (5) a  $p_2$  (7) a počítačového softwaru jsme přímo v počítači odečítali a ukládali potřebné měřené veličiny, tedy aktuální průtok  $Q$ , tlak na vstupu do trubice  $p_1$ , tlak na výstupu z trubice  $p_2$  a teplotu vody  $t$  v nádrži.

Měření jsem začínal při počátečním průtoku 5 l/s a postupně jsem zvyšováním otáček čerpadla frekvenčním měničem přidával průtok vždy o 1 l/s až na hodnotu průtoku 14,5 l/s, což byl nejvyšší možný průtok odpovídající nejvyšším otáčkám čerpadla, což bylo 2900 min<sup>-1</sup>. Každému takto naměřenému bodu odpovídaly nové hodnoty tlaků  $p_1$  a  $p_2$  a teploty vody  $t$ . Tyto veličiny byly potřebné pro výpočet ztrátového součinitele  $\zeta$ .

#### 4.3.3 Výpočet

Při výpočtu vycházím z Bernoulliovi rovnice pro skutečnou kapalinu:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + Y_{z1,2} \quad (4.6)$$

kde  $v_1$  je rychlost kapaliny na vstupu do trubice,  $p_1$  tlak kapaliny na vstupu do trubice,  $\rho$  je hustota kapaliny,  $z_1$  vertikální výška místa vstupu do trubice od vztahné roviny,  $v_2$  rychlost na výstupu z trubice,  $p_2$  tlak na výstupu z trubice,  $z_2$  vertikální výška místa výstupu z trubice od vztahné roviny a  $Y_{z1,2}$  je ztrátová měrná energie, která vychází z Weisbachova vztahu:



$$Y_z = \xi_c \frac{v^2}{2} = (\sum \xi_m + \sum \xi_t) \frac{v^2}{2} \quad (4.7)$$

kde  $\xi_c$  je celkový ztrátový součinitel v uvažovaném úseku 1-2, daný součtem místních ztrát  $\sum \xi_m$  a součtem ztrát třením po délce  $\sum \xi_t$ .

Při výpočtu uvažuji celou trysku jako místní ztrátu, tedy zanedbávám délkové ztráty mezi tlakovými snímači  $p_1$  a  $p_2$ . Opět z Weisbachova vztahu vychází pro místní- singulární ztráty:

$$Y_{zm} = \xi \frac{v^2}{2} \quad (4.8)$$

kde  $\xi$  je součinitel místní ztráty pro kavitační trubici a  $v$  je střední rychlost kapaliny v trubici.

Budu-li uvažovat vertikální výšky vstupu a výstupu trubice  $z_1$  a  $z_2$  stejné, mohu psát výsledný vztah pro výpočet ztrátového součinitele  $\xi$  v kavitační trubici:

$$\xi = \frac{2(p_1 - p_2)}{v^2 \rho} \quad (4.9)$$

Rychlost  $v$  kapaliny v kavitační trubici lze vyjádřit vztahem

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (4.10)$$

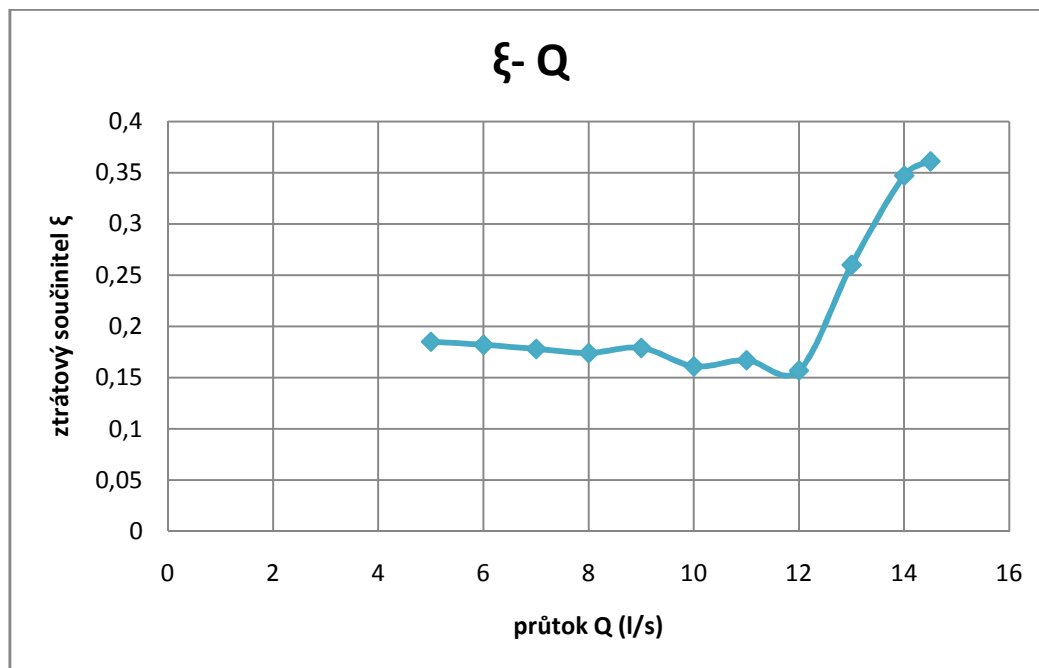
kde  $d$  je průměr zúžení v trubici, v našem případě  $d = 30\text{mm}$ .

Hodnoty součinitele  $\xi$  vypočítané dle vztahu (4.9) pro jednotlivé průtoky:

Tabulka 1: Hodnoty ztrátového součinitele  $\xi$  v závislosti na průtoku:

Q (l/s)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14,5
$\xi$ (1)	0,185	0,182	0,178	0,174	0,179	0,161	0,167	0,157	0,26	0,347	0,361

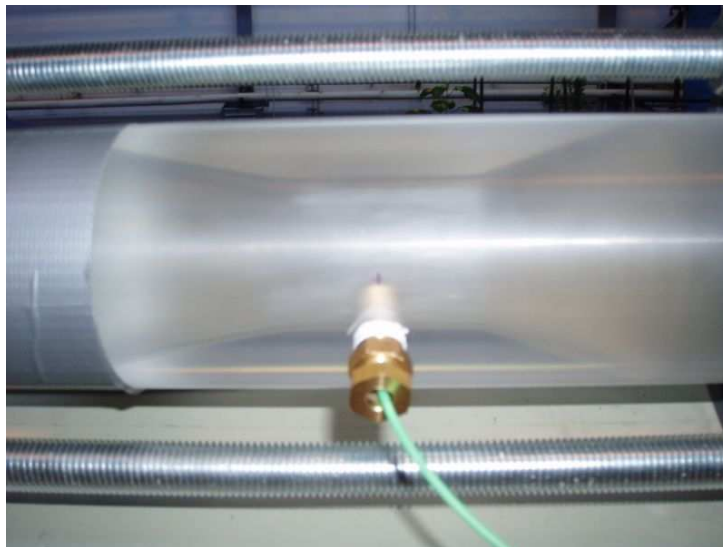
Z těchto hodnot byl vyhodnocen graf:



Obr. 25: Závislost ztrátového součinitele na průtoku

Při měření v laboratoři se kavitace v trubici začala objevovat až při průtoku  $12 \text{ ls}^{-1}$  (viz obr. 26). Stejný jev vidíme i na grafu, tedy že ztrátový součinitel je při nižších průtocích zhruba konstantní a závislost začíná růst až od hodnoty  $12 \text{ ls}^{-1}$ , tedy od hodnoty průtoku, při kterém se v zúžení trubice začala vytvářet kavitace. Nejvyšší hodnotu ztrátového součinitele jsme tedy naměřili samozřejmě při nejvyšší hodnotě průtoku, tj.  $14,5 \text{ ls}^{-1}$ , což je i hodnota průtoku pracovního bodu hasičského čerpadla, které bylo navrženo pro zapojení do hydraulického obvodu na říční člun.

Tedy námi experimentálně zjištěná hodnota ztrátového součinitele  $\xi$  pro daný průtok  $14,5 \text{ ls}^{-1}$  a danou kavitační trubicí s průřezem zúžení  $d = 30 \text{ mm}$  je  $\xi = 0,361$ .



Obr 26: Začátek kavitace při  $Q=12$  l/s



Obr. 27: Kavitace při max.  $Q=14,5$  l/s

#### 4.3.4 Použitá měřicí technika

**SPa** – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 160 kPa (A), přesnost  $\pm 0,25\%$ , proudový výstup 0–20 mA, v.č. 11 496 11 97 (atmosferický tlak)

**SP1** – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 600 kPa (A), přesnost  $\pm 0,25\%$ , proudový výstup 0–20 mA, v.č. 114271197 (tlak před tryskou)

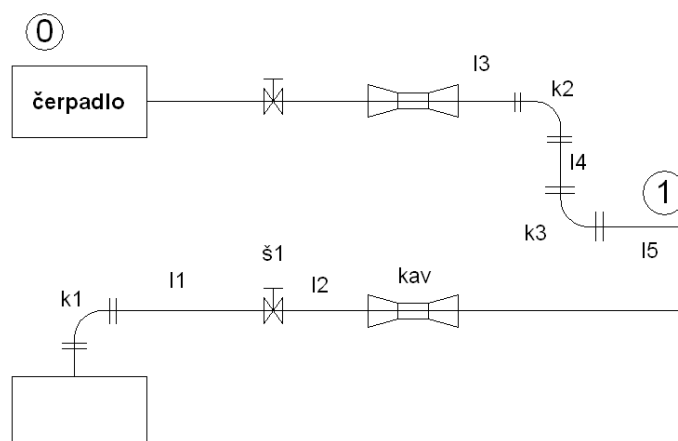
- SP2** – snímač tlaku DMP 331, výrobce BD SENZORS s.r.o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 250 kPa (A), přesnost  $\pm 0,25\%$ , proudový výstup 0–20 mA, v.č. 114271196 (tlak za tryskou)
- SP3** – snímač tlaku piezoelektrický typ 701A, výrobce KISTLER, měřicí rozsah 250 bar, přesnost  $\pm 0,25\%$ , nábojový výstup pC/bar, v.č. 1807105
- NZ** – nábojový zesilovač KISTLER typ 5007, napěťový výstup 0-10V.
- SQ** – indukční průtokoměr ELA BRNO, typ MQCI 99-C DN50, měřicí rozsah 0-20 l/s, přesnost  $\pm 0,5\%$  z rozsahu, proudový výstup 4-20 mA, v.č. A95 1222.
- ST** – snímač teploty HSO-502 1A2L, výr. HIT Uherské Hradiště, rozsah  $(0-50)^{\circ}\text{C}$ , přesnost  $\pm 0,1\%$  z rozsahu, výstup  $(4-20)$  mA, výrobní číslo LA 338
- SZ** – stejnosměrný stabilizovaný zdroj TESLA BK 123,  $U_N=0-20$  V, inv.č. 3340202767.
- PC** – Intel Pentium DualCore E6300, 4GB RAM s měřicí kartou NI USB-6216 a NI PCIe-6351
- FM** – frekvenční měnič Control Techniques SK 2404, 15kW, v.č. 4229637001
- PČ** – čerpadlo LOWARA, FHE-40-200/75P, inv.č. 1000185253

Měření bylo prováděno s využitím vlastního měřicího programu podporovaného v prostředí LabVIEW 2009, licencovaného na VUT v Brně.

Frekvence vzorkování: 400 kHz a 1kHz, doba měření : 0,4s a 30s.

#### 4.4 Postup výpočtu ztrát hydraulického obvodu na říčním člunu

Při výpočtu hydraulických ztrát v obvodu vycházím z následujícího schématu tratě:



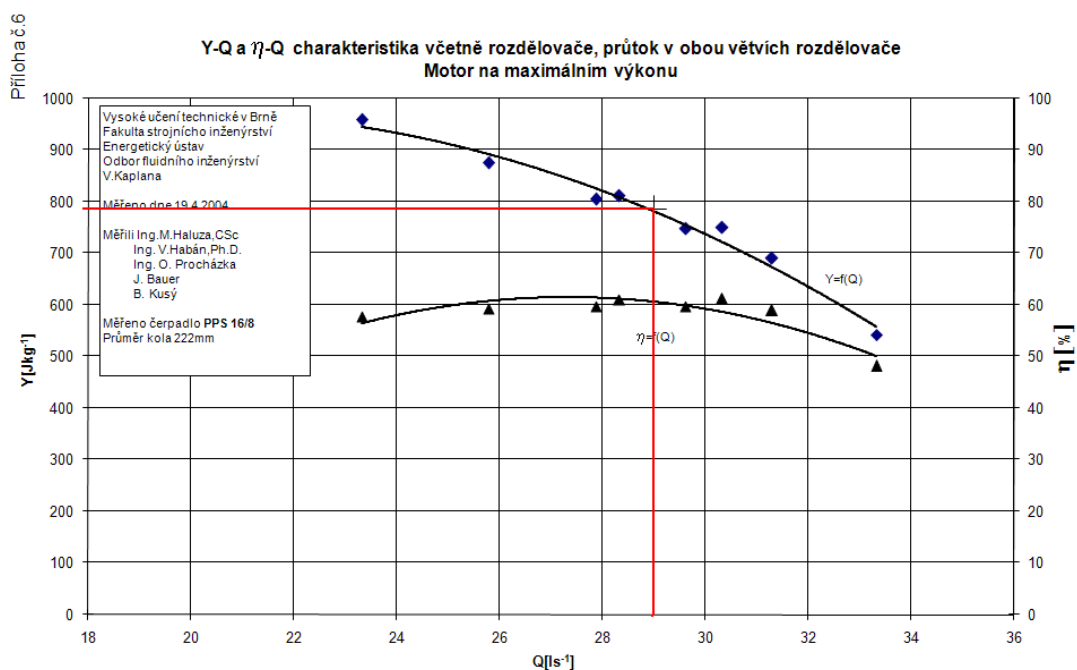
Obr. 28: Schéma tratě pro výpočet ztrát

Do tohoto obvodu bylo zvoleno hasičské čerpadlo KOMFI, PPS 16/8, průměr kola 222 mm.



Obr. 29: Hasičské čerpadlo KOMFI

Pro toto čerpadlo byly naměřeny průtoková a účinnostní charakteristika, viz následující graf:



Obr.30: Y-Q a  $\eta$ -Q charakteristika

Zvolenému pracovnímu bodu čerpadla odpovídají tyto hodnoty:

$Q_0 = 29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , což je průtok dodávaný čerpadlem do obou větví, tedy v každé větvi je průtok poloviční, tj.  $14,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

$Y_0 = 785 \text{ J kg}^{-1}$ , což je měrná energie čerpadla.

$p_0 = 850 \text{ kPa}$  je tlak na výtlaku z čerpadla

$D_0 = 80 \text{ mm}$  je průměr výtlačného hrdla čerpadla

Indexy „0“ korespondují s označením čerpadla jako bodu „0“ v Obr. 28.

Při výpočtu vycházíme ze vztahu pro měrnou energii, který vychází z Bernoulliho rovnice:

$$Y_0 = Y_1 + Y_{z0,1} \quad (4.11)$$

$$Y_0 = \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} - gh + Y_{z0,1} \quad (4.12)$$

$$Y_{z0,1} = \frac{v_0^2}{2} + \left( \xi_{k1} + \xi_s + \xi_{kav} + \xi_{k2} + \xi_{k3} + \lambda \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{D_2} + 1 \right) \quad (4.13)$$

kde  $Y_1$  je měrná energie v bodě 1 (tedy na výtoku z obvodu, viz Obr. 28),  $v_1$  a  $p_1$  je rychlost a tlak v bodě 1,  $Y_{z0,1}$  je ztrátová měrná energie mezi body 0 a 1, počítaná dle Weisbachova vztahu. Hodnota 1 na konci vztahu (4.13) odpovídá Bordově (výtokové) ztrátě.

Výpočet rychlosti kapaliny na výtlaku z čerpadla:

$$v = \frac{Q_0}{S_0} = \frac{4Q_0}{\pi D_0^2} = 2,88 \text{ m s}^{-1} \quad (4.14)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v D_0}{\nu} = 230400 \quad (4.15)$$

kde  $\nu$  je součinitel kinematické viskozity. Reynoldsovo číslo je větší než kritické Reynoldsovo číslo  $Re_k = 2,32 \cdot 10^3$ , jedná se tedy o turbulentní proudění.

Drsnost potrubí  $k$  volím  $k = 0,1 \text{ mm}$ , potom výpočet pro relativní drsnost:

$$k_r = \frac{k}{D_h} = 0,00125 \quad (4.16)$$

kde  $D_h$  je hydraulický průměr, pro kruhový průřez potrubí  $D_h = D_0$ . Z kritérijního diagramu určíme 2. režim turbulentního proudění.

Tedy výpočet koeficientu tření  $\lambda$  pro turbulentní proudění dle Al'tšula:

$$\lambda = \left[ -1,8 \log \left( \frac{k_r}{10} + \frac{7}{Re} \right) \right]^{-2} = 0,0213 \quad (4.17)$$

Součinitelé místních odporů:

$\xi_k = 1,26$  pro koleno  $90^\circ$

$\xi_s = 3$  pro uzavírací ventil přímý

$\xi_{kav} = 0,361$  pro kavitační trubici

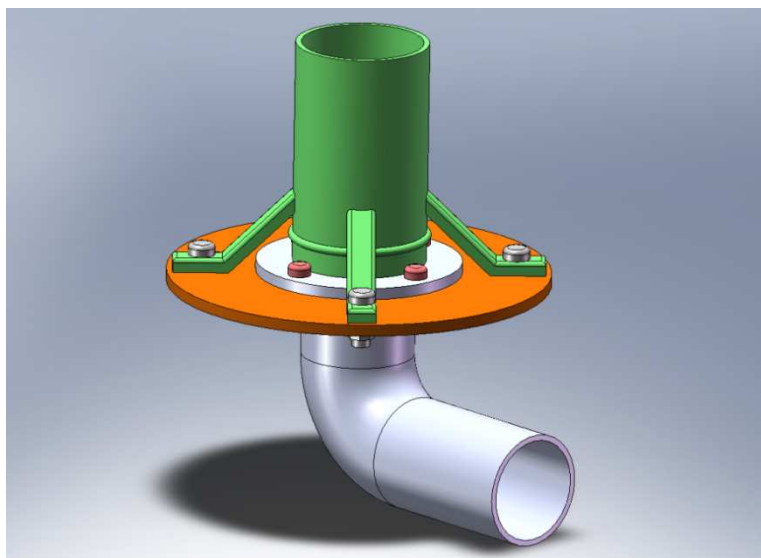
Po dosazení osových délek potrubí  $l_1$  až  $l_5$  do vztahu (4.13) by nám tedy vyšla ztrátová měrná energie  $Y_{z0,1}$  mezi čerpadlem (bod 0) a výtokem kapaliny z hydraulického obvodu na člunu (bod 1). Ze vztahu (4.12) lze poté vypočítat také výtokovou rychlost z hydraulického obvodu  $v_1$ :

$$v_1 = \sqrt{2(Y_0 - \frac{p_1}{\rho} + gh - Y_{z0,1})} \quad (4.18)$$

## 4.5 Konstrukční řešení kolene potrubí pro výtok kapaliny

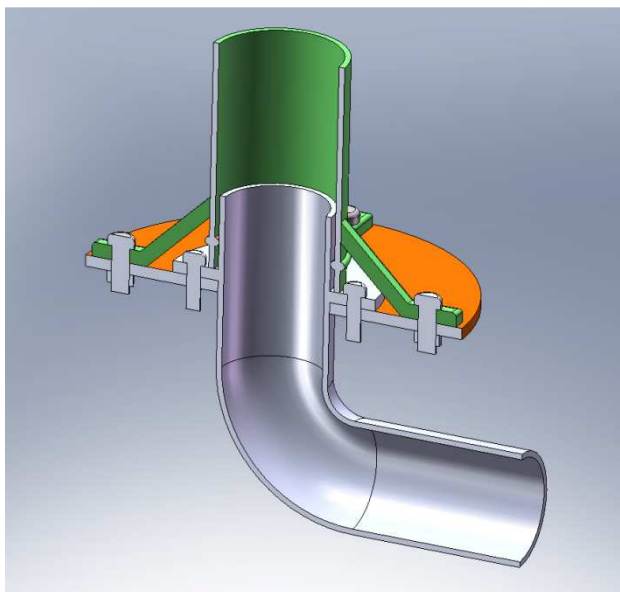
Změna směru jízdy člunu bude možná buď kormidlem nebo pomocí natočení otočného kolene umístěného na konci obvodu, viz pozice 11 a 12 na Obr. 11.

Konstrukčně jsem koleno potrubí řešil následovně:

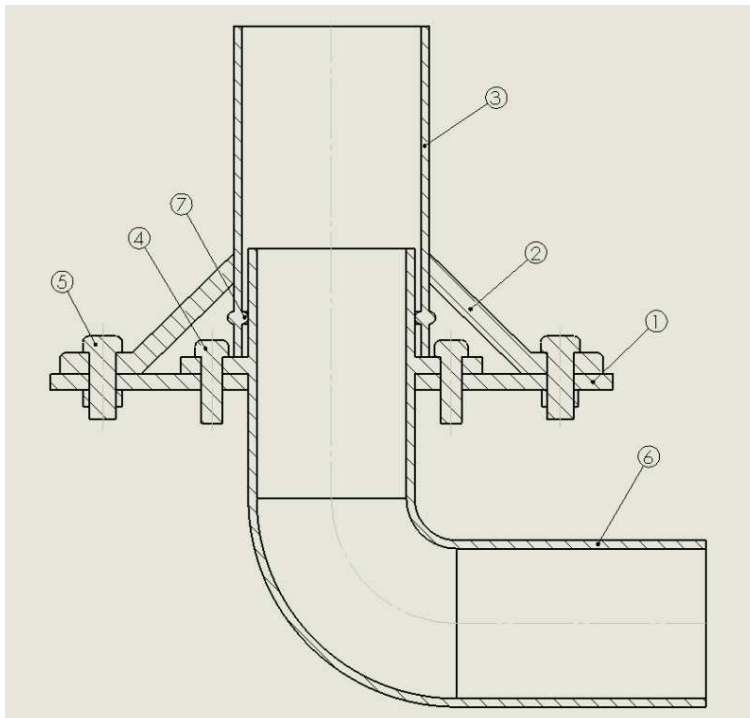


Obr.31: Konstrukční řešení kolene- 3D model

V řezu:



Obr. 32: Konstrukční řešení kolene- 3D model- řez



Obr. 33: Koleno- řez



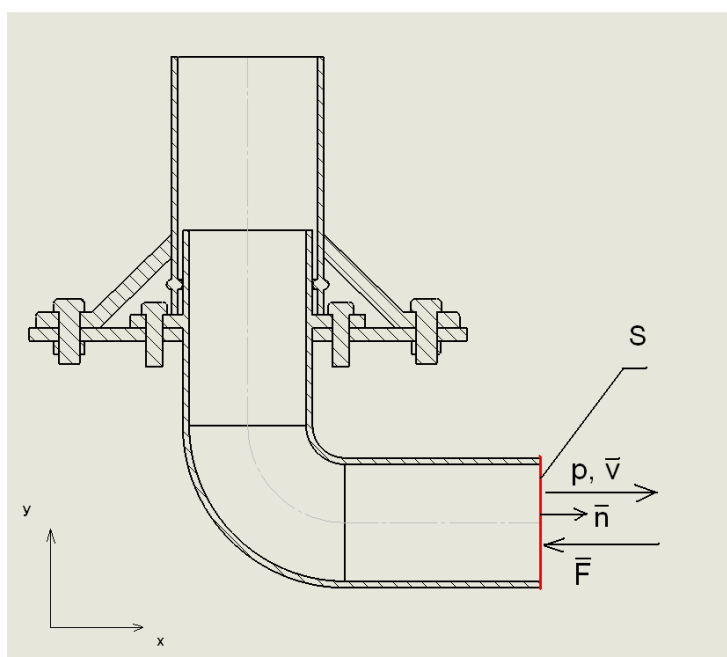
**Popis a funkce zařízení:**

Voda z hydraulického obvodu přitéká potrubím (3) a vytéká do nádrže kolenem (6). To je uchyceno mezi deskou (1) a potrubím (3) a zaaretováno do neměnné pozice aretačními kolíky (4). Potrubí (3) je pomocí žeber (2) připevněno šrouby (5) k desce (1). Chceme-li tedy pootočit koleno (6), vyjmeme aretační kolíky a koleno natočíme do požadované pozice a opět zaletujeme kolíky.

Tímto natočením kolen umožníme, aby loďka sama kroužila ve větších či menších kruzích po vodní ploše, čímž usnadníme práci obsluze člunu.

**4.6 Reakční síla kapaliny**

Mezi výhody říčního člunu s hydraulickým obvodem patří také jeho pohon, který zajišťuje reakční síla kapaliny působící na potrubí při výtoku vody z obvodu zpět do vodní nádrže. Reakční síla se přenáší přes potrubí, které přiléhá svým povrchem k zadní kolmé desce lodi do celé loďky a tím ji pohání.

**4.6.1 Výpočet reakční síly**

Obr. 34: Reakční síla kapaliny

Při výpočtu vycházím z Eulerovi rovnice hydrodynamiky pro stacionární proudění:

$$\bar{v} \operatorname{grad} \bar{v} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p \quad (4.19)$$

kde  $\bar{v}$  je vektor rychlosti kapaliny na výtoku z potrubí,  $p$  je tlak na výtoku z potrubí.

Zavedu metodu kontrolního objemu:

$$\iiint \bar{v} \operatorname{grad} \bar{v} dV = \iiint -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p dV + \frac{\bar{F}_r}{\rho} \quad (4.20)$$

kde  $F_r$  je zavedená reakční síla, podělená hustotou kapaliny  $\rho$  pro rozměrovou korektnost.

Gauss- Ostrogradského věta:

$$\oint_S \bar{v} (\bar{v} \bar{n}) dS = -\frac{1}{\rho} \oint_S (p - p_{atm}) \bar{n} dS + \frac{\bar{F}_r}{\rho} \quad (4.21)$$

kde  $S$  je plocha na kterou reakční síla působí,  $\bar{n}$  je jednotková vnější normála určující orientaci plochy  $S$  a  $p_{atm}$  je atmosférický tlak.

Pro směr v ose  $x$ :

$$\oint_S v (v \cdot 1) dS = -\frac{1}{\rho} \oint_S (p - p_{atm}) \cdot 1 dS - \frac{F_r}{\rho} \quad (4.22)$$

$$\rho v^2 S = -\frac{1}{\rho} (p - p_{atm}) S - \frac{F_r}{\rho} \quad (4.23)$$

$$F_r = (p_{atm} - p) S - \rho v^2 S \quad (4.24)$$

což je výsledný vztah pro stanovení reakční síly od kapaliny.

Člen  $(p_{atm} - p) S$  v rovnici (4.24) je možno zanedbat díky tomu, že tlak  $p$  je téměř roven tlaku atmosférickému  $p_{atm}$ . Rovnice (4.24) tedy přejde do tvaru:

$$F_r = -\rho v^2 S \quad (4.25)$$

kde znaménko mínus značí, že reakční síla působí proti zvolenému směru osy  $x$ .

## 5. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU KAVITACE NA VODU

### OBSAHUJÍCÍ SINICE

Experimentální ověření předpokládaného vlivu kavitace na mikroorganismy a sinice obsažené ve vodě bylo původně plánováno již do mé bakalářské práce, ovšem nestihlo se do daného termínu realizovat a je tedy součástí mé diplomové práce. Experiment byl proveden laboratorně ve spolupráci s Doc. Ing. Blahoslavem Maršálkem, CSc. z Přírodovědecké fakulty, Výzkumného centra pro chemii životního prostředí a ekotoxikologii.

Podrobný popis hydraulické tratě pro experiment byl popsán v mé bakalářské práci, proto se jím zde již nebudu podrobně zabývat (seznam měřící techniky, foto jednotlivých součástí obvodu atd.), uvedu pouze celkové foto obvodu a princip jeho funkce. Trať je také prakticky analogická s tratí pro stanovení ztrátového součinitele  $\zeta$  kavitační trubice, viz kapitola 4.3.

### 5.1 Hydraulická trať pro experiment, popis, funkce



Obr. 35: Trať pro experiment

Trať byla sestavena z nádoby, v níž byla napuštěna zkoumaná voda znečištěná sinicemi. Z této nádoby se čerpala čerpadlem a přes indukční průtokoměr, škrtící ventil a kavitační trubici byla vypouštěna zpět do nádrže. Na počítači jsme mohli odečítat měřené hydraulické veličiny a to průtok, tlak před a za tryskou a atmosférický tlak. Mezi čerpadlem a průtokoměrem byl umístěn i obtok pro regulaci velkého výkonu čerpadla. Škrtícím ventilem byl pak regulován průtok jemněji pro vytvoření plně vyvinuté kavitace.

V nádobě byl přesně odměřený objem vody a díky znalosti průtoku v obvodu jsme mohli pomocí stopek přesně stanovit, za jaký měřený čas se objem nádoby „přefiltruje“ v obvodu. Vodu se sinicemi v nádrži jsme při každém pokusu nechali projít obvodem s tryskou vždy jednou, dvakrát a třikrát a mezi každým dalším průchodem byl odebrán vzorek, aby bylo možné stanovit, jaký vliv má na sinice opakovaný průchod přes kavitační trysku.

## 5.2 Průběh experimentu

Proběhly 3 série pokusů podle typu sinic obsažených ve vodě:

### 1) voda se sinicemi typu *Synechococcus nidulans*

Sinice tohoto typu neobsahují plynové měchýřky a jsou velmi odolné. To se projevilo i na výsledku experimentu, kdy nebylo zaznamenáno žádné snížení výskytu sinic ani po třech průchodech celého objemu nádoby kavitačním obvodem.



Obr. 36: Sinice *Synechococcus nidulans*

## 2) voda se směsí řas a rozsivek

Také u tohoto typu sinic nebyl prokázán téměř žádný efekt působení kavitace.



*Obr. 37: voda se směsí řas a rozsivek*

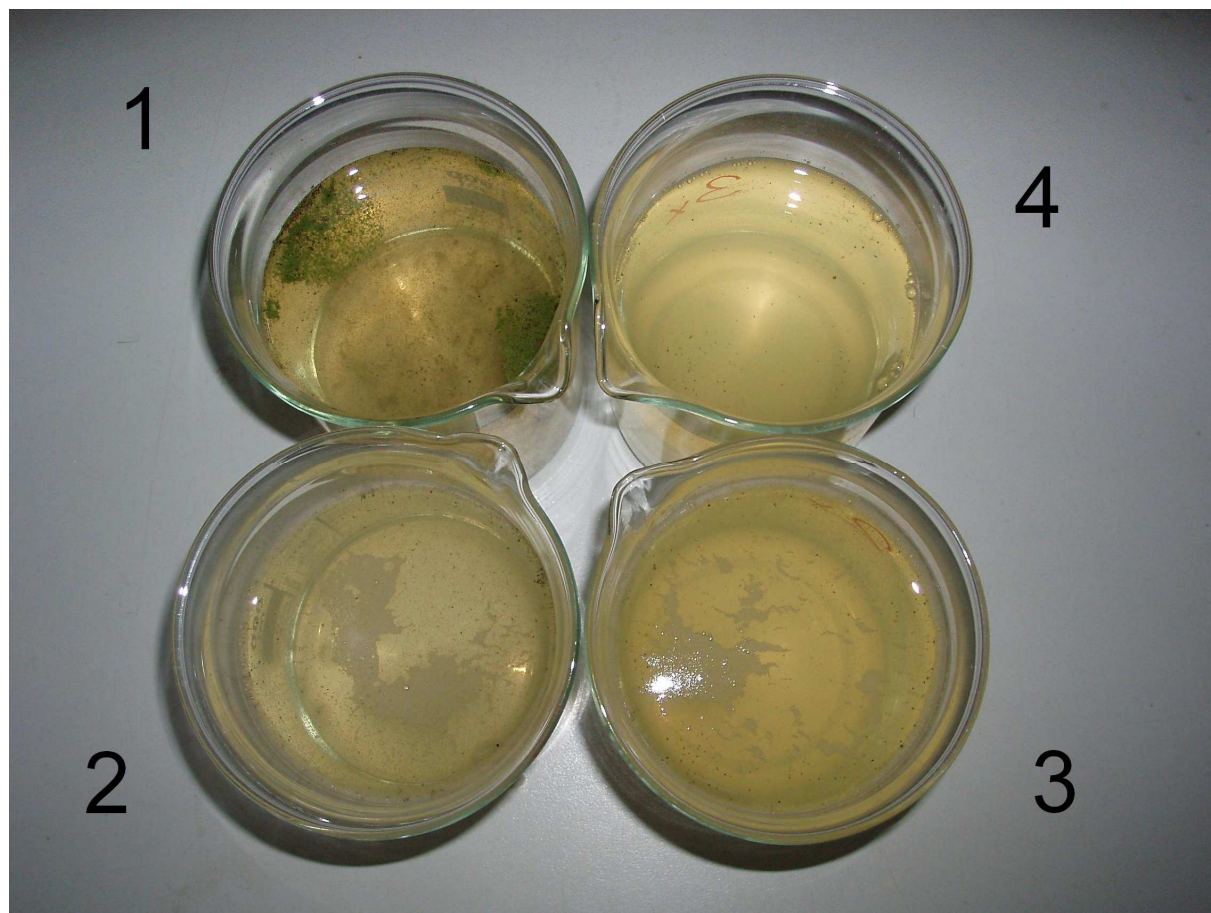
## 3) voda se sinicemi typu Microcystis

U tohoto typu sinic byl prokázán jednoznačný efekt kavitace na jejich destrukci. Došlo k rozbití plynových měchýřků (aerotopů), v důsledku čehož klesly kolonie sinic na dno a dezintegrovaly se na menší části. Došlo jak k usmrcení sinic, tak i prvoku obsažených ve vzorku. Výsledek můžeme vidět na následujících obrázcích:



*Obr. 38: Vzorek před průchodem kavitací tryskou*





Obr. 39: Vzorky před a po jednotlivých průchodech kavitační tryskou

#### Komentář k Obr. 39:

Vzorek číslo 1- voda před průchodem hydraulickým obvodem s kavitační trubicí.

Vzorek číslo 2- voda po jednom průchodu obvodem

Vzorek číslo 3- voda po dvou průchodech obvodem

Vzorek číslo 4- voda po třech průchodech obvodem

Z obrázku je tedy patrné, že kavitace má výrazný vliv na obsah sinic ve vodě a její efekt je umocněn počtem průchodů znečištěné vody přes obvod s kavitační trubicí.

Následující obrázky jsou pořízeny z mikroskopu po zkoumání jednotlivých vzorků sinic typu Microcystis.



*Obr. 40: Celá kolonie sinic Microcystis*



*Obr. 41: Celá kolonie po 1 průchodu kavitací*



*Obr. 42: Kolonie po 2 průchodech kavitací*



*Obr. 43: Rozpadlá kolonie po 3 průchodech kavitací*

#### **Komentář k Obr. 40 až 43:**

Ze snímků pořízených z mikroskopu je jasné patrné, jaký má vliv počet průchodů vzorku kavitacním obvodem na strukturu kolonie sinic. Na Obr. 40 je celá kolonie sinic před průchodem v obvodu. Na Obr. 41 je celá kolonie po jednom průchodu obvodem, již je patrná změna struktury kolonie. Na Obr. 42 je ještě celá kolonie po dvou průchodech kavitací, můžeme však již vidět oddělené buňky od kolonie („tečky“ v okolí kolonie). Na Obr. 43 je



pak již zcela rozpadlá kolonie a to po třech průchodech hydraulickým obvodem s kavitační trubicí.

Toto zjištění má o to větší význam, že sinice *Microcystis* jsou, na rozdíl od prvních dvou typů, u kterých se žádný efekt neprokázal, sinicemi, které se běžně vyskytují v rybnících, přehradách atd. a znepříjemňují či zabraňují například koupání v letních měsících.

## 6. ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo v první části zpracovat literární rešerši. V té jsem se zaměřil jednak na zpracování pojmu kavitace a sinice obecně, ale také na současný stav problému využívání kavitace. Z výsledků je patrné, že kavitace se v dnešní době hojně využívá k nejrozličnějším účelům. Mezi ty nejčastější patří kosmetika- jde o tzv. neinvazivní liposukci, kde jde o rozrušování podkožního tuku pomocí akustické kavitace, a medicína, kde se jedná o desinfekci nástrojů, dále o rozrušování ledvinových kamenů či ve stomatologii k odstraňování zubního kamene. Vždy jde o kavitaci akustickou. Co se týče konkrétně případu hubení sinic pomocí hydrodynamické kavitace, nebyly zjištěny žádné metody či projekty, postup hubení nebo rozrušování (desintegrace) mikroorganismů pomocí kavitace je však znám a využíván, a to například při desintegraci vláknitých struktur v aktivovaném kalu nebo již zmiňovanou desinfekci medicínských nástrojů.

Ve druhé části diplomové práce byl kompletně navržen, vypočítán a ve 3D programu SolidWorks sestaven a konstrukčně vyřešen hydraulický obvod na říčním člunu, který může sloužit jako mobilní kavitační stanice pro jízdu na vodní ploše (rybník, přehrada) obsahující sinice, kterou bude díky svému hydraulickému obvodu obsahující kavitační trubicí od těchto mikroorganismů čistit. Tato metoda se jeví jako perspektivní díky relativně nízké ceně a nulovému dopadu na životní prostředí. Výhodu spatřuji také v tom, že se mi nepodařilo najít stejnou ani podobnou metodu hubení sinic na přehradách nebo rybnících, která by již byla v provozu nebo alespoň ve fázi příprav, mohlo by se tedy jednat o prvenství v této oblasti.

V poslední části se jednalo o velmi důležité experimentální ověření vlivu kavitace na vodu obsahující sinice. V laboratorních podmínkách se dosáhlo velmi dobrých a zřejmých výsledků, kdy se zcela jasně prokázalo, že destruktivní účinky kavitace mají zásadní vliv na stavbu buňky sinice i celé kolonie. Nejlepších výsledků se dosáhlo po trojím projití testovaného objemu vody přes hydraulický obvod s kavitační trubicí, kde byl rozrušen nejen plynový měchýřek, díky kterému sinice plave na hladině, ale také buněčná stěna sinice a celé kolonie sinic byly dezintegrovány na jednotlivé buňky. To mělo za následek vyčištění hladiny od nánosů kolonií sinic a jejich klesnutí na dno.

Myšlenka i postup, který byl v této diplomové práci zvolen byl tedy zřejmě dobrý a bylo by zajímavé na něj navázat. A to ve smyslu snahy o uvedení říčního člunu s hydraulickým obvodem do praxe a experimentálního ověření laboratorních výsledků přímo v terénu. Při kladném výsledku by již nemuselo nic bránit uvedení této metody hubení sinic masovějšímu rozšíření při boji proti „rozkvetlým rybníkům.“

## Použitá literatura

- [1] NOSKIEVIČ, J. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. První vydání. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1989. 336 s. ISBN 80-03-00206-0.
- [2] KIANIČKA, Martin. *Využití kavitace v technické praxi*. [s.l.], 2008. 29s s. Bakalářská práce. FSI VUT Brno.
- [3] MARŠÁLEK, B.; KERŠNER, V.; MARVAN, P. *Vodní květy sinic*. Brno : Nadatio flos-aquae, 1996. 142 s.
- [4] *Sinice a řasy* [online]. 2003-2010 [cit. 2010-05-26]. Sinice a řasy pro širokou veřejnost a novináře. Dostupné z WWW: <<http://www.sinicearasy.cz/pro-vsechny#sinice>>.
- [5] Sinice. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-05-26]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Sinice>>.

## Seznam použitých symbolů

### Latinské symboly

$d$	průměr zúžení trubice	[m]
$D$	průměr trubice	[m]
$D_h$	hydraulický průměr	[m <sup>2</sup> ]
$F$	síla	[N]
$F_r$	reakční síla	[N]
$g$	gravitační zrychlení	[ms <sup>-2</sup> ]
$h$	horizontální výška od vztažné hladiny	[m]
$k$	drsnost potrubí	[m]
$k_r$	relativní drsnost potrubí	[1]
$K$	kavitační parametr	[1]
$p$	tlak kapaliny	[Pa]
$p_{atm}$	atmosférický tlak	[Pa]
$p_n$	tlak nasycených par	[Pa]
$Q$	průtok	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$Re_k$	kritické Reynoldsovo číslo	[1]
$S$	průřez	[m <sup>2</sup> ]
$v$	rychlost kapaliny	[ms <sup>-1</sup> ]
$Y$	měrná energie	[Jkg <sup>-1</sup> ]
$Y_z$	ztrátová měrná energie	[Jkg <sup>-1</sup> ]

### Řecké symboly

$\rho$	hustota kapaliny	[kgm <sup>-3</sup> ]
$\xi$	ztrátový součinitel	[1]
$\xi_m$	součinitel místní ztráty	[1]
$\xi_t$	součinitel ztráty třením po délce	[1]
$\xi_c$	celkový ztrátový součinitel	[1]
$\lambda$	koeficient tření	[1]
$\xi_k$	součinitel místní ztráty pro koleno	[1]
$\xi_s$	součinitel místní ztráty pro škrťací ventil	[1]
$\xi_{kav}$	součinitel místní ztráty pro kavitační trubici	[1]

**Indexy**

0	místo 0
1	místo 1
2	místo 2
0,1	mezi místy 0 a 1
1,2	mezi místy 1 a 2
kav	kavitační
max	maximální
vír	víru

**Seznam obrázků**

Obr. 19: Indukční průtokoměr	28
Obr. 20: Kavitační trubice	29
Obr. 21: Odstředivé čerpadlo	29
Obr. 22: Tlakový snímač $p_1$	30
Obr. 23: Tlakový snímač $p_2$	30
Obr. 24: Počítač s měřicí kartou a programem	31
Obr. 25: Závislost ztrátového součinitele na průtoku	33
Obr. 26: Začátek kavitace při $Q = 12$ l/s	34
Obr. 27: Kavitace při max. $Q = 14,5$ l/s	34
Obr. 28: Schéma tratě pro výpočet ztrát	35
Obr. 29: Hasičské čerpadlo KOMFI	36
Obr.30: $Y-Q$ a $\eta-Q$ charakteristika	36
Obr.31: Konstrukční řešení kolene- 3D model	38
Obr. 32: Konstrukční řešení kolene- 3D model- řez	39
Obr. 33: Koleno- řez	39
Obr. 34: Reakční síla kapaliny	40
Obr. 35: Trať pro experiment	42
Obr. 36: Sinice <i>Synechococcus nidulans</i>	43
Obr. 37: Voda se směsí řas a rozsivek	44
Obr. 38: Vzorek před průchodem kavitační tryskou	44
Obr. 39: Vzorky před a po jednotlivých průchodech kavitační tryskou	45
Obr. 40: Celá kolonie sinic <i>Microcystis</i>	46
Obr. 41: Celá kolonie po 1 průchodu kavitací	46
Obr. 42: Kolonie po 2 průchodech kavitací	47
Obr. 43: Rozpadlá kolonie po 3 průchodech kavitací	47