

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení**

**Vliv teploty a tlaku čerpaného média na kavitační  
podmínky**

**Influence of Pumped Medium Temperature and Pressure  
on Pump Cavitation Conditions**

Student:

Bc. Josef Dobeš

Vedoucí diplomové práce:

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Josef Dobeš**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma: **Vliv teploty a tlaku čerpaného média na kavitační podmínky čerpadel.**  
**Influence of Pumped Medium Temperature and Pressure on Pump Cavitation Conditions.**

### Zásady pro vypracování:

Zpracujte problematiku změny kavitačních podmínek čerpadel v závislosti na teplotě a tlaku pro různé kapaliny dle zadání - Hutní PROJEKT Frýdek-Místek a.s.

1. Matematický model kavitace, metody řešení.
2. Definování fyzikálních a chemických vlastností směsí kapalin dle zadání.
3. Numerické kavitace s ohledem na změnu provozní teploty při různých kapalinách.
4. Řešení kavitačních podmínek hydraulického obvodu s ohledem na různé kapaliny různých obsahů vzduchu, vytvoření matematického modelu a jeho řešení využitím software Matlab-SimHydraulics, hodnocení variant řešení.
5. Zhodnocení variant řešení a porovnání s experimentem.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- DRÁBKOVÁ, Sylva a kol. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 s. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.
- INCROPERA, F. a kol. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6. edition, John Wiley and Sons 2007, 996p., ISBN 978-0-471-45728-2
- NIKOLAY I. KOLEV. *Multiphase flow dynamics. 1, Fundamentals / - 2nd ed.* Berlin : Springer, c2005 - xxxv, 753 s. : il. + 1 CD-ROM ISBN 3-540-22106-9
- KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TU, 2008, 115 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM)
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 13 - Theory Guide*. 2010.
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 13 - User's Guide*. 2010.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



---

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
*děkan fakulty*

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 21.5.2012 .....

..... Josef Dokes<sup>c</sup>  
podpis studenta

## Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

21.5. 2012

.....  
Josef Dobeš  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Josef Dobeš

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dobrá 846, 739 51 DOBRÁ

---

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOBEŠ, J. *Vliv teploty a tlaku čerpaného média na kavitační podmínky*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 71 s. Přílohy: 73 s. Vedoucí práce: prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Diplomová práce se zabývá numerickým modelováním kavitace vody a zadaných směsí. Byla vytvořena ve spolupráci s firmou Hutní PROJEKT, a. s. V úvodu jsou shrnuty základní poznatky o kavitačním ději. V první kapitole jsou prezentovány teorie kavitačních jader, dynamiky kavitačních dutin a základní fyzikální vlastnosti kapalin, které ovlivňují kavitaci. V další kapitole je popsáno kavitační působení na tekutinové prvky. Kapitola třetí pojednává o rozdělení numerického modelování kavitačního děje na dvě oblasti. První oblast zkoumání kavitačního děje je realizována pomocí metody konečných objemů s využitím programu Ansys Fluent. Zde je modelován výskyt kavitace zadaných látek v dané geometrii. Druhá oblast modelování se týká výskytu kavitace v reálném obvodu. Pro tuto část numerické simulace je využit program Matlab SimHydraulics. V této části jsou uvedeny definice jednotlivých prvků, které jsou užity pro sestavení obvodu, a postup simulace. V závěrečné kapitole jsou shrnuty výsledky modelování.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

DOBEŠ, J. *Influence of Pumped Medium Temperature and Pressure on Pump Cavitation Conditions*. Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipments, 2012, 71 p. Appendix: 73 p. Thesis head: prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

The master thesis focuses on numerical simulation of water and required mixtures cavitation. It has been created in co-operation with the firm Hutní PROJEKT, a. s. The introduction lists basic knowledge of the cavitation phenomenon. The first chapter presents the theories of the cavitation nuclei, the dynamics of cavitation and the basic physical properties of fluids which have impacts on cavitation. In the next chapter the cavitation effects on fluid elements are described. The third chapter discusses splitting the numerical simulation of cavitation treats into two areas. The first area of cavitation phenomenon is performed by finite volume method using the computer program Ansys Fluent. The occurrence of cavitation of required materials in set geometry is modelled here. The second area of modelling concerns the occurrence of cavitation phenomenon in a real circuit. For this part of the simulation the computer programme Matlab SimHydraulics is used. In this section the individual elements are defined, then used for the circuit design, and the simulation procedure is described. In the final chapter the results of the numerical modelling are summarized.

## Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů.....	- 9 -
Úvod .....	- 15 -
1. Kavitace .....	- 17 -
1.1 Kavitační jádra.....	- 20 -
1.2 Teorie a dynamika kavitačních bublin .....	- 22 -
1.3 Vliv fyzikálních vlastností tekutiny na kavitaci .....	- 25 -
2. Kavitace v tekutinových systémech .....	- 27 -
2.1 Kavitace v čerpadlech .....	- 28 -
2.2 Kavitace v potrubí.....	- 32 -
3. Numerické modelování kavitace.....	- 33 -
3.1 Metoda konečných objemů.....	- 34 -
3.1.1 Kavitační modely, Schnerr-Sauer model .....	- 36 -
3.1.2 Experimentální zařízení, geometrie výpočetní sítě .....	- 38 -
3.1.3 Numericky modelované tekutiny.....	- 39 -
3.1.4 Definování fyzikálních a okrajových podmínek - Ansys Fluent .....	- 43 -
3.2 Metoda elektrohydraulické analogie .....	- 45 -
3.2.1 Definování prvků užitých v matematickém modelu.....	- 46 -
3.2.2 Metoda sestavení trati, modelování kavitace v obvodu .....	- 56 -
4. Výsledky numerického modelování .....	- 60 -
4.1 Vyhodnocení množství páry – Ansys Fluent .....	- 61 -
4.2 Vyhodnocení simulace reálné trati – SimHydraulics .....	- 63 -
4.3 Závěr .....	- 65 -
5. Seznam literatury .....	- 66 -
6. Seznam příloh .....	- 71 -
Příloha A .....	- 72 -
Příloha B .....	- 76 -
Příloha C .....	- 83 -
Příloha D .....	- 105 -
Příloha E .....	- 119 -
Příloha F.....	- 120 -
Příloha G .....	- 121 -
Příloha H .....	- 124 -
Příloha I.....	- 125 -

Příloha J .....	- 130 -
Příloha K .....	- 134 -
Příloha L .....	- 138 -
Příloha M .....	- 141 -
Příloha N .....	- 142 -



## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název veličiny	Jednotka
$A_i, S_i$	plocha	$[m^2]$
$c$	měrná tepelná kapacita	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
$c_i$	molární koncentrace i-té složky	$[mol.dm^{-3}]$
$c_{Wi}$	hmotnostní koncentrace i-té složky	$[kg.m^{-3}], [g.dm^{-3}]$
$C_f$	korekční faktor vlivu výšek nerovností povrchu potrubí	[1]
$C_{B1-B2}$	korekční faktor vlivu 2 kolen za sebou	[1]
$C_O$	korekční faktor vlivu výstupního průměru a délky potrubí	[1]
$C_{Re}$	korekční faktor vlivu Reynoldsova čísla	[1]
$C_{PMIN}$	minimální tlakový koeficient	[1]
$C_{1e}$	empirická konstanta	[1]
$C_{2e}$	empirická konstanta	[1]
$C_{3e}$	empirická konstanta	[1]
$C_\mu$	empirická konstanta	[1]
$d$	průměr jamky	$[\mu m]$
$d_s$	průměr šoupátka ventilu	[m]
$d_P$	průměr potrubí	[m]
$d_j$	průměr paprsku	$[\mu m]$
$d_1, d_2$	průměry podstav kužele	[m]
$D_0$	počáteční průměr bubliny	$[\mu m]$
$D_f$	konečný průměr bubliny	$[\mu m]$
$e$	Eulerovo číslo	[1]
$E_k$	energie fáze k	[J]
$f$	frekvence	[Hz]
$f_i$	výška nerovnosti povrchu	[m]
$F$	tok hmoty	$[m^3.s^{-1}]$
$\vec{F}$	vektor objemové síly	$[kg.m^{-2}.s^{-2}]$
$g$	gravitační zrychlení	$[m.s^{-2}]$
$G_b$	empirická konstanta	$[kg.m^{-1}.s^{-3}]$
$G_k$	empirická konstanta	$[kg.m^{-1}.s^{-3}]$

$G_b$	Gibbsovo číslo	[1]
$h$	hloubka jamky	[ $\mu\text{m}$ ]
$h_{S,DOV}$	dovolená sací výška	[m]
$h_{ZS}$	ztrátová výška v sání	[m]
$H$	dopravní výška čerpadla	[m]
$H_{N11A}$	výška hladiny nádrže	[m]
$I$	intenzita turbulence	[%]
$J$	rychlost tvoření zárodků	[ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$J_0$	součinitel úměrnosti	[ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
$k$	turbulentní kinetická energie	[ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ]
$k_B$	Boltzmanova konstanta	[ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$k_{eff}$	součinitel efektivní tepelné vodivosti	[ $\text{W} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$K$	modul objemové pružnosti	[Pa]
$K_i$	ztrátový součinitel	[1]
$K_{LIQ}$	modul objemové pružnosti kapaliny	[Pa]
$K_V$	průtokový součinitel	[ $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ ]
$l$	délkové měřítko	[m]
$l_P$	délka potrubí	[m]
$l_e$	ekvivalentní délka	[m]
$L$	charakteristický rozměr	[m]
$m$	hmotnost	[kg]
$m_B$	exponent hustoty kavitačních jader	[1]
$n_k$	počet fází k	[1]
$n_b$	rychl oběžnost	[1]
$n_s$	měrné specifické otáčky	[ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_q$	měrné objemové otáčky	[ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_B$	hustota kavitačních zárodků	[ $\text{m}^{-3}$ ]
$n_M$	otáčky motoru	[ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_*$	základní počet hustoty kavitačních jader	[ $\text{m}^{-3}$ ]
$N$	délka difuzoru/konfuzoru	[m]
$N_M$	počet molekul	[ $\text{m}^{-3}$ ]
$o_i$	počáteční otevření ventilu	[m]

$o_V$	otevření ventilu	[m]
$p$	tlak	[Pa]
$p_0$	atmosférický tlak	[Pa]
$p_B$	tlak v bublině	[Pa]
$p_{i30st}$	parciální tlak i-té složky	[Pa]
$p_K$	měrná energie fáze k	[J.kg.m <sup>-3</sup> ]
$p_{LIQ}$	tlak kapaliny	[Pa]
$p_N$	přetlak nádrže	[Pa]
$p_S$	sací tlak čerpadla	[Pa]
$p_{PT1033}$	tlak na manometru	[Pa]
$p_{VAP}$	tlak nasycených par, tenze par	[Pa]
$\Delta p$	tlakový spád, pokles tlaku	[Pa]
$\Delta p_C$	pevnost v tahu kapaliny	[Pa]
$\Delta p_{FILTRU}$	tlaková ztráta filtru	[Pa]
$p_{MIN}$	minimální tlak v oblasti	[Pa]
$p_{30st}$	tlak čisté látky	[Pa]
$P_P$	příkon	[W]
$Pr_{WALL}$	Prandtlovo číslo	[1]
$Q_{M-i}$	hmotnostní průtok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$Q_{V-i}$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\Delta Q_V$	pokles objemového průtoku	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$r$	vzdálenost bodu	[m]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$R_e$	zdrojový člen vypařování	[kg.s <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ]
$R_{e,c}$	obecná rychlost přenosu hmoty	[kg.s <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ]
$R_{eRNG}$	empirická konstanta modelu RNG	[kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-4</sup> ]
$R, R_i$	poloměr	[m]
$R_B$	poloměr bubliny	[m]
$R_c$	zdrojový člen kondenzace	[kg.s <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ]
$R_{CR}$	kritický poloměr	[m]
$R_O$	velikost kavitačních jader	[cm]
$s_M$	tloušťka namáhané vrstvy	[μm]

$S_e$	empirická konstanta	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-4}]$
$S_E$	objemový zdroj tepla	$[\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$
$S_K$	empirická konstanta	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}]$
$t$	čas	[s]
$t_C$	trvání zániku bubliny	[s]
$t_P$	doba poločasu rozpuštění vzduchu	[s]
$T$	teplota	$[^\circ\text{C}], [\text{K}]$
$T_{CR}$	kritická teplota	$[^\circ\text{C}], [\text{K}]$
$u$	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_K$	rychlost v kolmém směru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_R$	rychlost v rovnoběžném směru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_j$	rychlost paprsku	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_S$	střední rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}$	obecný vektor rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}_{dr,k}$	vektor unášivé rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}_k$	vektor rychlosti fáze k	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}_{MIX}$	vektor rychlosti směsi	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}_{VAP}$	vektor rychlosti páry	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_K$	výška kužele	[m]
$v_V$	výška válce	[m]
$V_{GAS}$	objem nerozpuštěného plynu	$[\text{m}^3]$
$V_{LIQ}$	objem kapaliny	$[\text{m}^3]$
$V_N$	objem nádrže	$[\text{m}^3]$
$V_{N11A}$	počáteční objem nádrže	$[\text{m}^3]$
$W_{CR}$	kritická usazovací energie	[J]
$x_i$	molární zlomek i-té složky	[1]
$x_{M-i}$	hmotnostní zlomek i-té složky	[1]
$\Delta y$	kritická měrná energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\Delta y_{DOV}$	dovolená kavitační deprese	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_S$	měrná energie čerpadla	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Y_M$	empirická konstanta	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}]$
$\alpha$	úhel tvarové plochy	$[^\circ]$

$\alpha_K$	objemový zlomek fáze k	[1]
$\alpha_{REL}$	relativní množství rozpuštěného vzduchu	[1]
$\alpha_V$	Bunsenův absorpční součinitel	[1]
$\alpha_{VAP}$	objemový zlomek páry	[1]
$\varepsilon$	rychlost disipace	[m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> ]
$\zeta$	součinitel místní ztráty	[1]
$\zeta_B$	ztrátový součinitel kolena	[1]
$\zeta_B^*$	základní ztrátový součinitel kolena	[1]
$\zeta_{FILTR}$	ztrátový součinitel filtru	[1]
$\zeta_i$	ztrátový součinitel	[1]
$\theta$	úhel smáčivosti	[°]
$\lambda$	součinitel tření	[1]
$\mu_i$	dynamická viskozita	[Pa.s]
$\mu_{eff}$	efektivní viskozita	[Pa.s]
$\mu_{LIQ}$	dynamická viskozita kapaliny	[Pa.s]
$\mu_{MIX}$	dynamická viskozita směsi	[Pa.s]
$\mu_{VAP}$	dynamická viskozita páry	[Pa.s]
$U_i$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$U_{LIQ}$	kinematická viskozita kapaliny	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$U_{VAP}$	kinematická viskozita páry	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[1]
$\rho, \rho_i$	hustota, referenční hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_K$	hustota fáze k	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{LIQ}$	hustota kapaliny	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{MIX}$	hustota směsi	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{VAP}$	hustota páry	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Thomův kavitační součinitel	[1]
$\sigma_C$	kavitační číslo	[1]
$\sigma_i$	počáteční kavitační číslo	[1]
$\sigma_{rr}$	radiální napětí na povrchu bubliny	[Pa]
$\sigma_S$	povrchové napětí kapaliny	[N.m <sup>-1</sup> ]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad.s <sup>-1</sup> ]

$NPSH$	dovolená sací výška	[m]
$NPSH_i$	počáteční dovolená sací výška	[m]
$NPSH_R$	požadovaná dovolená sací výška	[m]

## Indexy:

$C$	index kavitace
$CR$	index kritické hodnoty
$DOV$	index dovolené hodnoty
$eff$	index efektivní hodnoty
$GAS$	index plynné fáze
$l, i$	obecný index, index počáteční veličiny
$k$	index fáze k
$LIQ$	index kapalná fáze
$MIX$	index směsi
$rr$	index radiálního napětí
$R$	index požadované veličiny
$S$	index povrchu, střední hodnoty
$VAP$	index páry

## Značky, zkratky

$\nabla$	gradient, $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$
DKA	dehtový kondenzát, varianta A
DKB	dehtový kondenzát, varianta B
MEA	metoda elektrohydraulické analogie
MKO	metoda konečných objemů
$NH_3$	$NH_3$ voda
NR	nasycený roztok
VR	vypírací roztok
fa, fy	firma

## Úvod

Kavitace je jev v kapalině, který se vyznačuje vytvořením dutiny – bubliny, jejím vývojem a samotným zánikem této dutiny. Tato dutina je vyplněna párou, která se vypařuje z kapaliny při dosažení tlaku nasycených par dané tekutiny. Samotný název tohoto jevu vychází z latinského slova „cavitas“, což v překladu znamená dutina. Jedná se tedy o narušení spojitosti tekutiny, kdy musí být překonány kohezní síly molekul kapaliny [37]. První zmínku o kavitacním jevu uvedl ve své teorii vodních turbín v polovině 18. století Leonhard Euler. V technické praxi se setkáváme s kavitací poprvé na konci 19. století při návrhu lodních šroubů, kdy vyrobené lodní šrouby nedosahovaly zdaleka navrhovaných hodnot [38].



Obrázek 1. Lodní šroub poškozený kavitací [25]

Kavitace ovšem nachází uplatnění i v jiných oborech, např. v medicíně, kde se ve stomatologii používá na odstraňování zubního kamene, v lékařství při odstraňování ledvinových kamenů pomocí rázových vln. Při čištění šperků u špatně dostupných míst se vyvolává akustická kavitace a v mnoha dalších aplikacích [49]. Ve vojenském průmyslu je znám již řadu let pojem superkavitace. Jde vlastně o obalení podmořské střely vzduchovou bublinou, což má za následek významné snížení odporu prostředí proti pohybu předmětu v kapalině. Takto se pohybující střela dokáže vyvinout rychlost až  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , oproti konvenčním střelám, které dokáží vyvinout rychlost kolem  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [24].

V první kapitole diplomové práce je popsána samotná kavitace, její dělení a teorie vzniku kavitačních jader, z nichž se následně vyvíjejí kavitační dutiny. Je uvedena teorie popisující dynamiku kavitačních bublin a fyzikální vlastnosti tekutin, které mají největší vliv na kavitaci. Další kapitola je věnována kavitaci v prvcích tekutinových systémů, přesněji je pojednáno o kavitaci v čerpadlech, potrubích a ventilech.

Hlavní část práce je zaměřena na dva způsoby numerického modelování kavitačního děje. Prvním způsobem je metoda konečných objemů a druhým způsobem numerického modelování je metoda elektrohydraulické analogie, která spočívá v sestavení tekutinového obvodu. Pro metodu konečných objemů je vybrán program Ansys Fluent. Pro simulaci metodou konečných objemů je definován matematický model kavitace, geometrie pro numerický výpočet a fyzikální vlastnosti zkoumaných tekutin. Zkoumané tekutiny zde představují zadané směsi a voda, která je brána jako referenční tekutina. Je proveden rozbor problematiky zadaných tekutin a postup práce. V samotné simulační části v Ansys Fluentu jsou definovány vstupní a výstupní podmínky simulace a je popsán experimentální obvod pro ověření výsledků. Metoda elektrohydraulické analogie spočívá ve vytvoření obvodu jako celku, kombinací tekutinových prvků a potrubí, kde každý prvek, včetně potrubí, je popsán matematickým modelem a definovanými parametry. Pro tuto část práce je využit program Matlab Simulink, přesněji nástavba SimHydraulics. Zde je vytvořen matematický model reálného obvodu, v modelu jsou definovány parametry jednotlivých prvků, které jsou využity pro sestavení modelu. Data získaná simulací jsou porovnána s reálnými daty a dále je provedena simulace zanesení filtru v sání čerpadla, při kterém je dosaženo vzniku kavitace, pro daný teplotní rozsah.

Výsledkem simulování kavitace metodou konečných objemů pomocí programu Ansys Fluent bude porovnání hmotnosti páry  $m$  při dané teplotě, vody (referenční kapalina) a kapalin zadaných ve spolupráci s firmou Hutní PROJEKT Frýdek-Místek, a. s. Na základě porovnání bude následně vyhodnocena možnost kavitačního působení zadaných látek na tekutinové prvky. V druhé části vyhodnocení bude uvedeno porovnání hodnot tlaku  $p$ , objemových průtoků  $Q_V$  získaných metodou elektrohydraulické analogie z modelu sestaveného v programu Matlab – Simulink – SimHydraulics a hodnot naměřených na reálné trati. Dále budou uvedeny hodnoty ztrátového součinitele  $\zeta$ , které představují zanesení filtru nečistotami, při kterých dojde ke kavitaci na vstupu do hydrodynamického čerpadla.



## 1. Kavitace

Kavitace vzniká při dosažení určitých fyzikálních stavů kapaliny, především teploty a tlaku. Poklesne-li tlak v místě na tzv. kavitační tlak, neboli tlak nasycených par, který je funkcí teploty dané kapaliny, dochází k narušení spojitosti kapaliny a vzniká odpařováním kapaliny kavitační dutina. Na druhé straně může kavitace vzniknout také odtržením proudu od obtékaného povrchu nebo v důsledku kmitání a následně vyvolaných tlakových vln [30]. Kavitační oblast tedy může být ohraničena pouze kapalinou, nebo kapalinou a pevnou látkou. Velký vliv na vznik kavitační oblasti mají rovněž mechanické nečistoty obsažené v kapalině, kde na těchto nečistotách ulpívají částičky nerozpuštěného vzduchu [37], které významně podporují vznik kavitačních dutin. Kavitační bublina se přemísťuje z oblasti nižšího tlaku do oblasti s vyšším tlakem, kde prudce zaniká, tzv. imploduje [38]. Při nesymetrickém zániku vznikají kumulované mikroproudy kapaliny s vysokou rychlostí a dynamickým působením na povrch tělesa. Silové účinky mikroproudů totiž působí na velmi malé plochy, řádově  $10^{-9} \text{ m}^2$ .

Z předchozího odstavce vyplývá, že tekutina při kavitaci bude směs kapaliny, páry a vzduchu, nerozpuštěného ve formě bublin. S obsahem plynu je významně ovlivněna hustota dané kapaliny, což má za následek změnu dynamických vlastností kapaliny. Z hlediska plynů v dutině je kavitace rozdělena na [30]:

- vodní kavitaci – při dosažení tlaku nasycených par se odpařují páry vody a malé množství nekondenzujícího plynu (vzduchu), tento jev se týká především vody a vodních emulzí těžkozápálních kapalin,
- aeraci, známou také pod názvem nepravá kavitace – při dosažení tlaku nasycených par se tvoří dutiny, které jsou vyplněny především vzduchem a těkavými uhlovodíky, které se uvolní z oleje. Při prudkém stlačení dutiny v místě zvýšeného tlaku dojde ke kompresnímu zápalnému efektu [20] známému jako Dieselův efekt. Lokální růst teploty spojený s tímto dějem se odhaduje až na  $3000 \text{ °C}$  [49] a tlaky řádově ve stovkách MPa v nanosekundových časových úsecích. Rychlost implodze kavitační dutiny může dosáhnout hodnot nad  $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [49]. Výsledkem termické reakce jsou kyselé zplodiny, které významně urychlují degradaci minerálních olejů [12].

Rázy i mikroproudy působí na povrch materiálu mechanickým účinkem - dochází k elastické a plastické deformaci, vytváří se vnitřní pnutí v povrchových vrstvách materiálu. Vysoká frekvence zanikání kavitačních dutin vede k únavě materiálu, která je svým charakterem vysokocyklová, s následným postupným tvořením mikrotrhlinek, jejich šířením a oddělováním částic otěru [49]. Rychlost kavitačního poškození kovů je 5 000 až 100 000 krát větší než rychlost korozivního porušování v kapalině bez kavitace [49].

Kavitace je rozdělena na dvě velké skupiny. Je to částečně vyvinutá kavitace, kdy stupeň vývoje kavitace je mezi počátkem kavitace a vyvinutou kavítací, a kavítací plně vyvinutou, kdy dochází k ovlivňování proudových poměrů v hydraulickém obvodu, přičemž se jedná především o parametry jako průtok, účinnost aj. [38]. Shluk kavitačních bublin obecně tvoří kavitační oblast. Tato oblast je definována vzhledem k jejímu tvaru, místu výskytu a stálosti [14], [38]. Dle tvaru je kavitační oblast kapsovitá, kdy bubliny vyplňují určitý prostor a vytváří se většinou za obtékanými tělesy. Dále se jedná o plošnou oblast, která se přimyká k povrchu tělesa, a vláknová, kde kavitační bubliny vytvářejí viditelný sled ve tvaru vlákna, např. za lodním šroubem. Posledním druhem je kavitace spárová, která vzniká na výstupu ze spár tekutinových strojů či prvků [38]. Podle místa výskytu jsou známy kavitační oblasti uvnitř proudu kapaliny, v blízkosti obtékané plochy, nebo na obtékané ploše. Dle chování kavitační oblasti lze vysledovat oblast přemísťující se, která se pohybuje ve směru proudění tekutiny a oblast připojenou, nepřemísťující se, která se v rámci proudění nepohybuje. Uvnitř oblasti ovšem probíhá cyklický proces (vývin dutin, unášení a zánik) [38]. Podrobnější dělení je uvedeno v literatuře [14], [37].



Obrázek 2. Příklad vláknové kavitace uvnitř proudu kapaliny, přemísťující se oblast [25]

Charakteristické parametry kavitace a kavitačního působení jsou uvedeny v Tabulce 1:

Parametry	Označení	Odhadnuté hodnoty	Rozměr
Počáteční průměr kavitační bubliny	$D_0$	30 až 5000	[ $\mu\text{m}$ ]
Trvání zániku	$t_c$	$10^{-3}$ až $10^{-6}$	[s]
Maximální tlak	$p$	$1 \cdot 10^8$ až $30 \cdot 10^8$	[Pa]
Maximální teplota v bublině	$T$	1000 až 4000	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
Průměr paprsku	$d_j$	1 až 50	[ $\mu\text{m}$ ]
Rychlost paprsku	$u_j$	50 až 1500	[ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Frekvence namáhání	$f$	10 až 100	[Hz]
Poměr konečného a počátečního průměru	$D_f/D_0$	1/10 až 1/30	[1]
Průměr jamky	$d$	0,1 až 500	[ $\mu\text{m}$ ]
Poměr hloubky jamky k průměru jamky	$h/d$	0,02 až 1	[1]
Tloušťka namáhané vrstvy materiálu	$s_M$	50 až 150	[ $\mu\text{m}$ ]

Tabulka 1. Parametry kavitačního působení [38]

## 1.1 Kavitační jádra

Kavitační dutiny se vytvářejí z kavitačních jader. Praktické experimenty ukázaly dvě formy vytváření zárodků kavitačních jader, a sice homogenní a nehomogenní tvoření jader [7]. První teorie je založena na tepelném pohybu uvnitř kapaliny tvořící přechodné, mikroskopické dutiny, které tvoří jádra potřebná pro narušení soudržnosti kapaliny a růst makroskopických bublin. Současná teorie homogenního tvoření jader je připisována pánům Volmer a Weber, Farkas a dalším [8]. Tato teorie vychází z předpokladu čisté tekutiny, kde povrchové napětí tekutiny je makroskopický projev mezimolekulárních sil, které vede k držení molekul tekutiny pohromadě. Tlak kapaliny  $p_{LIQ}$  způsobí vnitřní tlak  $p_B$  a je dán vztahem [7]:

$$p_B - p_{LIQ} = \frac{2 \cdot \sigma_S}{R} \quad (1.1.1)$$

kde  $R$  značí velikost bubliny o charakteristickém poloměru  $R$  a  $\sigma_S$  značí povrchové napětí bubliny. Odvození vztahu (1.1.1) je možné nalézt v literatuře [22]. Pevnost v tahu kapaliny  $\Delta p_C$  je dána vztahem:

$$\Delta p_C = \frac{2 \cdot \sigma_S}{R_{CR}} \quad (1.1.2)$$

kde  $R_{CR}$  charakterizuje maximální velikost dutiny, také je označována jako kritický poloměr. Velikost tohoto poloměru je porovnatelná s mezimolekulární vzdálenosti  $10^{-10}$  m [8]. Jedná se o první ze tří základních rovnic teorie homogenního tvoření jader.

Druhá základní rovnice této teorie popisuje zvýšení energie, které musí být vložena do čisté kapaliny pro vznik jader nebo bublin o velikosti kritického poloměru  $R_{CR}$ . Kritická usazovací energie  $W_{CR}$  je vyjádřena [7]:

$$W_{CR} = \frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma_S^3}{3 \cdot (\Delta p_C)^2} \quad (1.1.3)$$

Závěrečným krokem pro teorii homogenního tvoření jader je vyjádření vztahu, který může popsat výskyt usazovací energie  $W_{CR}$  a zároveň pravděpodobnost dosažení velikosti energie  $W_{CR}$ . Tento vztah je popsán pomocí bezrozměrného Gibbsonova čísla  $Gb$ , které je definováno:

$$Gb = \frac{W_{CR}}{k_B \cdot T} \quad (1.1.4)$$

kde  $k_B$  je Boltzmanova konstanta a  $T$  je teplota, někdy bývá označována  $T_{CR}$  a je nazývána jako kritická teplota (vědci Lienhard a Karimi) [7].

Rychlost tvoření zárodků  $J$  je definována jako počet bodů, tvořící zárodky v jednotce objemu kapaliny, za jednotku času:

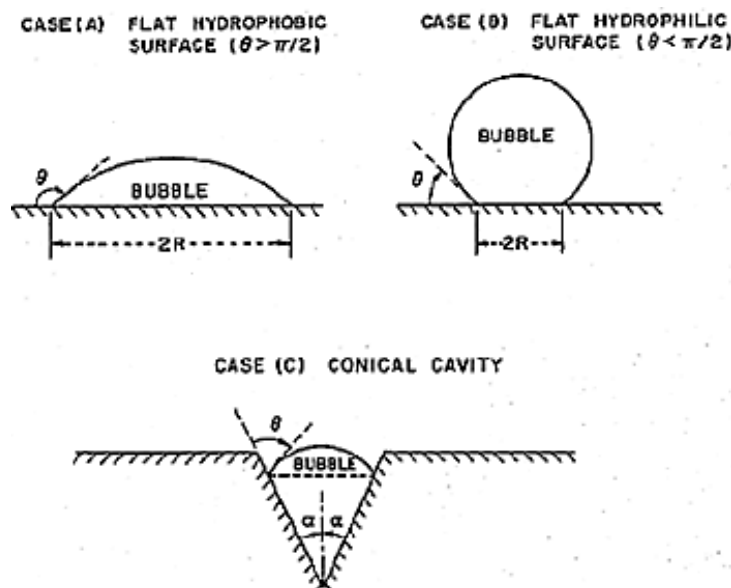
$$J = J_0 \cdot e^{-Gb} \quad (1.1.5)$$

kde  $J_0$  je součinitel úměrnosti, definovaný na základě počtu molekul  $N_M$  v objemu kapaliny a také na základě hmotnosti molekuly  $m$ . Veličina  $J_0$  může být funkcí teploty kapaliny a tento součinitel lze vypočítat dle Blandera a Katze [7].

Druhý způsob tvoření kavitačních dutin vzniká na rozhraní tekutina/pevná látka. Zde hraje roli stykový úhel  $\theta$ . V případě nesmáčivého povrchu je pevnost v tahu kapaliny  $\Delta p_c$  dán vztahem [7]:

$$\Delta p_c = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot \sin \theta}{R_{CR}} \quad (1.1.6)$$

Zde je možno uvažovat i různé tvary v povrchu pevné látky, které ovlivní úhel  $\theta$ , kdy existuje hranice, kde úhel tvarové plochy povrchu  $\alpha$  napomáhá k tvorbě parních bublin. Pomocí mnoha experimentů bylo ověřeno, že nepatrná ložiska znečištěného plynu jsou absorbována v povrchu pevné látky. V povrchu části se vyskytují místa, která svým tvarem podporují vznik zárodků a růst parních bublin. Pokud je v takovémto místě tlak stále snižován, stává se toto místo náchylnější k tvoření a vypouštění bublin z povrchu do kapaliny. Toho dosáhneme, např. když vaříme vodu v hrnci na vařiči. Čím více budeme vodu zahřívat, tím se tyto místa stávají častější. Proto hustota tvoření zárodků  $n_B$  je jako funkce přehřátí důležitá v počtu vytváření jader vařením [7]. Popis jednotlivých druhů vytváření zárodků pomocí zvyšování teploty je uveden v literatuře [23].

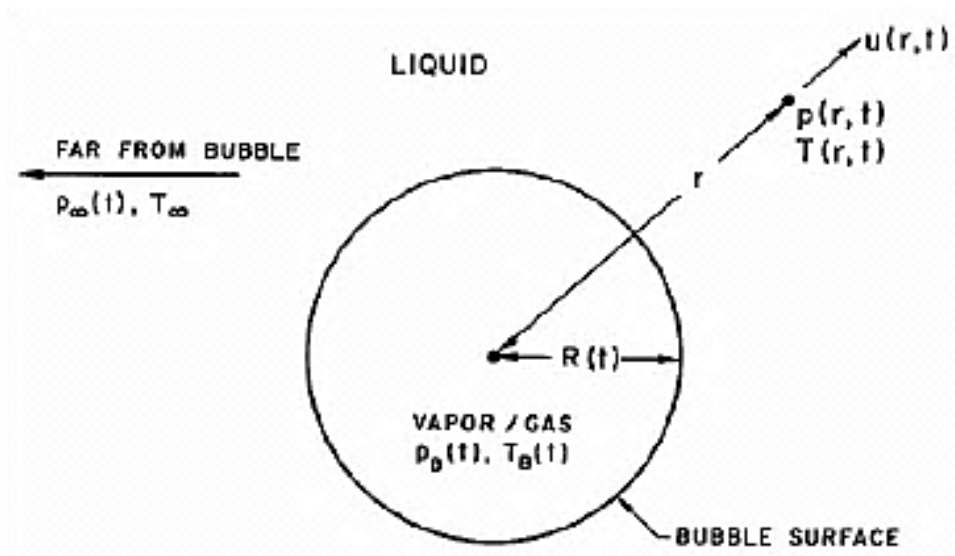


Obrázek 3. Nehomogenní tvoření dutin [7]

## 1.2 Teorie a dynamika kavitačních bublin

V předchozí části byl popsán vznik kavitačních dutin – bublin. Tyto bubliny pak tvoří kavitační oblast. Dle kinetické teorie u homogenních kapalin působí značné mezimolekulární síly, kdy k jejich odtržení je zapotřebí napětí přibližně  $10^9 \text{ N.m}^{-2}$  [37]. Toto napětí je závislé na teplotě a také na vazkosti dané kapaliny. Skutečná kapalina ovšem není zcela homogenní, obsahuje pevné částice o různých velikostech, dále obsahuje plyny, ať již v rozpuštěné nebo nerozpuštěné formě. Nejhorší vliv na celistvost kapaliny mají nerozpuštěné plyny a pevné částice, které se špatně smáčejí s danou kapalinou [37].

Růst kavitačních bublin a jejich zánik byl poprvé popsán v Rayleigh-Plessetově hypotéze [7], [8]. Tato hypotéza vychází ze zjednodušení, že kavitační jádro má tvar koule o poloměru  $R(t)$ . Tento poloměr dutiny je funkcí času  $t$  v nekonečně velké oblasti kapaliny, kde kapalina má tlak  $p_\infty(t)$  a teplotu  $T_\infty(t)$ .



Obrázek 4. Schéma dutiny v nekonečně velké oblasti kapaliny [7]

Zákon zachování hmoty je předepsán ve tvaru:

$$u(r, t) = \frac{F(t)}{r^2} \quad (1.2.1)$$

Vztah mezi  $F(t)$ , kde  $F(t)$  představuje tok hmoty přes stěnu bubliny, a  $R(t)$  je dán kinematickou okrajovou podmínkou na povrchu bubliny [7]. Při idealizovaném případě nulového přenosu hmoty přes stěnu bubliny ( $r = R$ ) je zřejmé:

$$u(r, t) = \frac{dR}{dt} \rightarrow F(t) = R^2 \cdot \frac{dR}{dt} \quad (1.2.2)$$

Tato aproximace je vhodná, ačkoli se vypařování nebo kondenzace, tedy přenos hmoty, vyskytuje právě na povrchu bubliny [7]. Dále je v této teorii popsána pohybová Navier-Stokesova rovnice pro newtonskou kapalinu ve směru  $r$ :

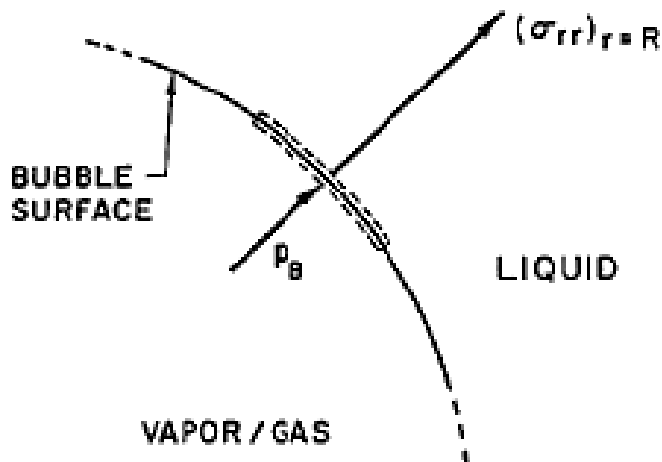
$$-\frac{1}{\rho_{LIQ}} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial r} - \nu_{LIQ} \cdot \left[ \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( r^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \right) - \frac{2 \cdot u}{r^2} \right] \quad (1.2.3)$$

Následně substitucí pomocí (1.2.1), zanedbáním viskózního členu, kde viskózní přínos do Rayleigh-Plessetovy rovnice vstupuje až přes dynamické podmínky na povrchu bubliny, je vyjádřen vztah [7]:

$$-\frac{1}{\rho_{LIQ}} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{dF}{dt} - \frac{2 \cdot F^2}{r^5} \quad (1.2.4)$$

po integraci, při užití okrajových podmínek  $p \rightarrow p_\infty$ ,  $r \rightarrow \infty$  je vyjádřena rovnice [7]:

$$\frac{p - p_\infty}{\rho_{LIQ}} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dF}{dt} - \frac{1}{2} \cdot \frac{F^2}{r^4} \quad (1.2.5)$$



Obrázek 5. Dynamická rovnováha na povrchu bubliny [7]

Pro dokončení této části teorie je brána v úvahu dynamická okrajová podmínka na povrchu bubliny [8]. Je uvažován kontrolní objem skládající se z malé, nekonečně tenké vrstvy obsahující část plochy bubliny. Síla na tuto nekonečně tenkou vrstvu, ve směru radiálním, ven z bubliny, na jednotkové ploše, je dána radiálním napětím  $\sigma_{rr}$ , tlakem plynu v bublině  $p_{VAP}$  a povrchovým napětím bubliny  $\sigma_S$ :

$$(\sigma_{rr})_{r=R} + p_{VAP} - \frac{2 \cdot \sigma_S}{R} \quad (1.2.6)$$

Protože napětí  $\sigma_{rr}$  je definováno:

$$\sigma_{rr} = -p + 2 \cdot \mu_{LIQ} \cdot \frac{du}{dr} \quad (1.2.7)$$

Po dosazení rovnice pro radiální napětí na povrchu bubliny  $\sigma_r$  (1.2.7) do rovnice pro sílu na jednotkové ploše (1.2.6) a za předpokladu  $r = R$  je odvozen vztah:

$$\begin{aligned} -p + 2 \cdot \mu_{LIQ} \cdot \frac{du}{dr} + p_{VAP} - \frac{2 \cdot \sigma_S}{R} \\ p_{VAP} - (p)_{r=R} - \frac{4 \cdot \mu_{LIQ}}{R} \cdot \frac{dR}{dt} - \frac{2 \cdot \sigma_S}{R} \end{aligned} \quad (1.2.8)$$

Při neuvažování přenosu hmoty skrz hranici bubliny (vypařování, kondenzace) musí být tato síla nulová (1.2.8). Využitím substituce pro tlak na povrchu bubliny  $(p)_{r=R}$  (1.2.8), a rovnice pro tok hmoty  $F$  (1.2.2) do rovnice (1.2.8) je vyjádřena Rayleigh-Plessetova rovnice pro dynamiku bubliny [7], [8], která popisuje tlak v bublině  $p$  a velikost bubliny  $R$  v závislosti na čase  $t$ . Upravením členů na pravé straně (1.2.5):

$$\begin{aligned} \frac{p_{VAP} - p_\infty}{\rho_{LIQ}} &= \frac{1}{r} \cdot \frac{dF}{dt} - \frac{1}{2} \frac{F^2}{r^4} + \frac{4 \cdot \mu_{LIQ}}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2 \cdot \sigma_S}{R} \\ \text{první člen: } \frac{1}{r} \cdot \frac{dF}{dt} &= \frac{1}{r} \cdot \frac{d\left(R^2 \frac{dR}{dt}\right)}{dt} = \left(\frac{1}{r} \cdot \left(2R \cdot \dot{R} \cdot \frac{dR}{dt} + R^2 \frac{d^2R}{dt^2}\right)\right)_{r=R} = \\ &= 2 \cdot \frac{dR}{dt} \cdot \frac{dR}{dt} + R \frac{d^2R}{dt^2} = 2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R \frac{d^2R}{dt^2} \\ \text{druhý člen: } \left(\frac{1}{2} \frac{F^2}{r^4}\right)_{r=R} &= \frac{1}{2} \frac{\left(R^2 \frac{dR}{dt}\right)^2}{R^4} = \frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{dF}{dt} - \frac{1}{2} \frac{F^2}{r^4} &= 2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + R \frac{d^2R}{dt^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \\ \frac{p_{VAP}(t) - p_\infty(t)}{\rho_{LIQ}} &= R \cdot \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{4 \cdot \mu_{LIQ}}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2 \cdot \sigma_S}{\rho_{LIQ} \cdot R} \end{aligned} \quad (1.2.9)$$

Při zanedbání posledních dvou členů, viskózního členu a členu vyjadřující povrchové napětí, následné použití aproximace prvního řádu, je dostána rovnice, která je následně vyřešena při známém tlaku kapaliny  $p_\infty(t)$ . Po těchto úpravách je výsledný tvar Rayleigh-Plessetovy rovnice popisující poloměr dutiny  $R$  v závislosti na čase  $t$  [7]:

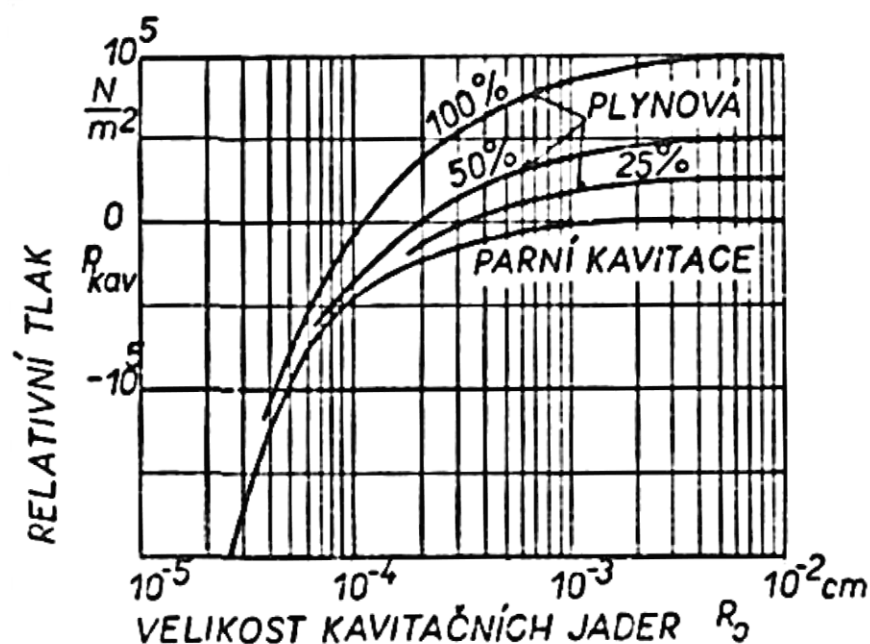
$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{VAP}(t) - p_\infty(t)}{\rho_{LIQ}}} \quad (1.2.10)$$

Důležité je zde poznamenat, že uvedený postup neuvažuje vliv teploty. Rovnice (1.2.5) se při uvažování teploty rozšíří na pravé straně o člen popisující obecně polytropickou změnu tlaku plynu  $p_{GAS}$  jako funkci počátečního poloměru  $R_0$  a poloměru  $R$  a empirické konstanty, která nabývá různých hodnot dle uvažované stavové změny [8].



### 1.3 Vliv fyzikálních vlastností tekutiny na kavitaci

Mezi významné činitele z hlediska fyzikálních vlastností tekutin ovlivňující kavitaci proces lze zahrnout povrchové napětí, viskozitu, obsah plynu v kapalině, termodynamické vlivy, stlačitelnost vzniklé směsi a mnohé další. Dle (1.2.8) pro povrchové napětí  $\sigma_s$  se snižuje kavitací tlak při zvyšování povrchového napětí tekutiny. Zpomaluje se tedy růst, ovšem urychluje se zánik vytvořené dutiny. Velký vliv má také počet kavitacích jader, pokud počet kavitacích jader roste, snižuje se povrchové napětí kapaliny [37].



Graf 1. Vliv velikosti kavitacích jader na počátek výskytu kavitace [37]

Vliv viskozity není zatím dostatečně objasněn. Teorie vychází z toho, že ve viskózní kapalině je růst bubliny pomalejší nežli v ideální kapalině. Experimentální výsledky ovšem podávají i protichůdné výsledky. To může být způsobeno dobou poločasu rozpuštění vzduchu  $t_p$ , která může být pro některé tekutiny až v řádech stovek sekund [37], [38].

Při zvyšující se teplotě se zlepšují antikavitací vlastnosti. To je vysvětleno termodynamickým účinkem tekutiny na kavitaci. Při kavitaci je nutné z okolí kavitací bubliny přivést do kavitací bubliny teplo, aby došlo v tomto místě k odpařování. Pro posouzení termodynamického vlivu je zavedeno termodynamické kritérium dle Stahla a Stepanoffa, známé pod pojmem index kavitace [37].

Další faktor ovlivňující kavitaci je obsah nerozpuštěného vzduchu, ten se řídí Henryho zákonem ve tvaru [12], [38]:

$$V_{GAS} = V_{LIQ} \cdot \alpha_V \cdot \frac{p}{p_0} \quad (1.3.1)$$

$V_{GAS}$  představuje objem plynu rozpuštěného v kapalině,  $V_{LIQ}$  je objem kapaliny,  $p$  je absolutní tlak na hladině a  $p_0$  je tlak atmosférický. Významnou roli zde hraje součinitel rozpustnosti plynu v kapalině  $\alpha_V$ , kde pro vodu nabývá hodnot přibližně 0,02, pro minerální olej 0,08 až 0,09 [12], viz Tabulka 2. Uvedené součinitele rozpustnosti plynu v kapalině  $\alpha_V$  platí pro vzduch.

Parametry nejčastěji užívaných kapalin ovlivňující vznik a vývoj kavitace:

Vlastnost	Rozměr	Kapalina			
		voda	minerální olej	polyglykol-voda	syntetická kapalina
Hustota $\rho_{LIQ}$ při 20°C	[kg.m <sup>-3</sup> ]	1000	870 až 900	1010 až 1090	1100 až 1300
Modul objemové pružnosti $K_{LIQ}$	[Pa]	2,2.10 <sup>9</sup>	1,6.10 <sup>9</sup>	(3 až 3,5).10 <sup>9</sup>	(2,3 až 3).10 <sup>9</sup>
Povrchové napětí $\sigma_S$	[N.m <sup>-1</sup> ]	7,3.10 <sup>-2</sup>	3,5.10 <sup>-2</sup>	(3 až 4).10 <sup>-2</sup>	(2,5 až 4,5).10 <sup>-2</sup>
Bunsenův součinitel $\alpha_V$	[1]	0,02	0,08 až 0,1	0,01 až 0,02	0,08 až 0,09
Tlak nasycených par kapalin $p_{VAP}$	[Pa]				
při 50 °C	[Pa]	0,12.10 <sup>5</sup>	4,7.10 <sup>-3</sup>	0,08.10 <sup>5</sup>	2
při 70 °C	[Pa]	0,31.10 <sup>5</sup>	4,0.10 <sup>-2</sup>	0,18.10 <sup>5</sup>	13
Kinematická viskozita $u_{LIQ}$	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]				
při 20 °C	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	1.10 <sup>-6</sup>	1,02.10 <sup>-4</sup>	0,89.10 <sup>-4</sup>	1,48.10 <sup>-4</sup>
při 40 °C	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	0,6.10 <sup>-6</sup>	0,37.10 <sup>-4</sup>	0,37.10 <sup>-4</sup>	0,37.10 <sup>-4</sup>
při 60 °C	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	0,4.10 <sup>-6</sup>	0,17.10 <sup>-4</sup>	0,18.10 <sup>-4</sup>	0,16.10 <sup>-4</sup>

Tabulka 2. Fyzikální vlastnosti vybraných kapalin [38]

## 2. Kavítace v tekutinových systémech

Z hlediska zkoumání kavítace je důležité se věnovat především sacímu potrubí a samotnému čerpadlu, kde nesprávným návrhem těchto prvků dochází často právě ke kavítaci. Základní dělení čerpadel je na hydrostatická (převažuje tlaková energie) a hydrodynamická (převažuje kinetická energie), zde je řešena kavítace v hydrodynamických čerpadlech. Hydrodynamická čerpadla pracují na principu předání mechanické energie oběžného kola tekutině ve formě kinetické a ta se z části v oběžném kole, následně v rozváděcím prostředí, mění na energii tlakovou [38].

V potrubí lze dosáhnout kavítace tehdy, když má potrubí velké ztráty, ať již místní či třecí. Velkou roli rovněž hraje teplota kapaliny v potrubí, obsah vzduchu v potrubí a další faktory. Při průtoku kapaliny potrubím je žádoucí dosáhnout konstantní rychlosti. Ale např. koroze nebo různé nečistoty mění rychlost. Při tom když se změní rychlost, změní se i tlak. Velkým problémem jsou neodstraněné otřepy po řezání, svařování, které mohou způsobit vznik turbulencí, časem se můžou uvolnit a putují do oběžného kola čerpadla, kde můžou ulpět na funkčních částech čerpadla, jako například ložiska, těsnění, ucpávky, způsobit jejich poškození, popř. zadření celého čerpadla. Existuje několik obecných rad, které pomáhají předcházet kavítaci, např. vzdálenost deseti průměrů potrubí mezi sáním čerpadla a první tvarovou změnou potrubí (koleno, T-kus), nebo při uspořádání vícenásobných čerpadel se snažíme mít sací jímku v oddělených částech tak aby jedno sání pumpy nezasahovalo do sání druhého čerpadla [9].



Obrázek 6. Typický vzhled kavitačního působení na povrch [21]

## 2.1 Kavitace v čerpadlech

Tvar oběžného kola je charakterizován součinitelem rychloběžnosti  $n_b$ , pro kola radiální nabývá hodnot  $n_b = 0,016$  až  $0,18$ , pro kola diagonální  $n_b = 0,15$  až  $0,37$ , pro kola axiální  $n_b = 0,37$  až  $1,0$  [11]. Statický tlak  $p$  na vstupu do hydrodynamického čerpadla musí vytvořit dostatečnou tlakovou rezervu, aby při proudění v čerpadle nenastal pokles tlaku pod tlak nasycených par.

Popis vzniku, popř. stupeň vývinu kavitace lze vyjádřit pomocí čisté, někdy se uvádí kritické, sací měrné energie čerpadla  $\Delta y$  [11]:

$$\Delta y = \frac{p_S - p_{VAP}}{\rho_{LIQ}} + \frac{u_S^2}{2} \quad (2.1.1)$$

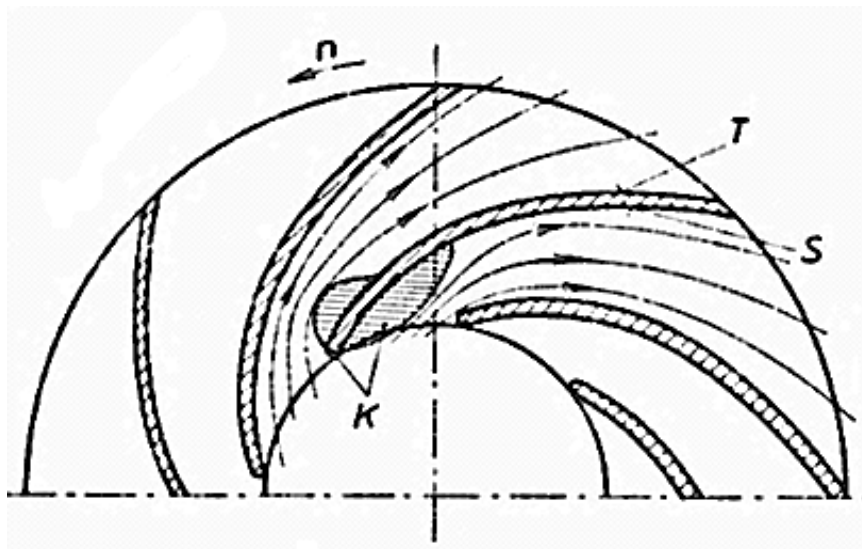
Hodnota  $\Delta y$  se získává pomocí kavitační zkoušky, kdy při průtoku  $Q = konst.$  je snižován v sání čerpadla tlak  $p_S$  a je měřena měrná energie čerpadla  $Y_S$ . Tam kde měrná energie poklesne o 3%, je nalezen bod kritické kavitační měrné energie  $\Delta y$ . Následně dovolená hodnota kavitační deprese  $\Delta y_{DOV}$ , kdy tato hodnota je směrodatná pro bezkavitační provoz se stanovuje dle rovnice (2.1.2), a také je možné stanovit dovolenou sací výšku  $h_{S,DOV}$  (2.1.3) [11]:

$$\Delta y_{DOV} \geq 1,15 \cdot \Delta y \quad (2.1.2)$$

$$h_{S,DOV} = \frac{p_S - p_{VAP}}{\rho_{LIQ} \cdot g} - \frac{\Delta y_{DOV}}{g} - h_{ZS} \quad (2.1.3)$$

Pokud dovolená sací výška vyjde kladná, čerpadlo se umístí nad hladinu tekutiny v nádrži (podtlaková dispozice), jestliže ovšem vyjde záporná, čerpadlo se umístí pod hladinu tekutiny v nádrži (nátoková dispozice) [11].

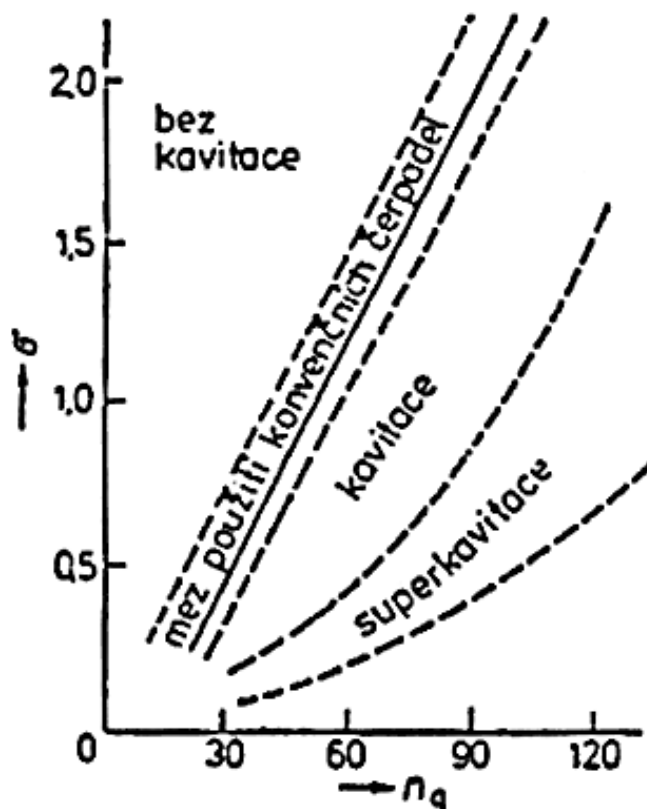
Kavitace na oběžném kole hrozí převážně v oblasti vstupní části lopatek, především na sací straně lopatky, kde je velká rychlost proudící kapaliny a zároveň oběžné kolo nepředá kapalině v této oblasti dostatečnou energii. Při dostatečně vysoké hodnotě čisté sací měrné energie  $\Delta y$  je každé čerpadlo schopno bezkavitačního režimu. V čerpadle jsou rozeznávány dva druhy kavitace: plošná kavitace a kavitace způsobená odtržením od proudu [37].



Obrázek 7. Kavitační oblast K v oběžném kole, T – tlaková strana lopatky, S – sací strana lopatky [38]

V praxi se vyskytuje bezrozměrný Thomův kavitační součinitel  $\sigma$ , lze ho vyjádřit graficky v závislosti na rychloběžnosti  $n_b$ , na měrných specifických otáčkách  $n_s$  a měrných objemových otáčkách  $n_q$ . Základní vztah Thomova součinitele  $\sigma$  [37], [11]:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{Y_S} \quad (2.1.4)$$



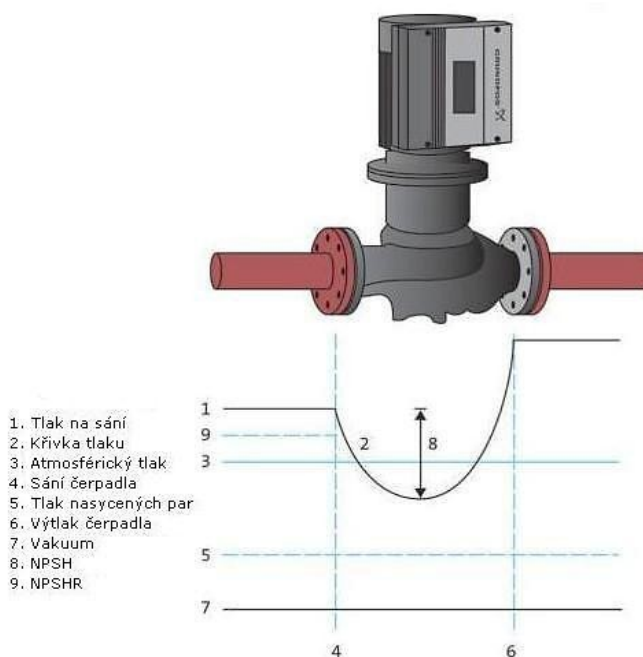
Graf 2. Kavitační oblast hydrodynamických čerpadel [11]

Další používaný termín, který výrobci uvádí v katalogových listech čerpadel, je skryt pod zkratkou *NPSH* (Net Positive Suction Head), neboli dovolená sací výška, také kavitační deprese [11]:

$$NPSH = \frac{\Delta y}{g} \quad (2.1.5)$$

Tato hodnota vyjadřuje minimální absolutní tlak, vyjádřena v [m]. Tento absolutní tlak musí být přiveden na vstup do sání čerpadla k vyloučení kavitace. Převodní konstantou mezi kritickou měrnou energií čerpadla  $\Delta y$  a *NPSH* tvoří tíhové zrychlení  $g$ . Hodnota *NPSH* je funkcí průtoku  $Q$ , kdy se zvyšujícím se průtokem se zvyšuje hodnota *NPSH*.

Na kavitaci v čerpadle má vliv mnoho dalších faktorů např. teplota dopravované látky, průměr sací příruby oběžného kola, vstupní úhel lopatky, s tím související vstupní ráz, cirkulace proudu v kavitační oblasti. Podrobnější popis této problematiky je uveden v dostupné literatuře [11], [37], [38].



Obrázek 8. Průběh tlaku v čerpadle [39]

V oběžném kole čerpadla je možno rozlišovat několik základních druhů a příčin kavitace [9], [13]. První kavitací vyskytující se v oběžném kole čerpadla, je kavitace v sání, která je způsobená právě nižší hodnotou dovolené sací výšky než je požadovaná hodnota  $NPSH_R$ . Když tekutina vstupuje do čerpadla, je rychlost zvyšována v důsledku poklesu tlaku na vstupu čerpadla. Když tento tlak klesne příliš nízko, tekutina se začne vypařovat a tvoří se první kavitační bubliny. Tyto bubliny pak následně zanikají v oblastech vyššího tlaku.



Příčiny této kavitace můžou být v zaneseném sacím potrubí, kdy se zvyšuje odpor kapaliny proti pohybu a tím dochází k tlakové ztrátě. Nebo příliš dlouhým sacím vedením, kde můžou převažovat ztráty třením, proto je snaha sací potrubí mít co nejkratší pro eliminaci této příčiny. Další příčiny vzniku tohoto druhu kavitace mohou být příliš malý průměr sacího potrubí, příliš velká sací výška, ventil v sacím potrubí je jen částečně otevřen aj. [9].

Druhý druh kavitace je oběhová kavitace [9]. Je způsobena nízkým průtokem a tedy nízkou rychlostí proudění skrz čerpadlo. Jsou známy dva druhy této kavitace, které můžou působit společně nebo každá zvlášť a působí v sání čerpadla a ve výstupní části čerpadla. Sací oběhová kavitace nastává, když kapalina vstupující do sání čerpadla je opačně orientovaná v důsledku vysoké rychlosti vírů buď v, nebo blízkosti, ústí oběžného kola, v sacím otvoru, nebo v potrubí blízko sacího otvoru. Vysoká rychlost způsobí místní snížení tlaku, ten může klesnout pod tlak nasycených par kapaliny a začne se projevovat kavitace. Kavitační opotřebením je možné pozorovat na tlakové straně lopatek oběžného kola blízko ústí do oběžného kola. Projevuje se hlasitým třeskáním, praskáním, tlučením, klepáním. Výtlačná oběhová kavitace vzniká při nízké průtokové rychlosti na výstupu z oběžného kola nebo na výstupním otvoru do difuzoru čerpadla. V důsledku nízké rychlosti průtoku a vysoké rychlosti vírů mezi dvěma směry průtoků se sníží tlak, pokud tento tlak se sníží až na tlak nasycených par, vznikne kavitace. Hlučnost na výstupní hraně je obvykle menší v porovnání s hlučností způsobeným v sacím otvoru.

Dalším druhem kavitace je počínající kavitace [9]. Vyskytuje se v mnoha čerpadlech po celý čas provozu. Příčinou jsou turbulence tvořené oběžným kolem, mající za následek snížení tlaku pod tlak nasycených par. V oběžných kolech, všudypřítomný výskyt počínající kavitace způsobí malé poškození a malé ztráty na výkonu, proto této kavitaci není přikládána obvykle důležitost. S touto kavitací souvisí pojem  $NPSH_i$  (Net Positive Suction Head Inception) [9], jedná se o výšku tekutiny, měřenou na vstupním otvoru oběžného kola, při které je veškerá kavitace uvnitř čerpadla potlačena.

Jedním z dalších druhů kavitace je tzv. syndrom nestálé lopatky [9]. Tato kavitace vzniká, když lopatka oběžného kola se nahne, nebo když je hrana lopatky příliš podbroušena. Toto opotřebením vyplývá z přílišné turbulence vždy, když lopatka prochází proudem způsobeným kavitací, pulsacemi. Místo poškození je charakteristickým znakem této kavitace. Poškození je možné pozorovat uprostřed náběžné hrany vstupního otvoru, nebo na výstupní straně pláště oběžného kola.

## 2.2 Kavitace v potrubí

Z hlediska výskytu kavitace v potrubí je nejčastější jev v oblasti sacího potrubí, kde hydraulické ztráty, ať již ztráty třením či místní ztráty v zúžení či kolenech a sacích koších způsobí pokles tlaku  $p$  na hodnotu tlaku nasycených par  $p_{VAP}$ . Tekutina se stane dvoufázovou směsí, kde zpočátku kavitace se bublinky rovnoměrně rozkládají v proudu kapaliny, při dalším snižování tlaku se bublinky zvětšují, shlukují se a spojují v horní části potrubí. Kavitační oblast zabírá část průřezu potrubí a mohou se vytvářet parní zátky [37]. Pro bezkavitační provoz, při uvažování ztrát třením třecím součinitelem  $\lambda$ , musí rychlost proudění  $u$  splňovat podmínku (2.2.1) pro potrubí délky  $l_P$  a průměru  $d_P$ , pro ztráty místní podmínku (2.2.2):

$$u \leq \sqrt{\frac{2(p - p_{VAP})}{\rho_{LIQ} \cdot \lambda \cdot \frac{l_P}{d_P}}} \quad (2.2.1)$$

$$u \leq \sqrt{\frac{2(p - p_{VAP})}{\rho_{LIQ} \cdot \zeta}} \quad (2.2.2)$$

Součinitel místních ztrát  $\zeta$  může představovat celkovou hodnotu ztrát třením i ztrát místních. Zároveň bude konstantní jen do určité hodnoty kavitačního součinitele  $\sigma$ , kavitační součinitel  $\sigma_C$  je dán vztahem [37]:

$$\sigma_C = \frac{p - p_{VAP}}{\left(\frac{\rho_{LIQ}}{2}\right) \cdot u^2} \quad (2.2.3)$$

Pokud hodnota kavitačního součinitele je dostatečně velká (tlak  $p$  je dostatečně velký v porovnání s tlakem nasycených par  $p_{VAP}$ , nebo rychlost proudění  $u$  je dostatečně malá), bude se vyskytovat pouze jednofázový tok. Při snižování hodnoty kavitačního součinitele  $\sigma_C$  bude prvně zaznamenán vznik kavitačních jader. V tomto okamžiku je možné definovat veličinu  $\sigma_I$ , což je počáteční kavitační číslo. Tato veličina je definována [7]:

$$\sigma_I = -C_{PMIN} = -\left(\frac{p(x_I) - p_\infty}{\left(\frac{\rho_{LIQ}}{2}\right) \cdot u_\infty^2}\right) \quad (2.2.4)$$

kde  $C_{PMIN}$  představuje minimální tlakový koeficient, což představuje rozdíl tlaku  $p(x_I)$  na některém místě obtékaného tělesa a tlaku  $p_\infty$  v místě, kde proudění není ovlivněno obtékáním, vztaženo na dynamický tlak v tomto místě. Rozsah počátečního kavitačního čísla  $\sigma_I$  se udává dle různých autorů [7], v rozmezí 0 až 1.



### 3. Numerické modelování kavitace

V této části diplomové práce jsou uvedeny zvolené způsoby zkoumání kavitačního jevu. Numerické modelování je rozděleno na dvě části, které jsou na následujících stranách popsány a objasněny podrobněji.

V první části pro zkoumání fyzikální podstaty kavitačního děje je využito modelování metodou konečných objemů, přesněji užitím komerčního systému Ansys Fluent. Jsou popsány matematické modely pro modelování kavitace, je uveden rozbor problematiky simulace daných směsí, jejich fyzikální vlastnosti a pracovní postup simulace, který vedl k výsledkům uvedeným v poslední části. Druhá část této kapitoly je zaměřena na samotný výskyt kavitace v simulovaném obvodu, jehož předlohou bude reálná trať. Pro tuto simulaci je využita metoda elektrohydraulické analogie, program Matlab, systém Simulink – Simscape – SimHydraulics. V této části jsou uvedeny jednotlivé prvky užití v obvodu, parametry, kterými jsou definovány jednotlivé prvky a postup sestavení obvodu pro prezentování výsledků této části simulace v závěru práce.

Metoda konečných objemů (MKO) [29], [30] řeší integrální neboli parciální diferenciální rovnice, které popisují proudění jak stlačitelných tak nestlačitelných tekutin. Diskrétní objemy, které mají konečnou velikost, se definují užitím non-staggered schématu [30], kdy proměnné jsou definovány a počítány ve středech konečných objemů, podrobněji viz literatura [30]. Princip této metody lze vystihnout těmito body [30]:

- oblast je rozdělena na diskrétní konečné objemy pomocí obecné, křivočaré sítě,
- vyhodnocování neznámých veličin v jednotlivých konečných objemech a diskretizace,
- diskretizované rovnice v obecném tvaru jsou numericky řešeny.

Metoda elektrohydraulické analogie (MEA) [30], [31] umožňuje numericky modelovat tekutinové mechanismy jako celek, skládající se z jednotlivých bloků, kde tyto bloky reprezentují reálné tekutinové prvky. Grafické značky tekutinových prvků jsou založeny na základě normy ISO 1219 standartních silových kapalin [30]. Modelovací nástroj Matlabu SimHydraulics umožňuje modelování tzv. multi-domain systémů obsahující propojení hydraulických a mechanických prvků. Model vzniká propojením prvků, které jsou vybrány z knihovny komponent. SimHydraulics sám vytvoří rovnice popisující jednotlivé prvky a automaticky je propojí v systému, vytvoří konstanty charakterizující kapalinu, potrubí a nakonec algebraické a diferenciální rovnice pro řešení systému [30].

### 3.1 Metoda konečných objemů

V první kapitole je zmíněno, že tekutina při kavitaci bude směs kapaliny, páry a vzduchu nerozpuštěného ve formě bublin. Pro potřeby programu Ansys Fluent je tato směs popsána modelem směsi *Mixture*, kdy je definováno  $n_k$  počet fází a dvourovnicevým  $k$ - $\varepsilon$  *RNG* modelem. Podrobnější popis vícefázového proudění je možné nalézt v literatuře [26]. Definice rovnice kontinuity pro model směsi [56]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{MIX}) + \nabla \cdot (\rho_{MIX} \overline{u_{MIX}}) = 0 \quad (3.1.1)$$

$\overline{u_{MIX}}$  je vektor průměrné rychlosti směsi,  $\rho_{MIX}$  je hustota směsi definovaná:

$$\rho_{MIX} = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot \rho_k \quad (3.1.2)$$

$\alpha_k$  je objemový zlomek fáze  $k$ ,  $\rho_k$  je hustota fáze  $k$ .

Pohybová rovnice pro  $n_k$  směsí je dána součtem jednotlivých pohybových rovnic všech fází  $k$ :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_{MIX} \overline{u_{MIX}}) + \nabla \cdot (\rho_{MIX} \overline{u_{MIX}} \overline{u_{MIX}}) = \\ & = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{MIX}(\nabla \overline{u_{MIX}} + \overline{u_{MIX}}^T)] + \\ & + \rho_{MIX} \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^{n_k} \alpha_k \rho_k \overline{u_{dr,k}} \overline{u_{dr,k}} \right) \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Člen  $\overline{u_{MIX}} \overline{u_{MIX}}$  značí dyadický součin dvou vektorů rychlosti  $u$ ,  $\vec{F}$  je objemová síla,  $\mu_{MIX}$  je dynamická viskozita směsi,  $\overline{u_{dr,k}}$  je unášivá rychlost, která je definována [56]:

$$\overline{u_{dr,k}} = \overline{u_k} - \overline{u_{MIX}} \quad (3.1.4)$$

Rovnice energie [56] pro model směsi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^{n_i} (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^{n_i} (\alpha_k \overline{u_k} (\rho_k E_k + p_k)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3.1.5)$$

$k_{eff}$  je efektivní součinitel tepelné vodivosti, první člen na pravé straně reprezentuje energii přeměněnou kondukcí,  $S_E$  zahrnuje i objemový zdroj tepla [56].

*RNG*  $k$ - $\varepsilon$  model je odvozen z přesné statistické metody, která se nazývá teorie renormalizačních skupin [56]. Oproti modelu  $k$ - $\varepsilon$  *Standard*, tento model upravuje pomocí metody *RNG* Navier-Stokesovy rovnice a přidává k nim výrazy a funkční závislosti pro  $k$  a  $\varepsilon$ . Postup aplikace metody *RNG* na turbulentní model je popsán v literatuře [29]. Přenosové rovnice [56] směsi pro turbulentní kinetickou energii  $k$  (3.1.6) a rychlost disipace  $\varepsilon$  (3.1.7):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{MIX} \cdot k) + \nabla \cdot (\rho_{MIX} k \overline{u_{MIX}}) = \\ & = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{eff} \nabla k) + G_k + G_b - \rho_{MIX} \cdot \varepsilon - Y_M + S_K \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{MIX} \cdot \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_{MIX} \varepsilon \overline{u_{MIX}}) = \\ & = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_{1e} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3e} \cdot G_b) - \\ & \quad - C_{2e} \cdot \rho_{MIX} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{eRNG} + S_e \end{aligned} \quad (3.1.7)$$

Člen  $G_k$  představuje tvoření turbulentní kinetické energie v důsledku gradientu unášivé rychlosti,  $G_b$  je tvoření turbulentní kinetické energie v důsledku vztlačových sil,  $Y_M$  reprezentuje příspěvek rozšiřování fluktuací ve stlačitelné turbulenci k celkové rychlosti disipace,  $\alpha_k$  resp.  $\alpha_\varepsilon$  představují inverzní hodnotu Prandtlova čísla pro  $k$  a  $\varepsilon$ ,  $S_K$  a  $S_e$  jsou zdrojové členy definovány uživatelem [56].

Při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla je turbulentní viskozita směsi  $\mu_{eff}$  [56]:

$$\mu_{eff} = \rho_{MIX} \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.1.8)$$

Konstanty pro užitý model *RNG*  $k$ - $\varepsilon$  [56]:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0,0845 \\ C_{1e} &= 1,42 \\ C_{2e} &= 1,68 \\ Pr_{WALL} &= 0,85 \end{aligned} \quad (3.1.9)$$

Konstanta  $C_{3e}$  (3.1.7) vyjadřuje stupeň ovlivnění rychlosti disipace  $\varepsilon$  vztlačovými silami a je počítána dle teorie uvedené v literatuře [56] vztahem:

$$C_{3e} = \tanh \cdot \left| \frac{u_R}{u_K} \right| \quad (3.1.10)$$

kde člen  $\tanh$  představuje hyperbolický tangens, člen  $u_R$  představuje složku rychlosti rovnoběžnou s vektorem gravitačního zrychlení a člen  $u_K$  představuje složku rychlosti kolmou na vektor gravitačního zrychlení.

### 3.1.1 Kavitační modely, Schnerr-Sauer model

Kavitační modely matematicky popisují přenos hmoty z kapalně fáze do plynné a naopak. Základní rovnice a princip přenosu hmoty v kapalině jsou popsány v literatuře [23]. V programu Ansys Fluent je možno volit ze tří kavitačních modelů [56]:

- Singhalův tzv. plně kavitační model, s užitím modelu směsi, je schopen řešit k-fázové proudění nebo proudění s vícefázovým přenosem částic, účinky smykové rychlosti mezi kapalinou a plynnou fází, tepelné účinky a stlačitelnost jak kapaliny, tak plynné fáze,
- Zwart-Gerber-Belarmi model, užití s modelem směsi, nebo s Eulerovým vícefázovým modelem,
- Schnerr-Sauerův model, užití s modelem směsi, nebo s Eulerovým vícefázovým modelem.

Poslední dva jmenované modely nezahrnují v základním nastavení účinek nekondenzujících plynů. Všechny tyto kavitační modely jsou postaveny na základě Rayleigh-Plessetovy rovnice popisující růst jednotlivých parních bublin v kapalině. Modely mají ovšem i omezení, z nichž nejdůležitější jsou [56]:

- pro zkoumání kavitačního proudění může být definována pouze jedna kapalina,
- primární fáze musí být kapalina, sekundární fáze musí být pára, toto je slučitelné pouze s vícefázovým modelem směsi.

Při multifázovém kavitačním modelování tvoří základ dvoufázový kavitační model sestávající se ze standardních rovnic viskózního proudění řídicí přenos směsi (*Mixture model*) a obecného turbulentního modelu (*k-ε model*). Přenos hmoty kapalina – pára, neboli vypařování a kondenzace je dán přenosovou rovnicí páry [56]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{VAP} \cdot \rho_{VAP}) + \nabla \cdot (\alpha_{VAP} \rho_{VAP} \overline{u_{VAP}}) = R_e - R_c \quad (3.1.11)$$

kde index *VAP* značí parní fázi,  $\alpha$  – objemový zlomek páry,  $\overline{u_{VAP}}$  – vektor rychlosti parní fáze,  $R_e$ ,  $R_c$  – představují zdrojové členy přenosu hmoty vztahované k růstu a zániku parních bublin,  $R_e$  – vypařování,  $R_c$  – kondenzace. Vyjádřená rovnice Rayleigh-Plessetova [56]:

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{VAP}(t) - p_{\infty}(t)}{\rho_{LIQ}}} \quad (3.1.12)$$

Pro modelování kavitačního děje je vybrán model *Schnerr-Sauer*. Tento model je již ověřen, vykazuje nejlepší výsledky v porovnání s experimentem a také poměrně dobrou stabilitu výpočtu [6]. Další výhodou tohoto modelu je, že umožňuje vyhodnocování středovaných veličin (*Unsteady Statistics*).

*Schnerr-Sauer* model definuje přesný vztah pro kladný přenos hmoty z kapaliny do páry (vypařování). Rovnice popisující objemový zlomek páry v základním tvaru [56]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{VAP} \cdot \rho_{VAP}) + \nabla \cdot (\alpha_{VAP} \rho_{VAP} \vec{u}_{VAP}) = \frac{\rho_{VAP} \cdot \rho_{LIQ}}{\rho_{MIX}} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (3.1.13)$$

kde index *VAP* značí plynnou fázi, *LIQ* značí kapalnou fázi, *MIX* značí směs kapaliny a plynu. Člen na pravé straně představuje kladný zdrojový člen přenosu hmoty. Tento model využívá výraz, který vyjadřuje vztah mezi objemovým zlomkem páry  $\alpha_{VAP}$  a hustotu kavitačních zárodků  $n_B$  [56]:

$$\alpha_{VAP} = \frac{n_B \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_B^3}{1 + n_B \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_B^3} \quad (3.1.14)$$

$n_B$  představuje hustotu kavitačních zárodků v kapalině,  $R_B$  poloměr bubliny.

Obecná rovnice pro rychlost přenosu hmoty  $R_{e,c}$  [56]:

$$R_{e,c} = \frac{\rho_{VAP} \cdot \rho_{LIQ}}{\rho_{MIX}} \cdot \alpha_{VAP} (1 - \alpha_{VAP}) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{VAP}(t) - p_{\infty}(t)}{\rho_{LIQ}}} \quad (3.1.15)$$

a pro poloměr bubliny  $R_B$  [56]:

$$R_B = \left( \frac{\alpha_{VAP}}{1 - \alpha_{VAP}} \cdot \frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{n_B} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.1.16)$$

Dosazením rovnice (3.1.14) do rovnice (3.1.13) na pravou stranu a následnou úpravou dle předepsané derivace jsou získány vztahy pro zdrojové členy  $R_e$ ,  $R_c$ .

Pokud  $p_{VAP} \geq p$  – nastane vypařování, pak zdrojový člen [56] vypařování  $R_e$ :

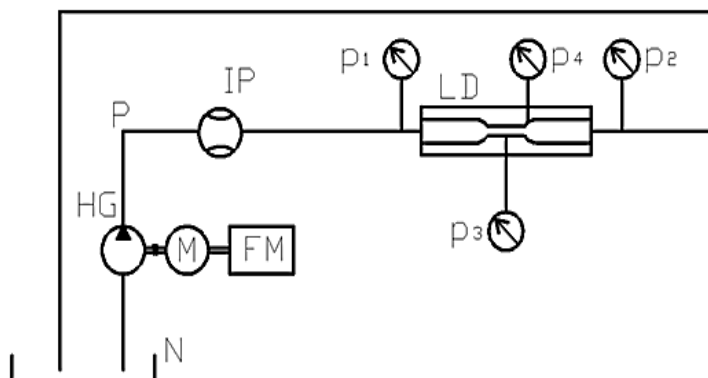
$$R_e = \frac{\rho_{VAP} \cdot \rho_{LIQ}}{\rho_{MIX}} \cdot \alpha_{VAP} (1 - \alpha_{VAP}) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{VAP}(t) - p_{\infty}(t)}{\rho_{LIQ}}} \quad (3.1.17)$$

a pokud  $p_{VAP} \leq p$  – nastane kondenzace, pak zdrojový [56] člen kondenzace  $R_c$ :

$$R_c = \frac{\rho_{VAP} \cdot \rho_{LIQ}}{\rho_{MIX}} \cdot \alpha_{VAP} (1 - \alpha_{VAP}) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_{\infty}(t) - p_{VAP}(t)}{\rho_{LIQ}}} \quad (3.1.18)$$

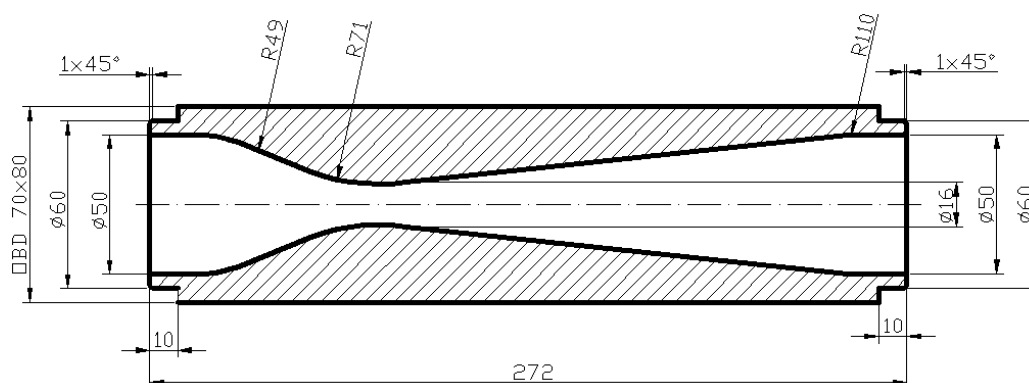
### 3.1.2 Experimentální zařízení, geometrie výpočetní sítě

Jak již bylo řečeno, je dobré mít pro matematickou simulaci metodou konečných objemů možnost kontroly v podobě fyzikálního experimentu. V laboratoři místnost N 108 je umístěn hydraulický obvod pro sledování kavitace v Lavalově dýze [5]. Kapalina, která je používána v obvodu, je voda.



Obrázek 9. Hydraulické schéma experimentálního zařízení s Lavalovou dýzou [5]  
*N – nádrž, FM – frekvenční měnič, M – elektromotor, HG – hydrogenerátor, P – potrubí, IP – průtokoměr,  $p_1$  až  $p_4$  – snímání tlaku, LD – Lavalova dýza [5]*

Lavalova dýza je zařízení, které se nejprve zužuje po průřezu a následně opět rozšiřuje. Při zúžení dojde k nárůstu rychlosti proudění a zároveň ke snížení tlaku, což může vést k poklesu tlaku, až pod tlak nasycených par. Při rozšiřování se rychlost zmenšuje a vlivem odtržení od proudu vzniká kavitace. Lavalova dýza je vyrobena z Tecanatu, který má vynikající rázovou pevnost, odolá teplotě až 120 °C a je především z průhledného materiálu, což umožňuje sledovat v reálu kavitaci oblast [5].



Obrázek 10. Náčrt Lavalovy dýzy [6]

Postup vysíťování geometrie, definování okrajových podmínek (Vstup, Vystup, Stěna, Osa) Lavalovy dýzy je uveden v literatuře [6], pro potřeby simulace je převzata geometrie již vysíťována, počet buněk je 61 610.

### 3.1.3 Numericky modelované tekutiny

Úkolem v této části práce je porovnat množství páry vody (referenční tekutina) s tekutinami, které jsou zadány podnikem Hutní PROJEKT Frýdek-Místek, a. s., pro zvolenou teplotu 30 °C. V tabulce jsou uvedeny fyzikální parametry pro vodu, jak pro kapalinu (liquid), tak pro páru (vapor), dále je uveden tlak nasycených par vody  $p_{VAP}$  a počet kavitačních jader  $n_B$ , které pro simulování kavitačního děje modelem *Schnerr-Sauer* je potřeba definovat, výpočet viz Příloha A, [47].

Látka	$\rho_i$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\mu_i$ [Pa.s]	$p_{VAP}$ [Pa]	$n_B$ [m <sup>-3</sup> ]
H <sub>2</sub> O - liquid	995,61	0,0007974	4220	1,99.10 <sup>9</sup>
H <sub>2</sub> O - vapor	0,030415	0,00001		

Tabulka 3. Fyzikální parametry pro vodu [47]

Referenční kapalina (voda) je porovnávána s kapalinami dle zadání, jsou to [16]:

- Vypírací roztok,
- NH<sub>3</sub> voda,
- Nasycený roztok,
- Dehtový kondenzát.

Výše uvedené látky jsou definovány fyzikálními parametry a chemickým složením roztoku. Příkladem jsou uvedeny parametry pro dané roztoky při teplotě 30 °C, popis fyzikálních parametrů a chemického složení jednotlivých roztoků jsou uvedeny v Příloze A.

Látka	$\rho_i$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\mu_i$ [Pa.s]
Vypírací roztok (VR)	1030	0,00095
NH <sub>3</sub> voda (NH <sub>3</sub> )	1000	0,0008
Nasycený roztok (NR)	1020	0,001235
Dehtový kondenzát (DKA)	1200	0,001235
Dehtový kondenzát (DKB)	1020	0,001235

Tabulka 4. Fyzikální parametry pro roztoky [16]

Pozn.: Dehtový kondenzát je rozdělen na dva roztoky, které se liší hustotou  $\rho$ , kdy zvýšená hustota (DKA) se vyskytuje při čerpání spodní dehtové vrstvy.

Příklad hmotnostních koncentrací  $c_{wi}$  složek ve Vypírácím roztoku [16], Příloha A:

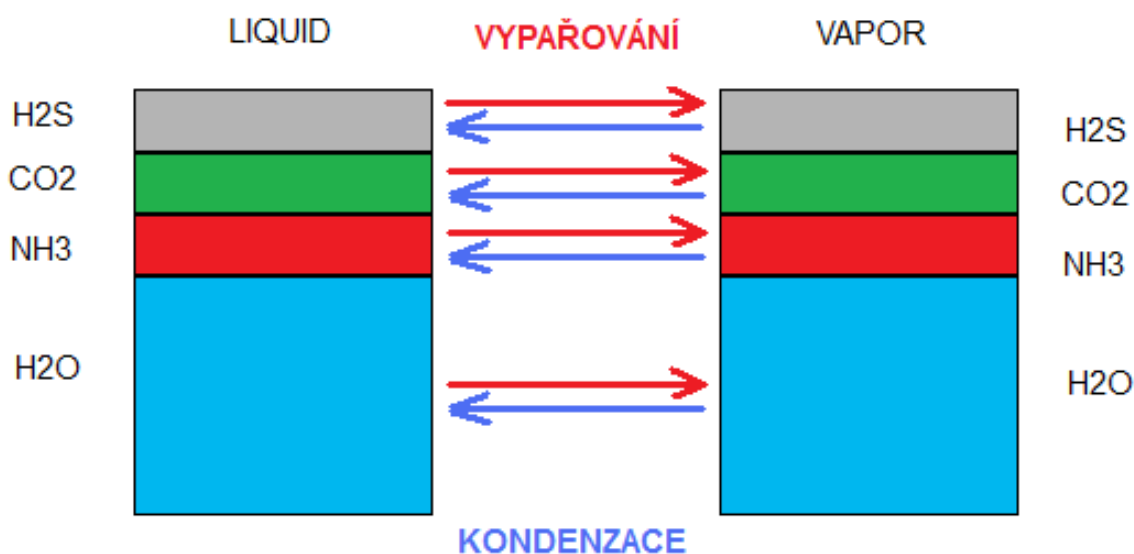
Složka	$c_{wi}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
NH <sub>3</sub> – celkem	10
NH <sub>3</sub> – volný	9,5
fenoly	0,7 až 1,7
CO <sub>2</sub>	7,0 až 8,5
H <sub>2</sub> S	1,0
SO <sub>4</sub>	0,25
Cl	1,5
SCN (thiokyanatanový iont)	0,5 až 0,76

Tabulka 5. Hmotnostní koncentrace příměsí ve VP [16]

V příloze je uváděna jednotka hmotnostní koncentrace [g.dm<sup>-3</sup>], což odpovídá jednotce [kg.m<sup>-3</sup>]. Obsah těchto příměsí vede k myšlence, že při kavitaci se nebude odpařovat pouze vodní pára, ale i páry ostatních kapalin hlavních příměsí [50], především složek zastoupených v největší hmotnostní koncentraci, proto jsou vybrány pro simulaci tyto složky:

- H<sub>2</sub>O – voda,
- NH<sub>3</sub> – amoniak,
- CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý,
- H<sub>2</sub>S – hydrogen sulfid.

Všechny matematické modely kavitace jsou uvedeny v Příloze M. Zjednodušeně si je možno představit následující kavitační mechanismus pro dané roztoky:



Obrázek 11. Kavitační mechanismus zkoumaných roztoků



V kapitole 3.1.1 je uvedeno omezení kavitačních modelů, především je důležité omezení vzhledem k možnosti definování pouze jedné kapaliny a z této kapaliny se pomocí kavitačních parametrů vytvářejí páry. Zde ovšem model nedovoluje definovat vypaření příslušné příměsi v příslušnou páru, např. voda na vodní páru atd. Proto každá příměs daného roztoku je simulována zvlášť. Nyní, z důvodu přehlednosti, je uveden postup výpočtu potřebných veličin pro příměs  $\text{NH}_3$  ve Vypíracím roztoku, pro ostatní příměsi jsou uvedeny výpočty a hodnoty veličin v příslušných přílohách. Pro definování dalších parametrů je potřeba výpočtu hmotnostního zlomku  $x_{M-\text{NH}_3}$  příměsi  $\text{NH}_3$  ve Vypíracím roztoku, Příloha B:

$$x_{M-\text{NH}_3} = \frac{c_{W_i-\text{NH}_3}}{c_{W_i-\text{NH}_3} + c_{W_i-\text{H}_2\text{O}}} \quad (3.1.19)$$

$$x_{M-\text{NH}_3} = \frac{10}{10 + 1010,5} = 0,00979911$$

Veličina  $c_{W_i-\text{NH}_3}$  představuje hmotnostní koncentraci příměsi  $\text{NH}_3$ ,  $c_{W_i-\text{H}_2\text{O}}$  představuje hmotnostní koncentraci vody, Tabulka 6. Hmotnostní zlomek ve jmenovateli vyjadřuje pouze směs příměsi -  $\text{NH}_3$  a čisté látky (pro nás se zanedbáním ostatních příměsí, je uvažována čistá voda -  $\text{H}_2\text{O}$ ) bez ostatních zkoumaných příměsí ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ).

Látka	$c_{W_i} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$x_{M-i} [1]$
Vypírací roztok - $\Sigma$	1030	1
$\text{H}_2\text{O}$	1010,5	0,98087074
$\text{NH}_3$	10	0,009799118
$\text{CO}_2$	8,5	0,008341511
$\text{H}_2\text{S}$	1	0,000988631

Tabulka 6. Hmotnostní zlomky příměsí Vypíracího roztoku

Pro výpočet hmotnostních zlomků příměsí ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) je využit obecný tvar vzorce (3.1.19). Výpočet hmotnostního zlomku  $x_{M-\text{H}_2\text{O}}$  příměsi  $\text{H}_2\text{O}$  ve Vypíracím roztoku:

$$x_{M-\text{H}_2\text{O}} = 1 - x_{M-\text{NH}_3} - x_{M-\text{CO}_2} - x_{M-\text{H}_2\text{S}} \quad (3.1.20)$$

$$x_{M-\text{H}_2\text{O}} = 1 - 0,009799 - 0,008342 - 0,000989 = 0,98087$$

Vypočtená hodnota hmotnostního zlomku  $x_{M-i}$ , výpočty viz Příloha B, je pro definování hmotnostního průtoku  $Q_M$  dané látky na vstupu, pro čistou vodu (referenční kapalina) je hodnota hmotnostního průtoku  $Q_M$  na vstupu  $3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Příkladem jsou uvedeny výpočty hmotnostních průtoků příměsí  $Q_{M-\text{NH}_3}$  a Vypíracího roztoku  $Q_{M-\text{VR}}$ , přehled hmotnostních průtoků pro všechny simulace – Příloha C:

$$Q_{M-\text{NH}_3} = 3 \cdot x_{M-\text{NH}_3} = 3 \cdot 0,009799118 = 0,02940 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_{M-\text{VR}} = 3 \cdot (1 - x_{M-\text{NH}_3}) = 3 \cdot (1 - 0,00979912) = 2,97060 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.1.21)$$

Pro výpočet tlaku nasycených par  $p_{i30st}$  pro modelování jednotlivých příměsí je potřeba znát tlak nasycených par čistých složek  $p_{30st}$  [44], [45], [46], [47]. Tyto hodnoty lze zjistit pomocí různých tabulek a také pomocí Antoineovy rovnice pro tlak nasycených par čistých látek [51], v Příloze A je tento postup výpočtu uveden. Tlak příměsí je poté zadán do kavi-  
tačního modelu, hodnoty  $p_{i30st}$  pro jednotlivé simulace jsou uvedeny v Příloze C. Obecně je možno popsat výpočet tlaku  $p_{i30st}$  v několika po sobě následujících krocích [41].

Molární koncentrace složky  $c_i$  je dána vztahem:

$$c_i = \frac{c_{wi}}{M_i} \quad (3.1.22)$$

Molární zlomek  $x_i$  složky je dán vztahem:

$$x_i = \frac{c_i}{\sum c_i} \quad (3.1.23)$$

Parciální tlak složky  $p_{i30st}$  je dán vztahem:

$$p_{i30st} = x_i \cdot p_{30st} \quad (3.1.24)$$

Postup výpočtu pro příměs  $\text{NH}_3$  - VR:

Molární koncentraci složky  $c_{\text{NH}_3}$ :

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{c_{\text{WNH}_3}}{M_{\text{NH}_3}} = \frac{10}{17,31} = 0,577 \text{ mol. dm}^{-3} \quad (3.1.25)$$

Molární zlomek  $x_{\text{NH}_3}$  složky:

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{c_{\text{NH}_3}}{\sum c_i} = \frac{0,577}{56,8768} = 0,0102 \quad (3.1.26)$$

Parciální tlak složky  $p_{\text{NH}_3-30st}$ :

$$p_{\text{NH}_3-30st} = x_{\text{NH}_3} \cdot p_{30st} = 0,0102 \cdot 1167200 = 11855 \text{ Pa} \quad (3.1.27)$$

Látka	$M_i$ [g.mol <sup>-1</sup> ]	$p_{30st}$ [Pa]	$c_{wi}$ [g.dm <sup>-3</sup> ]	$c_i$ [mol.dm <sup>-3</sup> ]	$x_i$ [1]	$p_{i30st}$ [Pa]
H <sub>2</sub> O	18,02	4247	1010,5	56,0766	0,9859	4187
NH <sub>3</sub>	17,31	1167200	10	0,5777	0,0102	11855
CO <sub>2</sub>	44,01	7213700	8,5	0,1931	0,0034	24495
H <sub>2</sub> S	34,08	2275600	0,03	0,0293	0,0005	1173
$\Sigma$	-	-	-	56,8768	1	41712

Tabulka 7. Parciální tlaky jednotlivých složek směsi Vypíracího roztoku

Fyzikální parametry čistých látek (H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) pro teplotu 30 °C jsou uvedeny v Příloze A. Hodnoty parciálních tlaků  $p_{i30st}$  pro roztoky: VR, NH<sub>3</sub>, NR, DKA, DKB; jsou uvedeny v Příloze B.

### 3.1.4 Definování fyzikálních a okrajových podmínek - Ansys Fluent

Pro nejlepší názornost je uveden v této kapitole konkrétní příklad definování podmínek simulace příměsi v roztoku. Parametry pro definování okrajových podmínek všech modelovaných látek pro simulaci v programu Ansys Fluent jsou uvedeny v Přílohách B a C. V této kapitole je jako příklad uvedena simulace příměsi  $\text{NH}_3$  ve VR. Kavitační děj je mírně periodický, jde tedy o časově závislou úlohu (Time –Transient) a geometrie vyšetřované Lavalovy dýzy je 2D, osově symetrická (2D Space – Axisymmetric). V záložce Models je definován Multifázový model *Mixture* (počet fází  $k = 3$ ), viskózní model *RNG  $k$ - $\epsilon$*  model s přesnějším modelováním blízko stěny (Enhanced Wall Treatment), jejich matematický popis je uveden v literatuře [56]. Modelované látky jsou definovány v položce Materials – Edit dle literatury [57], jsou to:

- Vypírací roztok (viz Tab. 4):  $\rho = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\mu = 0,00095 \text{ Pa.s}$
- $\text{NH}_3$  – kapalná fáze, (viz Příloha A):  $\rho = 595,17 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\mu = 0,0001283 \text{ Pa.s}$
- $\text{NH}_3$  – plynná fáze, (viz Příloha A):  $\rho = 9,0533 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\mu = 9,995 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}$

Dále jsou definovány jednotlivé fáze modelu směsi:

- primární –  $\text{NH}_3$  – kapalná fáze,
- sekundární –  $\text{NH}_3$  – plynná fáze,
- sekundární – Vypírací roztok.

Parametry pro kavitační model *Schnerr-Sauer* jsou:

- parciální tlak nasycených par složky  $\text{NH}_3$  (Tabulka 7)  $p_{\text{NH}_3-30st} = 11855 \text{ Pa}$
- hustota kavitačních zárodků  $n_{B-\text{NH}_3} = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-3}$

Výpočet parciálních tlaků nasycených par  $p_{i-30st}$  spolu s hodnotami pro jednotlivé příměsi jsou uvedeny v Příloze B. Výpočet hustoty kavitačních zárodků  $n_{B-i}$  je uveden v Příloze C.

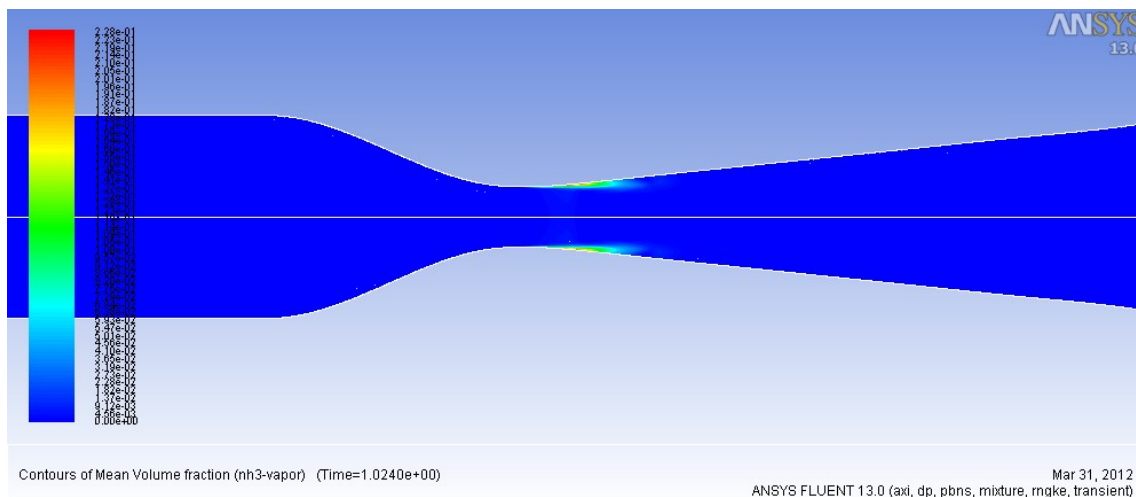
Okrajové podmínky na vstupu do Lavalovy dýzy jsou:

- hmotnostní průtok (3.1.21) příměsi  $\text{NH}_3$  -  $Q_{M-\text{NH}_3} = 0,029397354 \text{ kg.s}^{-1}$
- hmotnostní průtok (3.1.21) VR -  $Q_{M-\text{VR}} = 2,970602646 \text{ kg.s}^{-1}$

Je definována **na vstupu** pro fázi *Mixture* metoda specifikace turbulence  $k$  a  $\varepsilon$ . Tato specifikace turbulence je dána hodnotami turbulentní kinetické energie  $k = 0,002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  a rychlostí turbulentní disipace  $\varepsilon = 0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ . Postup výpočtu těchto dvou veličin je uveden v Příloze C. Hodnota Reynoldsova čísla, vzorec (3.2.1), pro všechny modelované příměsi je zobecněna na  $Re \approx 95000$  – turbulentní proudění. Vycházíme zde z Reynoldsova čísla pro čistou vodu, postup zobecnění  $Re$  a výpočet viz Příloha C, str. 83. Teplota –  $303,15 \text{ K}$ .

**Na výstupu** jsou definovány pro fázi *Mixture* absolutní tlak na výstupu  $105000 \text{ Pa}$ , dále je definována turbulence pomocí metody intenzity turbulence  $I$  a průměru potrubí  $d_p$  na konci geometrie. Výpočet intenzity turbulence  $I$  je uveden v Příloze C. Pro tuto simulaci má hodnota intenzita turbulence  $I = 4 \%$ , průměr potrubí na výstupu je  $d_p = 0,05 \text{ m}$ . Teplota –  $303,15 \text{ K}$ .

Inicializace výpočtu je provedena ze Vstupu. Pro zrychlení výpočtu je definován na vstupu tlak  $135000 \text{ Pa}$ , teplota kvůli častým problémům s konvergencí rovnic energie a turbulentních veličin je přepsána na hodnotu  $300 \text{ K}$ , místo původních  $303,15 \text{ K}$ . V položce Run Calculation je pro „rozpočítání“ kavitačního děje nastaveno počet časových kroků 1024. Po provedení tohoto výpočtu by měla být kavitační oblast pouze za zúžením Lavalovy dýzy, viz Obrázek 12. Zobrazení je uskutečněno pomocí příkazu Display – Contours – Set up – Unsteady Statistics – Phase: NH3 – vapor – Mean Volume fraction.



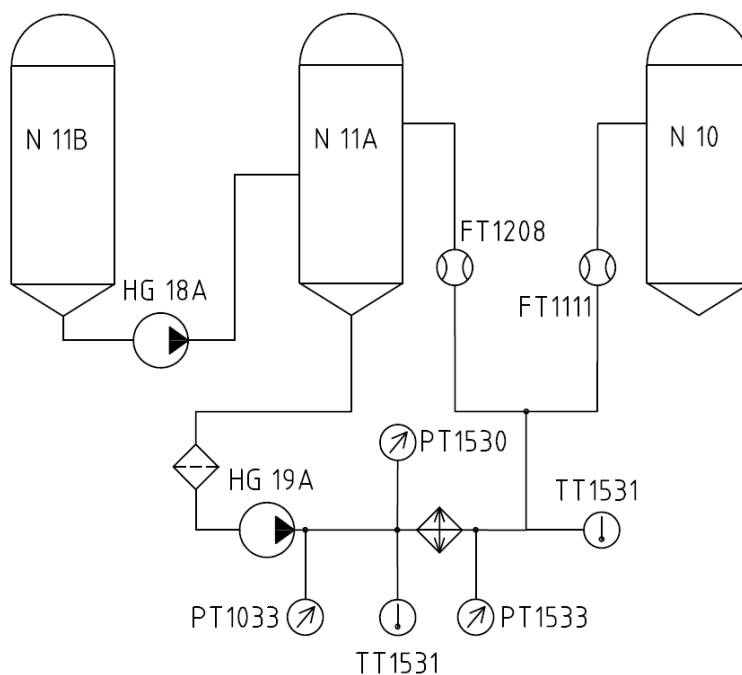
Obrázek 12. Zobrazení objemového zlomku páry pro kontrolu kavitační oblasti

Po provedení této kontroly je změněn počet časových kroků na 4096. Toto číslo je vybráno z důvodu možnosti podrobit výsledky rychlé Fourierově transformaci (FFT). Cílem je porovnání množství páry [kg] jednotlivých roztoků, které se budou skládat z parciálního množství páry jednotlivých složek roztoků. Proto postup 1024 – rozpočet, kontrola oblasti páry, 4096 - samotný výpočet, vyhodnocení množství páry je proveden pro zvolené 4 složky, 5 druhů roztoků a vody; celkově je tedy realizováno 21 simulací. Postup vyhodnocení, porovnání množství páry roztoků a vody je uvedeno ve čtvrté kapitole této diplomové práce.

### 3.2 Metoda elektrohydraulické analogie

Druhá část třetí kapitoly je věnována numerickému modelování výskytu kavitace v obvodu pomocí metody elektrohydraulické analogie (dále jen MEA) programem Matlab – Simulink – SimHydraulics [58]. Popis metody řešení hydraulických obvodů pomocí MEA, definování dynamických odporů, matematického modelu sloupce kapaliny je obsáhle uvedeno v literaturách [30], [31]. Modelována je skutečná trať, schéma obvodu je uvedeno na Obrázku 13. Cílem simulace MEA je:

- ověření naměřených hodnot získaných z reálné trati a hodnot získaných numerickou simulací pomocí programu SimHydraulics; tekutina, která proudí v obvodu je **NH<sub>3</sub> voda** [17],
- simulovat zanesení filtru před čerpadlem HG 19A, to je vyjádřeno tlakovou ztrátou  $\Delta p$ , pomocí ztrátového součinitele  $\zeta$ , v sacím potrubí pro předpoklad vzniku kavitace na vstupu do oběžného kola hydrodynamického čerpadla. Toto zanesení filtru bude simulováno na odzkoušeném obvodu z předchozího bodu pro 3 teploty – 20 °C, 25 °C, 30 °C.



Obrázek 13. Schéma modelované trati – SimHydraulics [15]

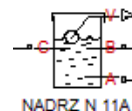
*N 11B, N 11A, N 10 – nádrže, HG 18A, HG 19A – hydrodynamická čerpadla,  
PT 1033, PT 1530, PT 1533 – tlakoměry, TT 1531 – snímače teploty,  
FT 1208, FT 1111 – průtokoměry, filtr, chladič.*

Počet prvků je 167 [17], prvky jsou zmapovány dle výkresové dokumentace v Příloze E; prvky jsou popsány v Příloze D. Podklady - fa Hutní PROJEKT, a. s.

### 3.2.1 Definování prvků užitých v matematickém modelu

Pro velký počet prvků v matematickém modelu (167 prvků), viz Příloha D; je zde uveden pouze stručný výčet parametrů nejdůležitějších prvků, pro doplňující informace je u nich uvedena odvolávka na příslušnou přílohu. Úvodem jsou uvedeny parametry nastavení bloku výpočtové konfigurace společné pro všechny simulace, blok Solver Configurator [58]: Solver: *ode15s*; tolerance:  $10^{-6}$ ; čas simulace 3 sekundy.

**Nádrž N 11A**, výkres viz Příloha E (označení výkresu DOB171/1), je válcová nádrž s kuželovým dnem. Na tomto dně je zadána výšková hladina 0,0 m, viz Příloha F. K tomuto dnu je připojeno potrubí vedoucí k čerpadlu HG 19A. Zpět do nádrže N 11A ústí potrubí přes hrdlo N4, ve výšce cca +11,5 m. V nádržích je přetlak 20 kPa. Výška hladiny v nádrži se udržuje přibližně konstantní (+2,5 m) [17]. Nádrž N 11A je navíc doplňována čerpadlem HG 18A.



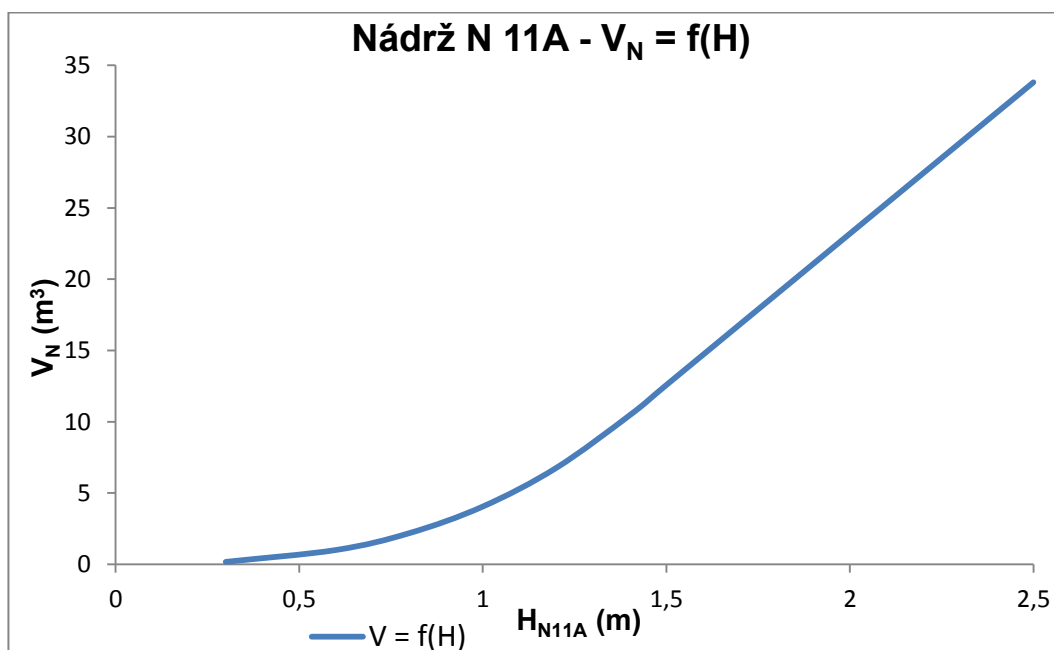
Pro matematickou simulaci nádrže N 11A byl vybrán prvek **NADRZ N 11A** Variable Head Three-Arm Tank (VHT) – nádrž s třemi hydraulickými vstupními/výstupními připojeními. Ostatní, pomocné nádrže, jsou modelovány blokem Hydraulic Reference [31]. Prvek VHT umožňuje připojit 3 hydraulické vstupy/výstupy na porty A, B a C. Port V je fyzikální výstup objemu nádrže  $V_N$  počítaného tímto prvkem z počátečního objemu  $V_{N11A}$ , a sumou odchozích a přichozích průtoků  $Q_V$  [54]. Tento prvek je definován následujícími parametry:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Počáteční objem $V_{N11A}$	33,74	[m <sup>3</sup> ]
Vnitřní přetlak $p_N$	20000	[Pa]
Závislost výšky hladiny vs. objem	<b>definováno Tabulkou 9</b>	-
Port A (průtok do HG 19A) - průměr	0,2604	[m]
Port A – ztrátový součinitel [32]	3	[1]
Port B (průtok z HG 19A) – průměr	0,1317	[m]
Poloha portu B nad portem A	11,533	[m]
Port B – ztrátový součinitel [32]	1	[1]
Port C (průtok z HG 18A) – průměr	0,1317	[m]
Poloha portu C nad portem A	22	[m]
Port C – ztrátový součinitel [32]	1	[1]
Interpolační metoda	Lineární	-
Extrapoláční metoda	z posledního bodu	-

Tabulka 8. Definování parametru pro blok Variable Head Three-Arm Tank

Interpolační metoda slouží k prokládání závislosti  $V_N = f(H_{N11A})$ , možnost *lineární* znamená, že dva po sobě jdoucí body závislosti jsou spojeny přímkou, výsledkem tedy je nesouvisle odvozená křivka. Extrapolační metoda umožňuje odhad veličin objemu nádrže  $V_N$  a výšky hladiny  $H_{N11A}$  mimo definované parametry v bloku. Metoda z posledního bodu využívá poslední definované výstupní hodnoty  $V_N$ . Blok využívá poslední definovanou výstupní veličinu  $V_N$  pro definování všech vstupních veličin  $H_{N11A}$  větších než je poslední definovaná vstupní veličina  $H_{N11A}$  bloku, a první definovanou výstupní veličinu  $V_N$  pro všechny vstupní veličiny  $H_{N11A}$  menší než je první definovaná vstupní veličina  $H$  [58].

Základní rovnice, počítající průtok jednotlivými porty A, B, C, dále rovnice počítající objem kapaliny viz literatura [54]. Závislost objemu nádrže jako funkce výšky hladiny nádrže nejlépe vystihuje Graf 3, doplnění parametrů pro zadání do bloku Variable Head Three-Arm Tank definováno Tabulkou 9.



Graf 3. Závislost  $V_N = f(H_{N11A})$  Nádrže N11A

Pozn.: Rozměry nádrže pro výpočet počátečního objemu  $V_{N11A}$  i samotný výpočet počátečního objemu  $V_{N11A}$  jsou uvedeny v Příloze F [17].

Parametr	Hodnoty	Jednotka
Vektor objemu kapaliny $V_N$	[ 0 0,167642 0,990329 2,162205 4,014468 6,708619 10,38266 12,50638 33,74355 ]	[m³]
Vektor výšky hladiny nádrže $H_{N11A}$	[ 0 0,3 0,6 0,8 1 1,2 1,4 1,5 2,5 ]	[m]

Tabulka 9. Hodnoty zadání závislosti  $V_N = f(H_{N11A})$  - VHT

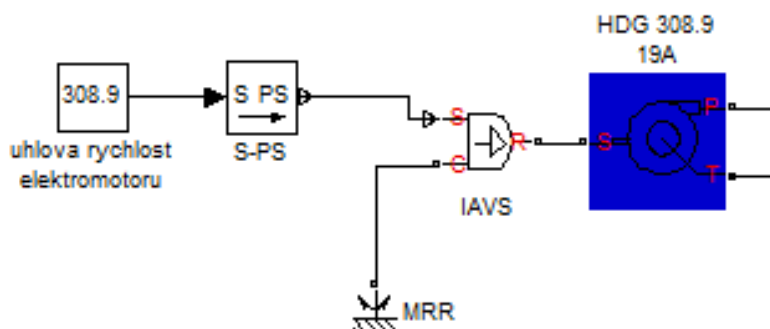


Doplňování nádrže N 11A čerpadlem HG 18A je simulováno pomocí bloku Hydraulic Constant Flow Rate Source – Konstantního zdroje průtoku. Popis tohoto bloku je uveden v literatuře [31]. Hodnota průtoku  $Q_V$  tohoto bloku je nastavena tak, aby se udržoval přibližně stejný počáteční objem nádrže N 11A  $V_{N11A}$ :

Parametr	Hodnota	Jednotka
$Q_V$ - průtok	0,0151477	$[m^3 \cdot s^{-1}]$

Tabulka 10. Parametr bloku pro simulaci bez kavitace

Dalším prvkem, který je v obvodu umístěn, je soustava **elektromotor a hydrodynamické čerpadlo HG 19A**. Katalogový list tohoto čerpadla včetně charakteristiky čerpadla skutečné a pro ověření odsimulované charakteristiky v SimHydraulics je uveden v Příloze G. Kompletní matematický model soustavy elektromotoru a čerpadla HG 19 A je uveden na Obrázku 14:



Obrázek 14. Matematický model soustavy elektromotor + čerpadlo HG 19A

Pro definování této sestavy jsou užity bloky [58]:


- uhlova rychlost elektromotoru – konstanta –  $308,9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , což po přepočtu odpovídá otáčkám elektromotoru  $n_M = 2950 \text{ min}^{-1}$ ,
- S-PS – Simulink – PS Converter – převodník simulinkového signálu na fyzikální,
- MRR – Mechanical Rotational Reference – referenční bod rotace,
- IAVS – Ideal Angular Velocity Source – zdroj ideální úhlové rychlosti,
- HDG 308.9 19A – Centrifugal Pump; popis bloku viz literatura [31], definování parametrů tohoto bloku je uvedeno v Tabulce 11.

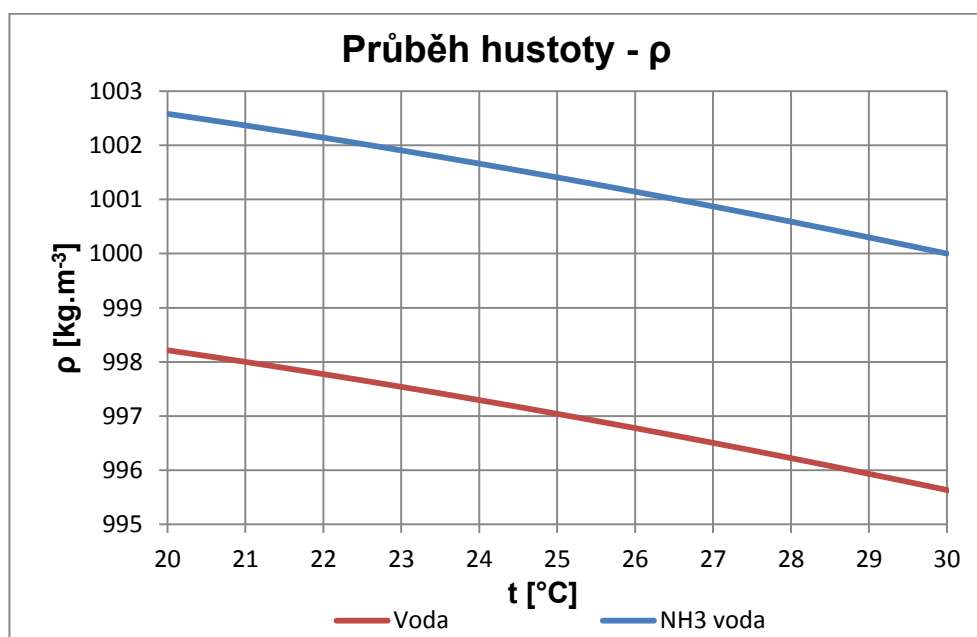


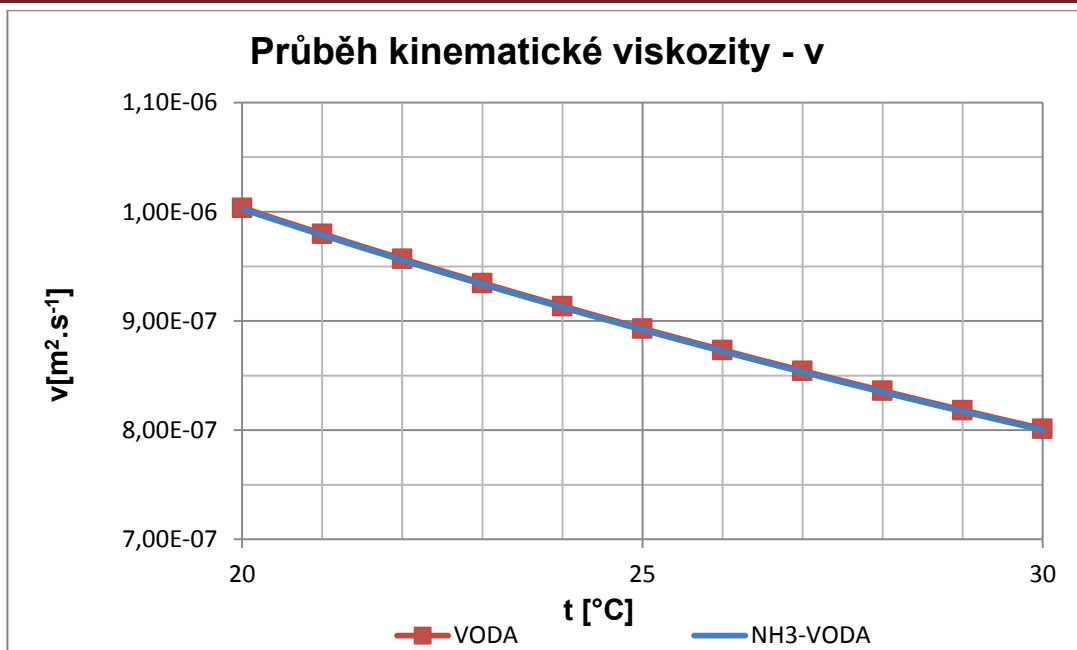
Parametr	Hodnota	Jednotka
Parametrizace modelu	1D charakteristika $P_p - Q$ , $n - Q$	-
Referenční úhlová rychlost $\omega$	308,9	[rad.s <sup>-1</sup> ]
Referenční hustota $\rho$	1000	[kg.m <sup>-3</sup> ]
Vektor tlakové ztráty $\Delta p$	[654404 644637 634869 625102 615335 595801 566499 527430 488361 429758]	[Pa]
Vektor průtoku $Q_V$	[5,6 11,1 16,7 22,2 27,8 33,3 38,9 44,4 50 55,6]	[.10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Vektor příkonu $P_P$	[19000 21000 22500 24000 26000 27000 29000 30000 32000 33500]	[W]
Interpolační metoda	Kubická	-
Extrapoláční metoda	z posledních 2 bodů	-

Tabulka 11. Parametry definující blok Centrifugal Pump - HDG 308.9 19A

Dále je potřeba definovat **kapalinu – NH<sub>3</sub> vodu** blokem Custom Hydraulic Fluid (CHF) –

Uživatelsky definovaná hydraulická kapalina [31] . Kapalina v obvodu je NH<sub>3</sub> voda, teplota obvodu dle dat získaných měření se pohybuje kolem 22 °C. Dle Přílohy A - pro NH<sub>3</sub> vodu jsou definované fyzikální vlastnosti pro 30 °C, pro teplotu 22 °C je zaveden odhad fyzikálních parametrů NH<sub>3</sub> vody, kdy známým bodem pro 30 °C je proložena křivka charakterizující závislost  $\rho_{VODY} = f(t)$  - Graf 4. Stejný postup je aplikován na odečet hodnot kinematické viskozity  $\nu$  NH<sub>3</sub> vody - Graf 5.

Graf 4. Odvození průběhu hustoty  $\rho$  NH<sub>3</sub> vody

Graf 5. Odvození průběhu kinematické viskozity  $\nu$  NH<sub>3</sub> vody

Na základě zavedeného předpokladu je definován blok CHF následně:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Hustota kapaliny $\rho_{LIQ}$	1002,6	[kg.m <sup>-3</sup> ]
Kinematická viskozita $\nu_{LIQ}$	1.10 <sup>-6</sup>	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Modul objemové pružnosti $K_{LIQ}$	2.10 <sup>9</sup>	[Pa]
Relativní množství rozpuštěného vzduchu $\alpha_{REL}$	1.10 <sup>-12</sup>	[1]

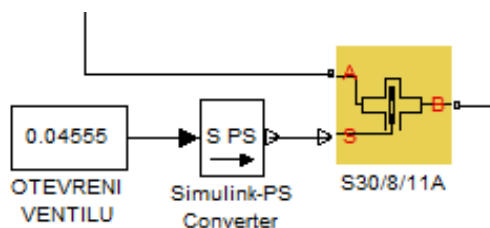
Tabulka 12. Parametry definující blok CHF – NH<sub>3</sub> voda

Pozn.: Hodnoty modulu objemové pružnosti  $K$  a relativního množství rozpuštěného vzduchu  $\alpha_{REL}$  nejsou pro NH<sub>3</sub> vodu definovány, jsou tedy převzaty hodnoty pro čistou vodu, zároveň je nutné podotknout, že pro tento stacionární výpočet se tyto hodnoty neuvažují a jejich hodnota neovlivní výpočet.

Jelikož po rozdělení potrubí od hydrodynamického čerpadla HG 19 A potrubí do nádrže N 10 ústí výše přibližně o 22 metrů, než je tomu u nádrže N 11A, je zapotřebí mít zapojeno v obou větvích, jak do nádrže 11A tak do nádrže 10 **škrcení pomocí šoupátkového ventilu** typu S30 od fy Armatury Group, a. s., Příloha H. V matematickém modelu jsou tyto ventily označeny S30/8/11A – umístěn v potrubí do nádrže N 11A a S30/12/10 – potrubí do nádrže N 10. Soustava pro škrcení průtoku do nádrží obecně obsahuje [58]:

- OTEVŘENÍ VENTILU – konstanta, je nastaveno otevření  $\sigma_V$  ventilu tak aby bylo dosaženo požadovaných průtoků. Hodnoty otevření: S30/8/11A - 0,04555 m, S30/12/10 - 0,0538 m,
- S-PS – převodníku – převodník simulinkového signálu na signál fyzikální,

- S30/8/11A nebo S30/12/10 - Gate Valve – blok charakterizující šoupátkový ventil, A, B porty jsou pro hydraulické přípoje, S – port pro otevírání ventilu, viz [18].



Obrázek 15. Matematický model škrcení do nádrží, zde pro průtok do nádrže 11A

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průtočný průměr šoupátka $d_S$	0,1063	[m]
Počáteční otevření $o_i$	0	[m]
Ztrátový součinitel $\zeta$ (Tab. 6.8.1 – Příloha H)	0,22	[1]
Kritické $Re$	10	[1]
Lekáž	$1 \cdot 10^{-12}$	[m <sup>2</sup> ]

Tabulka 13. Definování ventilu S30/8/11A, ventilu S30/12/10


V místě rozdvojení potrubí za výtlakem z čerpadla 19A je potřeba využít matematického modelu T-kusu označeného T9. Jeho funkce, matematický popis je možno nalézt v literatuře [53]. Pro definování jednotlivých ztrátových součinitelů  $\zeta_i$  je využita dostupná literatura [35], Příloha I. Definování parametru bloku T-junction:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Hlavní průměr potrubí $d_P$	0,1571	[m]
Průměr větveného potrubí $d_p$	0,1063	[m]
Ztrátový součinitel A – B (směr nádrž 10)	0,04	[1]
Ztrátový součinitel B – A	1,12	[1]
Ztrátový součinitel A – A1 (směr nádrž 11A)	0,97	[1]
Ztrátový součinitel A1 – A	1,65	[1]
Ztrátový součinitel A1 – B	1,6	[1]
Ztrátový součinitel B – A1	1,8	[1]
Kritické $Re$	120	[1]

Tabulka 14. Definování parametrů T-kusu T9



Obrázek 16. Schéma průtoku skrze T-kus T9

Pro zjednodušení byly ostatní T-kusy, kdy průtok se nedělil v T-kusu, pouze zde docházelo k změně směru toku kapaliny (prvek se chová jako koleno), simulovány pomocí prvku definující místní odpor Local Resistance . Dle směru vtoku a výtoku jsou rozlišeny celkově 4 druhy T-kusu; jejich popis, a následné jednotlivé definice ztrátových součinitelů  $\zeta_i$ , jsou uvedeny v Příloze I. Matematický popis tohoto prvku je uveden v literatuře [31]. Obecně je možno uvést parametry definující tento blok, jsou to [58]:

- nejmenší průřez  $S$  odporem,
- parametrizace modelu,
- ztrátový součinitel  $\zeta_i$  v hlavním směru proudění, ve zpětném směru proudění,
- kritická hodnota  $Re$ .

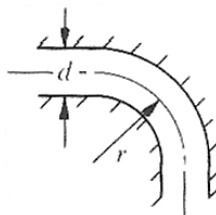
Místní odpory – Local Resistance byly využity i pro definování velice častého prvku v obvodu – **Kolena**. Zde ovšem jako parametrizace modelu nebyla zvolena konstanta, ale možnost volby závislosti ztrátového součinitele  $\zeta$  jako funkce Reynoldsova čísla. Reynoldsovo číslo  $Re$ , definováno (3.2.1) [10] se v modelovaném obvodu pohybuje v rozmezí od 100000 do 350000, viz Příloha D, Tabulka 6.4.1:

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (3.2.1)$$

Touto funkční závislostí je zajištěno, že blok Local Resistance vypočte na základě Reynoldsova čísla  $Re$  příslušný ztrátový součinitel  $\zeta_i$  [33]. Reynoldsovo číslo zahrnuje vliv viskozity  $\nu$ , rychlosti proudění  $u$  a také vnitřního průměru  $d_i$ . Dle [35] lze definovat ztrátový součinitel  $\zeta_B$  kolena obecně:

$$\zeta_B = \zeta_B^* \cdot C_{Re} \cdot C_O \cdot C_f \quad (3.2.2)$$

- kde:
- $\zeta_B^*$  značí základní ztrátový součinitel kolena,
  - $C_{Re}$  korekční faktor Reynoldsova čísla,
  - $C_O$  korekční faktor zahrnující vliv výstupního průměru a délky potrubí,
  - $C_f$  korekční faktor zahrnující vliv výšek nerovností povrchu.



Obrázek 17. Náčrt kolena s rozměry pro definování ztrátového součinitele

Pro matematickou simulaci jsou uvažovány základní ztrátový součinitel  $\zeta_B^*$  a korekční faktor  $C_{Re}$ , ostatní korekční faktory jsou zanedbány,  $C_f$  je pro nové potrubí přibližně 1 [35].

V simulovaném obvodu se vyskytují tyto 3 druhy kolen, Příloha J:

- koleno 90°,  $r/d = 1,5$ ,
- segmentové koleno,  $r/d = 1,5$ , počet segmentů 3,
- koleno 45°,  $r/d = 1,5$ .

Nejčastější druh kolena v modelovaném obvodu je koleno 90°,  $r/d = 1,5$ ; pro toto koleno [35] je předepsána přímo grafická závislost  $\zeta_B = f(Re)$ , odpadá tedy definice dle (3.2.2). Odečtené hodnoty z Grafu 6.10.1, Příloha J, jsou uvedeny v tabulce:

$Re$	100000	125000	150000	175000	200000	350000
$\zeta_B$	0,3	0,28	0,275	0,27	0,26	0,25

Tabulka 15. Definování parametrů pro koleno 90°,  $r/d = 1,5$   $\zeta_B = f(Re)$

Pro segmentové koleno je hodnota základního ztrátového součinitele  $\zeta_B^* = 0,34$  (počet segmentů 3 – Graf 6.10.2) [35], je uvažován vliv  $Re$  (korekční faktor  $C_{Re}$  – Graf 6.10.3):

$Re$	100000	200000	300000	400000	500000
$C_{RE}$	1,4	1,3	1,2	1,1	1
$\zeta_B$	0,476	0,442	0,408	0,374	0,34

Tabulka 16. Definování parametrů pro koleno segmentové  $r/d = 1,5$   $\zeta_B = f(Re)$

Posledním typem kolena v simulovaném obvodu je koleno 45°,  $r/d = 1,5$ , základní hodnota ztrátového součinitele  $\zeta_B^* = 0,09$  [35], Graf 6.10.5. Uvažován vliv  $Re$  (faktor  $C_{Re}$ ):

$Re$	100000	200000	300000	400000	500000
$C_{RE}$	1,4	1,3	1,2	1,1	1
$\zeta_B$	0,126	0,117	0,108	0,099	0,09

Tabulka 17. Definování parametrů pro koleno 45°  $r/d = 1,5$   $\zeta_B = f(Re)$

Obrázek 18. Koleno 90° (Local Resistance),  $r/d = 1,5$ , parametrizace modelu  $\zeta_B = f(Re)$


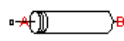
Pro zjednodušení matematického modelu je prvek místního odporu (Local Resistance) [33] použit pro definici dalších místních odporů, jako např.: kompenzátoru, konfuzorů aj., kdy je definována buď hodnota ztrátového součinitele  $\zeta_i$ , nebo tlaková ztráta  $\Delta p_i$ , výpočet a informace jsou uvedeny v Příloze K.

Prvek ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )	$\zeta$ [1]
Spojení přírubou SPi	0,05
Redukce nesymetrická 250/200 RN1	0,04
Filtr	2
Vstup do/Vystup z HDG 19A - odhadnuto	1
Kompenzátor	0,2
Zpětná klapa	0,75
Chladič ( $\Delta p$ – změřeno)	71,7
Rozšíření RZi	0,85; 0,55; 0,58
Zúžení RZUi	0,065; 0,045; 0,04
Otevřený ventil S30i	0,2
Etážový odskok, shybka EOi	0,0768

Tabulka 18. Seznam hodnot ztrátových součinitelů užitých pro definování prvků  
Hodnota ztrátového součinitele  $\zeta$ , podrobněji viz Příloha K:

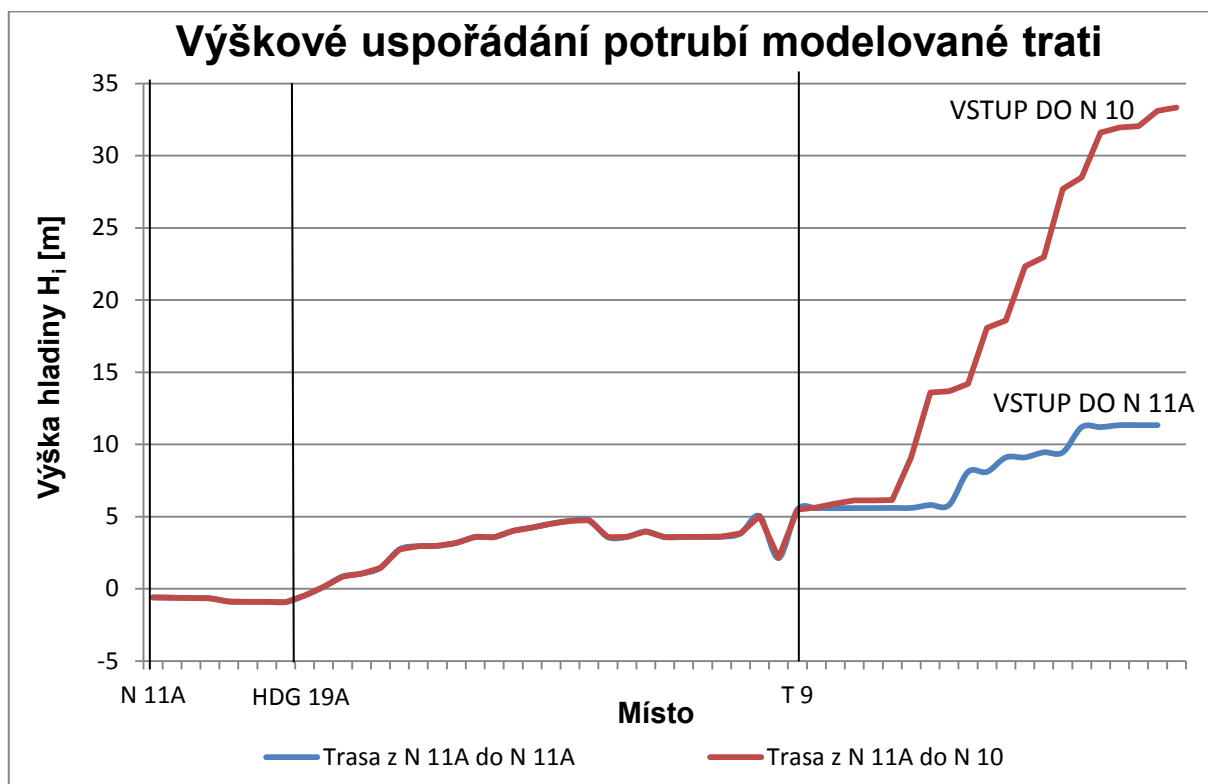
- pro napojení potrubí na nádrž N 11A jsou uvedeny v Tabulce 8 pro jednotlivé vstupy B, C a výstup A [32], pro spojení přírubou je uvedeno v literatuře [32],
- pro veškeré redukce a rozšíření je definování provedeno dle literatury [35],
- pro veškeré šoupátkové ventily plně otevřené je hodnota dána výrobcem [19],
- pro chladič lze dopočítat dle známé tlakové ztráty  $\Delta p$  na trati [17],
- pro zpětnou klapu je k dispozici charakteristika  $\Delta p = f(Q_M)$  [19],
- pro etážový odskok je definována hodnota dle literatury [35].

Obrázek 19. Chladič (Local Resistance), parametrizace modelu  $\zeta = \text{konstanta}$

Posledním, ale neméně důležitým prvkem je samotné potrubí. Jelikož je potřeba zadávat výšky potrubí nad/pod nulovou hladinou, jsou vybrány 2 bloky z prvků Low - Pressure Blocks. Jedná se o blok definující odpor proti pohybu – odporová trubka, Resistive Tube LP , a segmentované potrubí, Segmented Pipe LP . Podrobněji jsou tyto bloky popsány v literatuře [43], [48]. Rozhodujícím faktorem pro volbu mezi prvkem Resistive Tube nebo Segmented Pipe je délka trubky. Do délky  $l_P$  1,5 m je potrubí modelováno pomocí prvku zahrnující pouze odpor proti pohybu, Resistive Tube. Nad tuto hranici je užito segmentové potrubí tak, aby jeden segment měl délku maximálně 0,5 m. Zde jsou uvedeny pouze obecné parametry společné pro oba prvky, záložka Základní parametry, Basic parameters [43], [48]:

- vnitřní průměr  $d_P$ ,
- délka potrubí  $l_P$ ,
- ekvivalentní délka  $l_e$ ,
- výška nerovností povrchu  $f_i$ , pro ocelové potrubí se udává  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  [10], [23],
- pro odporovou trubku - typ průřezu potrubí, geometrický tvarový faktor,

V záložce Vertikální pozice, Vertical position, jsou definovány výšky portu A (vstup), portu B (výstup). Výška hladiny  $H_i = 0 \text{ m}$  je umístěna na dně nádrže N 11A. Pro lepší přehlednost výškového uspořádání trati je zde uveden následující graf:



Graf 6. Výškové uspořádání modelované trati; T 9 – místo rozdělení potrubí na dva úseky

### 3.2.2 Metoda sestavení trati, modelování kavitace v obvodu

V úvodu kapitoly 3.2 byly uvedeny dva stěžejní body simulace MEA programem Matlab - Simulink - SimHydraulics. První bod spočívá v porovnání hodnot naměřených na reálné trati a hodnot získaných simulací. Toto porovnání je vyjádřeno a provedeno ve čtvrté kapitole této práce.

Ve druhém bodě je zadáno modelování výskytu kavitace na vstupu do hydrogenerátoru HG 19A, při 3 zadaných teplotách (20 °C, 25 °C, 30 °C), tyto hodnoty charakterizují pracovní teploty média; tedy jiná teplota, než v tomto rozsahu zadaná, v obvodu nemůže nastat. Tohoto teplotního rozsahu je dosaženo pomocí chladiče při vysokých teplotách, a pomocí vytápěné haly při nízkých teplotách. Při známém tlaku  $p_{AS}$  na vstupu do HG 19A při čisté vložce filtru a tlaku směsi  $p_i$   $\text{NH}_3$  vody pro zadané pracovní teploty jsme schopni vypočítat tlakovou ztrátu  $\Delta p$ , která je potřebná pro vznik kavitace v sání. Tato představa ovšem není zcela správná, protože je důležité si zde uvědomit následující souvislosti. Pokud zvýšíme zanesení filtru pomocí ztrátového součinitele  $\zeta$ , zmenšíme tím průtok  $Q_{Vi}$  z nádrže N 11A a tím se bude zvětšovat objem nádrže  $V_N$ . Tím by se také celkový přetlak, složený z přetlaku v nádrži a hydrostatického tlaku kapaliny, který je závislý na výšce hladiny, v nádrži zvyšoval. Ke zvyšování hladiny nedojde, protože na reálné trati se konstantní výška dodržuje pomocí regulace ventilů, které škrťí jednotlivé větve do nádrže N 11A a N 10 A, S30/8/11A je umístěn v potrubí do nádrže 11A a S30/12/10 je umístěn v potrubí do nádrže 10. Je zde zavedeno určité zjednodušení, konstantní objem ( $V_N \approx 33,74 \text{ m}^3$ ) je udržován pomocí změny průtoku  $Q_V$  doplňovacího čerpadla HG 18A. Další parametr, rychlost proudění  $u$ , bude díky zmenšujícímu se průtoku  $Q_V$  ovlivňovat i celkovou tlakovou ztrátu filtru  $\Delta p$ . Proto zde prvotní myšlenka nemůže být zcela uplatněna. Postup této části simulace je uveden později.

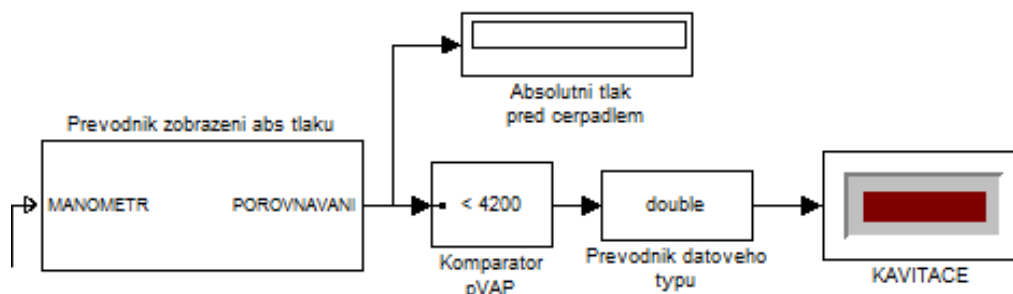
Vstupní parametry pro simulování detekce kavitace, hustota  $\rho$  (Graf 4), str. 49, v (Graf 5), str. 50, postup výpočtu tlaku nasycených par  $p_{VAP}$  obecně je již uveden v kapitole 3.1.3, str. 42, samotný výpočet je pak uveden v Příloze L, hodnota tohoto tlaku se vloží jako konstanta do bloku Komparator pVAP, Obrázek 20:

Fyzikální parametr	20 °C	25 °C	30 °C
$\rho_{LIQ} \text{ NH}_3$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	1002,6	1001,4	1000
$v_{LIQ} \text{ NH}_3$ [ $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	1,002	0,892	0,801
$p_{VAP} \text{ NH}_3$ [Pa]	22683	26034	29927

Tabulka 19. Hodnoty pro simulování kavitace SimHydraulics; Parametr kapaliny – blok CHF, parametr  $p_{VAP}$  – blok Komparator



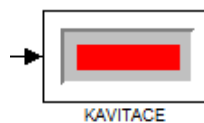
Pro signalizaci kavitace na vstupu do čerpadla je použit modul pro zobrazení kavitace, tento modul již byl využit pro numerické modelování kavitace v programu SimHydraulics, viz literatura [28]. Pokud se rozsvítí červené světlo bloku KAVITACE, znamená to přítomnost kavitace na vstupu do hydrodynamického čerpadla HG 19A.



Obrázek 20. Detail modulu pro detekci kavitace [28]

Pro simulování detekce kavitace je potřeba doplnit postup samotného modelování. Na předchozí stránce jsou vysvětlena určitá omezení, důležité souvislosti i zjednodušující předpoklady pro simulaci kavitace. Obecný postup modelování kavitace, platný pro všechny modelované teploty, lze shrnout do několika bodů:

1. jsou zadány fyzikální parametry kapaliny  $\text{NH}_3$  - blok CHF, tlak nasycených par  $p_{VAP}$  blok Komparator pVAP,
2. je zvýšen v bloku FILTR ztrátový součinitel  $\zeta_{FILTR}$ , základní hodnota 2,
3. je spuštěna simulace,
4. dle potřeby je upravena hodnota průtoku  $Q$  - blok HG 18A z důvodu dodržení  $V_N$ ,
5. spustíme simulaci pro ověření  $V_N$  nádrže N 11A,



6. pokud blok Kavítace svítí červeně, jsou zaznamenány hodnoty ztrátového součinitele  $\zeta_{FILTR}$ , průtok  $Q_{HG18A}$  čerpadla 18A,  $V_N$ , hodnota průtoku filtru  $Q_{VF}$ , ta se rovná  $Q_{VHG19A}$  (snímač CELKOVY PRUTOK – Obrázek 21), protože vnitřní průměr potrubí na výstupu z 19A je stejný jako vnitřní průměr potrubí připojený k filtru (206,5 mm); pokud se blok Kavítace nerozsvítí, vrátíme se k bodu 2.

Z objemového průtoku filtru  $Q_{VF}$  je možno vyjádřit rychlost proudění  $u$ :

$$u = \frac{Q_{VF}}{S} = \frac{4 \cdot Q_{VF}}{\pi \cdot d_p^2} \quad (3.2.3)$$

Ze známé rychlosti je možno provést výpočet potřebné tlakové ztráty [10] filtru  $\Delta p_{FILTRU}$ :

$$\Delta p_{FILTRU} = \zeta_{FILTR} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \rho_{LIQ} \quad (3.2.4)$$

Pozn.: Výrobce neudává hodnotu destrukčního tlaku filtrační vložky, proto tlak  $\Delta p_{FILTRU}$  musí být brán s rezervou, nejsme schopni říci, zda-li se vložka při tomto tlaku již nezbortí. Zároveň není k dispozici závislost  $\Delta p_{FILTRU}$  vs. poměrné znečištění filtru. Jelikož je tento filtr velké světlosti, DN 200, a na stávajícím zařízení nejsou zapojena měřící čidla pro měření tlakové ztráty filtru, není zde možnost proměřit zvyšování  $\Delta p_{FILTRU}$  při postupném zanášení filtru. Jistou možností je zde využít metodu konečných objemů, kde lze specifikovat pomocí funkce Porous Jump porézní prostředí, tedy i filtrační vložku, více viz literatura [42].

Výsledky simulace SimHydraulics všech 4 variant s uvedením porovnání hodnot naměřených a získaných simulací (první bod); hodnot  $\Delta p_{FILTRU}$ ,  $\zeta_{FILTR}$  a s uvedením zdali se kavitace na vstupu do hydrodynamického čerpadla HG 19A vyskytne, jsou uvedeny v druhé části následující kapitoly.

Prvky uvedené v této a předchozí kapitole jsou poskládány do matematického modelu dle předlohy reálné trati, Obrázek 21, v Příloze D je uveden seznam prvků. Pro velký počet prvků jsou z důvodu lepší orientace v modelovaném obvodu vytvořeny subsystemy. Modely těchto subsystemů jsou uvedeny v Příloze N:

- Sací potrubí 19A,
- Výtlač z 19A k T9
- Potrubí do N 11A,
- Potrubí do N 10
- Převodník zobrazení absolutního tlaku [28].



## 4. Výsledky numerického modelování

V této závěrečné kapitole diplomové práce jsou uvedeny výsledky numerického simulování metody konečných objemů pomocí programu Ansys Fluent a metody elektrohydraulické analogie – program Matlab – Simulink – SimHydraulics. Je důležité úvodem připomenout, co bylo cílem modelování jednotlivých metod, tedy metody konečných objemů (MKO) a metody elektrohydraulické analogie (MEA).

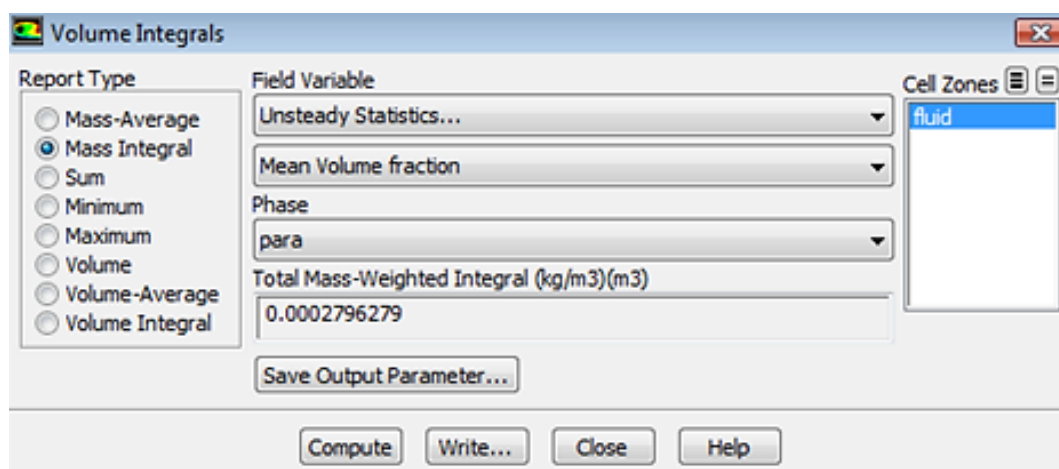
Výsledkem numerického modelování MKO programem Ansys Fluent je porovnání množství páry [kg] vytvořené z vody, která je brána jako referenční kapalina, a tekutin zadaných firmou Hutní PROJEKT, a. s. Jedná se o Vypírací roztok (VR),  $\text{NH}_3$  vodu ( $\text{NH}_3$ ), Nasycený roztok (NR) a Dehtový kondenzát (DKA, DKB). Rozbor problému modelování vícefázového proudění, metodika řešení a definování okrajových podmínek pro potřeby simulace jsou uvedeny v kapitole 3.1. V kapitole 4.1 je uveden obecný postup vyhodnocování množství páry. Následně graficky vyjádříme toto množství páry pro zadané kapaliny.

V podkapitole, věnované numerickému modelování MEA programem SimHydraulics jsou porovnány nejprve hodnoty naměřené z reálné trati s hodnotami získanými z matematické simulace. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 21 a jsou doprovázeny komentářem. Dále je požadováno numericky simulovat a následně odečíst hodnoty ztrátového součinitele filtru  $\zeta_{FILTR}$  při výskytu kavitace v sání hydrodynamického čerpadla. Hodnoty jsou zapsány do tabulek.

Na úplný závěr celé této kapitoly jsou shrnuty všechny dosažené výsledky.

## 4.1 Vyhodnocení množství páry – Ansys Fluent

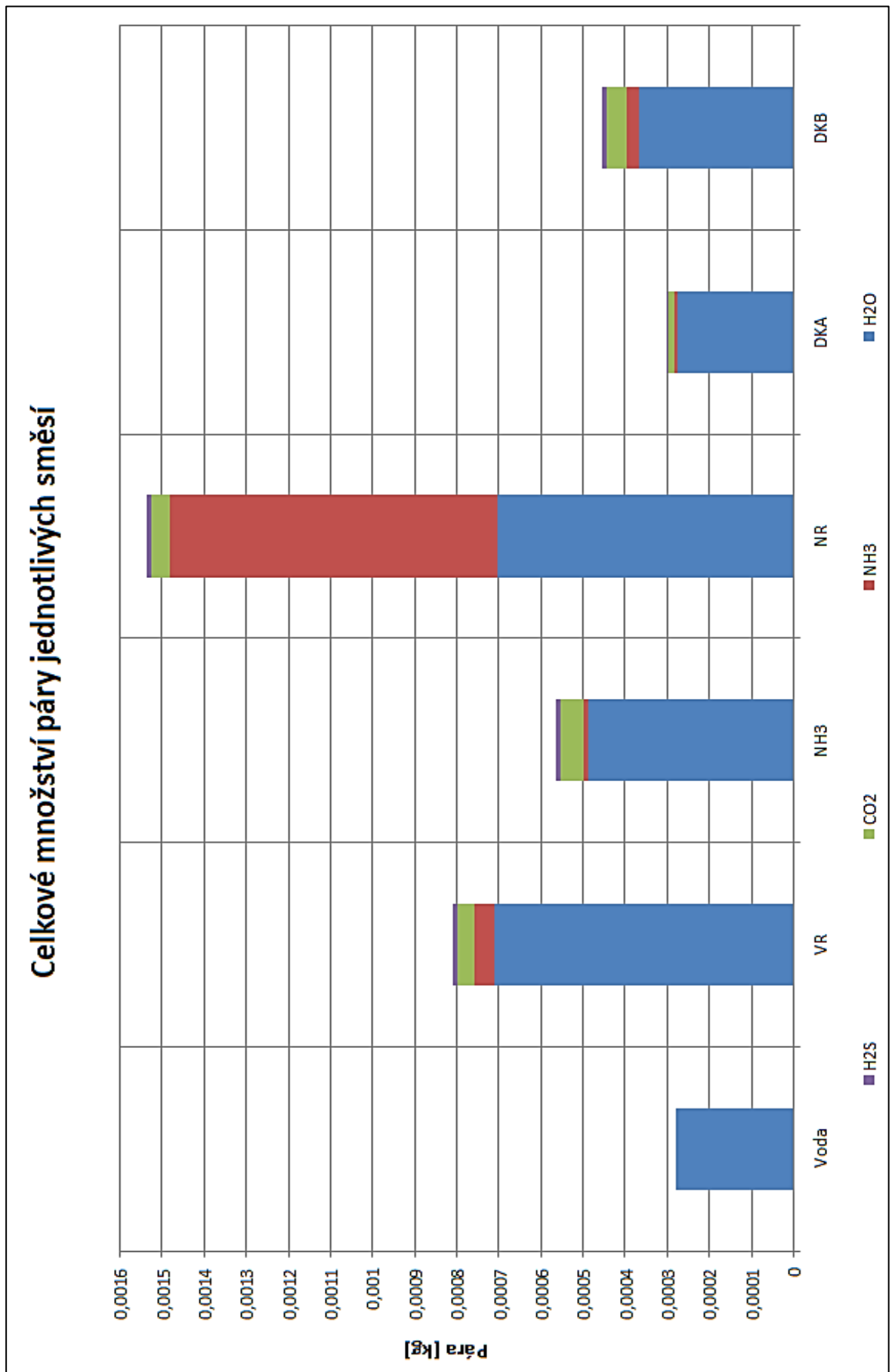
Na úvod je zde uveden postup vyhodnocování množství páry. Tento postup je platný pro vyhodnocení všech modelovaných látek. Množství páry [kg] je vždy vyhodnoceno po provedení výpočtu s počtem časových kroků 4096. Následně je vybrána položka Report – Result Reports – Volume Integrals (Objemové integrály). Dále je zvolena možnost v nabídce Report Type – Mass Integral (Hmotnostní integrál). V položce Field Variable je zvoleno Unsteady Statistics – Mean Volume Fraction, fáze Phase – para, je označena oblast buněk v nabídce Cell Zones – fluid a je stisknuto tlačítko Compute. Vypočtená hodnota je střední hodnota (Unsteady Statistics), objemového zlomku (Volume Fraction) páry v celé výpočetní oblasti (Cell Zones – fluid) násobená hustotou příslušné páry. Tomu odpovídá jednotka  $[(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3)]$ . Je tedy vypočtena hodnota středního množství vyloučené páry [kg] v celé oblasti Lavalovy dýzy. Tyto hodnoty, všech modelovaných látek, jsou postupně zaznamenány níže v Tabulce 20 a zobrazeny graficky, viz následující strana. Pro směsi, kde jsou modelovány jednotlivé příměsi, je celkové množství páry směsi obdrženo prostým součtem všech vyloučených par příslušných příměsí dané směsi.



Obrázek 22. Dialogové okno Result Reports – Volume Integrals

Pára [kg]	Voda	VR	NH <sub>3</sub>	NR	DKA	DKB
H <sub>2</sub> O	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$7,11 \cdot 10^{-4}$	$4,88 \cdot 10^{-4}$	$7,04 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$3,67 \cdot 10^{-4}$
NH <sub>3</sub>	0	$4,62 \cdot 10^{-5}$	$9,45 \cdot 10^{-6}$	$7,76 \cdot 10^{-4}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$
CO <sub>2</sub>	0	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$5,66 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub> S	0	$7,96 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$8,11 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
<b>Σ</b>	<b><math>2,8 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>8,08 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>5,64 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>1,54 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>3,01 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>4,53 \cdot 10^{-4}</math></b>

Tabulka 20. Přehled výsledků množství páry modelovaných směsí



Graf 7. Grafické vyjádření množství páry směsí  
 VR – Vypírací roztok, NH<sub>3</sub> – NH<sub>3</sub> voda, NR – Nasycený roztok, DKA – Dehtový kondenzát, varianta A, DKB – Dehtový kondenzát, varianta B

## 4.2 Vyhodnocení simulace reálné trati – SimHydraulics

Všechny matematické modely trati, které byly simulovány v SimHydraulics, a následně budou prezentovány jejich výsledky, jsou uvedeny v následujícím výčtu. Celkový model trati je uveden na Obrázku 21:

1. matematický model trati pro porovnání hodnot naměřených na reálné trati a hodnot získaných matematickou simulací – obecný model,
2. matematický model pro simulování detekce kavitace 20 °C,
3. matematický model pro simulování detekce kavitace 25 °C,
4. matematický model pro simulování detekce kavitace 30 °C,

Vyhodnocení prvního bodu je provedeno v Tabulce 21. Je zde uvedeno porovnání hodnot získaných z reálné trati a hodnot získaných matematickou simulací programem SimHydraulics. Kapalina **NH<sub>3</sub> voda**, teplota cca **22 °C**. Data byla naměřena dne 2. 2. 2012 [17]. Pro lepší přehlednost jsou v modelu dva průtokoměry označeny stejně jako na reálné trati, tedy FT 1111 a FT 1208. Rovněž tlakoměr je označen stejně, PT 1033.

Snímač	Naměřené hodnoty z trati		SimHydraulics - hodnoty z modelované trati	
	Naměřeno	Přepočteno	Naměřeno	Přepočteno
$Q_V$	[m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ]
FT 1111	54,5	0,015138889	0,01515	54,54
FT 1208	59,1	0,016416667	0,01641	59,08
$p$	[MPa]	[Pa]	[Pa]	[MPa]
PT 1033	0,538	538000	5,855.10 <sup>5</sup>	0,5855

Tabulka 21. Porovnání hodnot získaných z reálné trati a numerickou simulací

Pro úplnost je zde uveden všeobecně známý vztah pro přepočítávání hodnot průtoku  $Q_V$ :

$$Q_V [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] = 3600 \cdot Q_V [\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (4.2.1)$$

Na trati jsou naměřeny výsledky  $Q_V$  v [m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>], SimHydraulics počítá v základních jednotkách SI [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>]. Porovnáním, zde tedy naměřené hodnoty reálné trati, s hodnotami, přepočtenými vztahem (4.2.1), získanými simulací pomocí softwaru SimHydraulics (červené sloupce), je možné vyvodit závěr, že modelovaný obvod odpovídá reálnému obvodu. Z porovnání je vidno rozdílných hodnot tlaků  $p$  na manometru PT1033, nižší hodnota je naměřená, což může být způsobeno např. zanesením filtru v sání, obvod se již nějakou dobu provozuje a je možno tedy tento jev předpokládat. Pro informaci, při hodnotě ztrátového součinitele  $\zeta_{FILTRU} \approx 50$ , byl odečten tlak na manometru PT1033 - 538000 Pa.

Nyní je potřeba vyhodnotit body 2 až 4 uvedené na předchozí stránce. Parametry zadané i získané simulací jsou uvedeny v následující tabulce:

Teplota	$V_N$	$Q_{VFILTR}$	$u$	$\zeta_{FILTRU}$	$\Delta p_{FILTRU}$	KAVITACE	$Re$
[°C]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[1]	[Pa]	[-]	[1]
20	33,73	0,0274	0,818	360	120793	ANO	168606
25	33,74	0,02753	0,822	347	117398	ANO	189659
30	33,73	0,02766	0,856	334	113910	ANO	212917

Tabulka 22. Parametry obvodu při dosažení kavitace

$Q_{FILTR}$  značí průtok filtrem při dosažení kavitace; rozsahem Reynoldsových čísel se pohybujeme v rozsahu, pro který jsme definovali místní odpor – kolena. Objem nádrže  $V_N$  se podařil dodržet v přípustných mezích. Výpočet rychlosti proudění  $u$ , kdy je znám průtok filtrem  $Q_{FILTR}$  a tlakové ztráty  $\Delta p_{FILTRU}$  je proveden dle dříve uvedených vzorců (3.2.3) a (3.2.4), str. 58. Maximální tlaková ztráta je, při 20 °C, 120 kPa. Zde by se mělo ověřit, zdali vůbec filtrační vložka tuto tlakovou ztrátu snese, aniž by se protrhla.

Teplota	$Q_{VHG19ABEZKAV}$	$Q_{VFILTRKAV}$	Pokles průtoku $\Delta Q_V$	$Q_{VHG18A}$
[°C]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	[%]	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
20	0,03157	0,0274	13,2	0,012478
25	0,03157	0,02753	12,8	0,012564
30	0,03157	0,02766	12,4	0,0126505

Tabulka 23. Parametry průtoku bez kavitace a s kavitací, průtok k doplňování N 11A

Teplota	$p_{PT1033BEZKAV}$	$p_{PT1033KAVITACE}$	Pokles tlaku $\Delta p$
[°C]	[Pa]	[Pa]	[%]
20	585500	493200	15,8
25	584700	495200	15,3
30	583700	497100	14,8

Tabulka 24. Hodnoty tlaku  $p$  na manometru PT1033

Poslední tabulka může sloužit i jako predikce před možným kavitacním působením. Obecně lze stanovit, že pokles tlaku o 15 %, tj. cca na hodnotu 500000 Pa, zanesením filtrační vložky, může znamenat kavitaci v sání. Je ovšem potřeba si uvědomit, že bude-li klesat průtok  $Q_V$ , ventily S30 určené pro škrcení se budou otevírat, protože poroste hladina v nádrži N 11A. Bude tedy potřeba menšího tlaku  $p$  v místě PT1033 pro překonání odporu škrcení. Lepší představu dávají výsledky uvedené v Tabulce 23. Zde pomocí instalovaných průtokoměrů můžeme určit celkový úbytek průtoku, pokud dosáhne  $\Delta Q_V \approx 12$  %, můžeme předpokládat kavitaci.



## 4.3 Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval kavitací a možnostmi jejího matematického modelování. Diplomová práce byla zadána firmou Hutní PROJEKT, a. s. V úvodní teoretické části je popsáno dělení kavitace, teorie vzniku kavitačních jader, odvození Rayleigh-Plessetovy rovnice a jsou uvedeny příklady kavitačního působení především v čerpadle a potrubí. Další část se zabývá numerickým modelováním. Pro numerické modelování jsou zvoleny programy Ansys Fluent – metoda konečných objemů a Matlab – Simulink – SimHydraulics – metoda elektrohydraulické analogie.

Cílem simulace metodou konečných objemů bylo porovnání kapalin, přesněji množství vyloučené páry [kg] těchto kapalin. Kapalinami byly voda, Nasycený roztok,  $\text{NH}_3$  voda, Vypírací roztok a Dehtový kondenzát. V této části je popsán matematický model kavitace – model směsi. Dále je vybrán samotný kavitační model, Schnerr – Sauer model a také je uvedena metodika výpočtu a postup práce v Ansys Fluentu, která je významně ovlivněna možnostmi, který tento program v současné verzi nabízí. Proto bylo potřeba jednotlivé roztoky rozdělit dle příměsí a každou příměs modelovat zvlášť. Graf 7 je grafickým výsledkem všech provedených simulací. Největší množství páry vyloučí Nasycený roztok, což je dáno především vysokou koncentrací amoniaku. Druhou směsí s největším množstvím vyloučené páry je Vypírací roztok, těsně následuje  $\text{NH}_3$  voda, Dehtový roztok a čistá voda. Je možné z tohoto grafu vyvodit závěr, že Nasycený roztok bude při možnosti splnění podmínek kavitačního působení silně způsobovat kavitační opotřebení v porovnání s ostatními látkami.

Metoda elektrohydraulické analogie – SimHydraulics se zaměřila na modelování reálné trati. Jsou popsány všechny prvky, které byly využity v obvodu a také postup modelování. Jsou definovány známé okrajové podmínky a postup simulace. Cílem první simulace bylo ověření hodnot získaných simulací s hodnotami získanými z reálné trati, viz Tabulka 21. Zde je dosaženo velice uspokojivých výsledků pro další body simulace. Ty měly za úkol nastavit na simulovaném obvodu takové podmínky, aby se dosáhlo vzniku kavitace v zadaném teplotním rozsahu obvodu. Pro toto modelování bylo využito předpokladu postupného zanášení filtrační vložky v sacím potrubí čerpadla. Dbal jsem na to, abych se co nejvíce přiblížil možné situaci na reálné trati. Výstupem z těchto simulací jsou tabulky 21, 22 a 23 na předchozí straně. Především je potřeba poukázat na výsledky uvedené v Tabulce 22, která je zaměřena na pokles celkového průtoku  $\Delta Q_V$  v obvodu, při kterém již může vzniknout kavitace v sání čerpadla. Důvody, proč výsledky v Tabulce 23 nejsou zcela přesné, jsou vysvětleny na předchozí stránce.

## 5. Seznam literatury

- [1] Antoine Equation Parameters - Ammonia. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7664417&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on#ANTOINE>>
- [2] Antoine Equation Parameters - Carbon dioxide. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on#ANTOINE>>
- [3] Antoine Equation Parameters - Hydrogen Sulfide. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7783064&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on#ANTOINE>>
- [4] Antoine Equation Parameters - Water. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on#ANTOINE>>
- [5] BABEJOVÁ, S. *Experimentální zařízení pro vizualizaci vzniku a vývoje kavitace*. Diplomová práce. Ostrava, 2010. 70 s. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Jana Rautová.
- [6] BÍLÝ, D. *Matematické modelování vzniku a vývoje kavitace v jednoduchém prvku*. Diplomová práce. Ostrava, 2010. 86 s. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Jana Rautová.
- [7] BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and bubble dynamics* [online]. New York: Oxford University Press, 1995, 282 s. [cit. 2012-01-13]. ISBN 01-950-9409-3. Dostupné z: <<http://authors.library.caltech.edu/25017/1/cavbubdynam.pdf>>
- [8] BRENNEN, Christopher E. *Fundamentals of multiphase flow* [online]. New York: Cambridge University Press, 2005, 345 s. [cit. 2012-01-15]. ISBN 0521 848040. Dostupné z: <<http://authors.library.caltech.edu/25021/2/cabook.pdf>>
- [9] Cavitation in Centrifugal Pump [online]. 2010, poslední verze 6. 11. 2009. [cit. 2011-11-15]. Dostupné z: <<http://www.scribd.com/doc/16325500/Cavitation-in-Centrifugal-Pump>>
- [10] DRÁBKOVÁ, Sylva a kol. *Mechanika tekutin* [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. 248 s. [cit. 2011-09-18]. Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>>

- [11] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Doprava kapalin* [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2011-09-15]. Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [12] DVOŘÁK, Lukáš. *Vlastnosti tekutin* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010, 62 s. [cit. 2011-11-12].  
Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>>
- [13] D'AGOSTINO, Luca. SALVETTI, María Guillén. *Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps* [online]. New York: Springer, 2007, 351 s. [cit. 2012-03-12]. ISBN 978-321-1766-682. Dostupné z: <[http://ebookey.org/Fluid-Dynamics-of-Cavitation-and-Cavitating-Turbopumps\\_229387.html](http://ebookey.org/Fluid-Dynamics-of-Cavitation-and-Cavitating-Turbopumps_229387.html)>
- [14] EISENBERG, Phillip. Cavitation. *Massachusetts Institute of Technology* [online]. 2008, poslední verze 5. 4. 2008, 121 – 128 s. [cit. 2011-11-12].  
Dostupné z: <<http://web.mit.edu/hml/ncfmf/16CAV.pdf>>
- [15] FIŠER, Adam. Nabídka čerpadel [online]. [cit. 2011-11-15]. Osobní komunikace.
- [16] FIŠER, Adam. Zkoumané roztoky [online]. [cit. 2011-11-22]. Osobní komunikace.
- [17] FIŠER, Adam. Modelovaná trať [online]. [cit. 2012-02-06]. Osobní komunikace.
- [18] Gate Valve. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/gatevalve.html>>
- [19] HALFAR, Jiří. Dotaz pro charakteristiky tlakové ztráty -  $f(Q)$  [online]. [cit. 2011-11-24]. Osobní komunikace.
- [20] HAVLÍK, Jiří. *Konstrukce strojních částí tekutinových systémů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007, 115 s. poslední verze 13. 1. 2011. [cit. 2011-12-08]. ISBN 978-80-248-1636-4.  
Dostupné z: <[http://www.347.vsb.cz/files/hav35/Skripta\\_KSCTS.pdf](http://www.347.vsb.cz/files/hav35/Skripta_KSCTS.pdf)>
- [21] CHALOUPKA, Dušan. BENEŠ, Jiří. *Kavitace regulačních ventilů, vyhodnocení poškození* [online]. 2009, aktualizováno 5. 5. 2009 [cit. 2011-12-11].  
Dostupné z: <<http://www.allforpower.cz/clanek/kavitace-regulacnich-ventilu-vyhodnoceni-poskozeni/>>
- [22] ILKOVIČ, Dionýz. *Fyzika pre študujících na vysokých technických školách*. 6. vydanie. Bratislava: SVTL, 1957, 240 - 307. Edícia teoretickej literatury.
- [23] INCROPERA, F. a kol. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6<sup>th</sup> edition. New York: John Wiley and Sons, 2007, 997 s. ISBN 978-0-471-45728-2.
- [24] JUREČKA, Martin. *Erozivní účinky kavitace* [online]. Bakalářská práce. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně, 43 s. [cit. 2012-01-27]. Vedoucí bakalářské práce Pochylý František. Dostupné z: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27956](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27956)>
- [25] Kavitace. *Wikipedia* [online]. 2012 [cit. 2011-11-02].  
Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>>

- [26] KOLEV, Nikolay Ivanov. *Multiphase flow dynamics. 1: Fundamentals* [online]. 2<sup>nd</sup> edition. Berlin: Springer, 2005. 753 s. [cit. 2012-05-01]. + 1 CD ROM. ISBN 35-402-2106-9. Dostupné z: <<http://www.media.rmutt.ac.th/media/e-book/Engineer/Fluid%20Mechanic/Multiphase%20Flow%20Dynamics%201.pdf>>
- [27] Konstanty Antoineovy rovnice. *Vysoká škola Chemicko-Technologická v Praze* [online]. 2012 [cit. 2011-11-15]. Dostupné z: <<http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/antoine.html>>
- [28] KOVÁCS, M. *Modelování sací a dopravní výšky čerpadla programu Matlab Simulink*. Diplomová práce. Ostrava, 2010. 66 s. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Milada Kozubková.
- [29] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX* [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008, 153s. ISBN 978-80-248-1913-6. [cit. 2011-09-25]. Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>
- [30] KOZUBKOVÁ, Milada. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 130s. ISBN 978-80-248-2043-9.
- [31] KOZUBKOVÁ, Milada. *Simulace a modelování hydraulických systémů* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 128s. [cit. 2011-09-25]. Dostupné z: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Simulace2009.pdf>>
- [32] LABOUTKA, Karel. SUCHÁNEK, Tomáš. Hodnoty součinitelů místních ztrát - zdroje tepla a základní tvarovky potrubí. *TZB - info* [online]. 2012 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/21-hodnoty-soucinitelu-mistnich-ztrat-zdroje-tepla-a-zakladni-tvarovky-potrubu>>
- [33] Local Resistance. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/localresistance.html>>
- [34] MARTYNOV, S. B. MASON, J. D. HEIKAL, R. M. Numerical Simulation of Cavitation Flows Based on Their Hydrodynamic Similarity. *International Journal of Engine Research* [online]. 2006-6-1, roč. 7, č. 3, s. 283-296 [cit. 2011-11-21]. ISSN 1468-0874. DOI: 10.1243/14680874JER04105. Dostupné z: <[http://www.cham.co.uk/DOCS/papers/Martynov\\_paper\\_1.pdf](http://www.cham.co.uk/DOCS/papers/Martynov_paper_1.pdf)>
- [35] MILLER, D. S. *Internal flow systems*. 2<sup>nd</sup> edition. Cranfield, Bedford: BHRA (Information Services), 1990, 396 s. ISBN 09-477-1177-5.
- [36] NOREK, Igor. Dotaz k ax. kompenzátoru MFA PN 16 [online]. [cit. 2012-02-03]. Osobní komunikace.
- [37] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia, 1969, 280 s.

- [38] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1990, 336 s. ISBN 80-030-0206-0.
- [39] NPSH (Kavitační deprese) [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: [http://cbs.grundfos.com/GCZ\\_Czech\\_Republic/lexica/HEA\\_NPSH.html#->](http://cbs.grundfos.com/GCZ_Czech_Republic/lexica/HEA_NPSH.html#->)
- [40] PAVEL, Luděk. Dotaz k filtru D 71 117516. PN 16 [online]. [cit. 2011-11-24]. Osobní komunikace.
- [41] POUSTKA, Jan. Vyjadřování obsahu a koncentrace. *Vysoká škola Chemicko-Technologická v Praze* [online]. 2011 [cit. 2011-11-22]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/poustkaj/Vyjadrovani%20obsahu%20a%20koncentrace.htm>
- [42] RASZKA, J. *Matematické modelování vypařování z porézního prostředí*. Vypracování zadání z předmětu Numerické modelování 3D proudění. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. 24 s.
- [43] Resistive Pipe LP. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/resistivepipelp.html>
- [44] Saturation Properties for Ammonia — Temperature Increments. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: [http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7664417&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa\\*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF](http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7664417&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF)
- [45] Saturation Properties for Carbon dioxide — Temperature Increments. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: [http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C124389&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=MPa&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa\\*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF](http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C124389&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=MPa&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF)
- [46] Saturation Properties for Hydrogen sulfide — Temperature Increments. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: [http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7783064&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa\\*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF](http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=20&THigh=30&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7783064&Action=Load&Type=SatP&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF)
- [47] Saturation Properties for Water — Temperature Increments. *National Institute of Standards and Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-17]. Dostupné z: [http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=273.15&THigh=303.15&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=SatP&TUnit=K&PUnit=MPa&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa\\*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF](http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?TLow=273.15&THigh=303.15&TInc=&Applet=on&Digits=5&ID=C7732185&Action=Load&Type=SatP&TUnit=K&PUnit=MPa&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fmol&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa*s&STUnit=N%2Fm&RefState=DEF)
- [48] Segmented Pipe LP. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/segmentedpipelp.html>

- [49] SUCHÁNEK, Jan. Kavitační opotřebenění. *Tribotechnika* [online]. 2011 [cit. 2011-12-04]. Dostupné z: <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12011/kavitacni-opotrebeni.html>>
- [50] SURÝ, Alexandr. Kavitační mechanismus [online]. [cit. 2012-03-09]. Osobní komunikace.
- [51] Tlak nasycených par čistých látek (Antoineova rovnice). *Vysoká škola Chemicko-Technologická v Praze* [online]. 2011 [cit. 2011-11-19]. Dostupné z: <[http://www.vscht.cz/uchi/e\\_tabulky/antoine.html](http://www.vscht.cz/uchi/e_tabulky/antoine.html)>
- [52] Turbulence kinetic energy. *Wikipedia* [online]. 2012, datum aktualizace 20. 4. 2012 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence\\_kinetic\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence_kinetic_energy)>
- [53] T-Junction. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/tjunction.html>>
- [54] Variable Head Three-Arm Tank. *MathWorks* [online]. 2012 [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/hydro/ref/variableheadthreearmtank.html>>
- [55] YAWS, Carl L. *Chemical properties handbook: physical, thermodynamic, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals* [online]. New York: McGraw-Hill, 1999, 641 – 672 s. [cit. 2011-11-12]. ISBN 9780070734012. Dostupné z: <[http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0072849606/315014/physical\\_properties\\_table.pdf](http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0072849606/315014/physical_properties_table.pdf)>
- [56] Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 13 – Theory Guide*. 2010.
- [57] Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 13 – User's Guide*. 2010.
- [58] Matlab Simulink. *SimHydraulics User's Guide* [online]. 2012. Dostupné z: <[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/phymod/hydro/hydro\\_uq.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/hydro/hydro_uq.pdf)>

## 6. Seznam příloh

- A. Fyzikální vlastnosti modelovaných látek – Ansys Fluent
- B. Hmotnostní zlomky směsí, parciální tlaky příměsí – Ansys Fluent
- C. Okrajové podmínky pro simulace – Ansys Fluent
- D. Seznam prvků obvodu, přehled Reynoldsových čísel – SimHydraulics
- E. Seznam výkresové dokumentace trati – SimHydraulics [CD-ROM]
- F. Detail rozměrů nádrže, výpočet počátečního objemu  $V_{N11A}$  – SimHydraulics
- G. Katalogový list hydrodynamického čerpadla HG 19A – SimHydraulics
- H. Katalogový list šoupátkového ventilu typ S30 – SimHydraulics
- I. Definování místních odporů – T-kusy – SimHydraulics
- J. Definování místních odporů – Kolena – SimHydraulics
- K. Definování ostatních místních odporů – SimHydraulics
- L. Výpočet tlaku nasycených par  $p_{VAP}$   $\text{NH}_3$  směsi – SimHydraulics
- M. Matematické modely simulace kavitace – Ansys Fluent [CD-ROM]
- N. Matematický model reálné trati, subsystémů – SimHydraulics [CD-ROM]