



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VLIV TVARU VENTURIHO DÝZY NA INTENZITU
HYDRODYNAMICKÉ KAVITACE**

VENTURI NOZZLE SHAPE INFLUENCE ON HYDRODYNAMIC CAVITATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Mračko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Patrik Mračko**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Vliv tvaru Venturiho dýzy na intenzitu hydrodynamické kavitace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Venturiho dýza je jednoduchou geometrickou konfigurací, ve které lze při vhodných okrajových podmínkách vyvolat hydrodynamickou kavitaci. Venturiho dýza je také využívána jako nejjednodušší zařízení pro eliminaci patogenních mikroorganismů ve vodě hydrodynamickou kavitací, přičemž není známa souvislost mezi jejím tvarovým provedením a stupněm intenzity kavitace.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je provedení rešerše v oblasti využití Venturiho dýzy a konvergentně–divergentních trysek pro eliminaci mikroorganismů a obecněji pro vyvolání kavitujícího proudění. Na základě výpočtového modelování proudění pak provést analýzu souvislosti mezi tvarem Venturiho dýzy a intenzitou kavitace pro dané okrajové podmínky.

Seznam doporučené literatury:

KOZÁK, J.; RUDOLF, P.; HUDEC, M.; ŠTEFAN, D.; FORMAN, M. Numerical and Experimental Investigation of the Cavitating Flow Within Venturi Tube. JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME, 2018, roč. 141, č. 4, s. 1-11. ISSN: 0098-2202.

SAHARAN, K.V.K. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. Journal of Hydrodynamics. 2016, 28(2), 293-305.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/2022

V Brně, dne:

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

Abstrakt

Práca sa zaoberá vplyvom rozličných tvarov difúzoru Venturiho dýzy na kavitáciu vznikajúcu pri prúdení kvapaliny. Sú navrhnuté modely s rozličnými variantami tvaru difúzorovej steny, ktoré sú vyšetované pomocou numerickej simulácie. Podľa dvoch navrhnutých variant sú vyrobené reálne modely dýz, na ktorých je prevedené experimentálne meranie. Počas experimentálneho merania je sledované prúdenie v daných dýzach pri širokom rozmedzí kavitačných čísiel. Na základe výsledkov merania je určené, ktorým tvarom dýzy je možné docieľiť intenzívnejšiu kavitáciu.

Kľúčové slová:

hydrodynamická kavitácia, Venturiho dýza, kavitačná oblasť, difúzor, tlakové pulzácie, Fourierova transformácia, frekvencia

Abstract

Thesis focuses on the influence of various differently shaped diffusers of Venturi nozzle on the cavitation, which occurs during flow of liquid through said nozzle. Several models with different shapes of diffuser's wall were designed. Cavitation in these models was then investigated with numerical calculation. Two physical nozzles were made according to designed models and tested on experimental circuit. As part of the experiment, the cavitation inside the nozzles was measured with flow of liquid corresponding to a large range of cavitation numbers. Results of this experiment were used to determine which model of the nozzle is more effective in creation of a cavitating flow.

Keywords

hydrodynamic cavitation, Venturi nozzle, cavitation region, diffuser, pressure fluctuations, Fourier transformation, frequency

Bibliografická citácia

MRAČKO, Patrik. *Vliv tvaru Venturiho dýzy na intenzitu hydrodynamické kavitace*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143030>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

Čestné prehlásenie autora

Čestne prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a použil iba literatúru, ktorú som uviedol v zozname.

V Brne dňa:

.....

Patrik Mračko

Pod'akovanie

Rád by som sa touto cestou poďakoval doc. Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za vytvorenie zaujímavej témy diplomovej práce a za pomoc pri jej vypracovaní. Taktiež by som chcel poďakovať Ing. Martinu Hudcovi, Ph.D., Bronislavovi Kusému a Karlovi Večeřovi za ich pomoc s prípravou a vykonaním experimentálneho merania.

Obsah

1 Úvod	9
2 Teoretická časť	10
2.1 Kavitácia	10
2.2 Druhy kavitácie	11
2.3 Štádia vzniku kavitačnej oblasti.....	13
2.4 Priebeh vzniku kavitačných bublín	14
2.5 Kavitačné poškodenie.....	14
2.6 Užitočné využitie kavitácie	16
2.7 Vplyv tvaru Venturiho dýzy na kavitáciu	18
3 Výpočetná časť	22
3.1 Geometria.....	22
3.2 Výpočtová sieť	23
3.3 Okrajové podmienky a fyzikálne vlastnosti materiálov.....	23
3.4 Numerické schémy a nastavenie riešiteľa	24
3.5 Aplikácia UDF pre korekciu turbulentnej viskozity.....	26
3.6 Spoločné vlastnosti prúdenia pre všetky modely.....	28
3.7 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy klasického tvaru.	29
3.8 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy konkávneho tvaru	34
3.9 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy konvexného tvaru	36
3.10 Optimalizácia tvaru difúzoru	39
3.11 Overenie významu difúzoru	42
3.12 Porovnanie výsledných výsledkov zo všetkých modelov	45
4 Experimentálna časť	47
4.1 Testovací okruh a použitá meracia technika	47
4.2 Postup a výsledky merania	49
5 Záver	54
6 Zoznam použitých zdrojov	56
7 Zoznam použitých symbolov a skratiek	58

1 Úvod

Hydrodynamická kavitácia je fyzikálny dej prítomný pri prevádzke prevažnej väčšiny hydrodynamických strojov. Za bežných okolností je považovaná za nežiadúci dej, ktorý dokáže znížiť efektivitu daného stroja alebo spôsobiť jeho poškodenie. Práve z tohto dôvodu sú zaužívané postupy pri návrhu, rovnako ako pri prevádzke hydrodynamických strojov, ktorých cieľom je zabránenie alebo aspoň obmedzenie vzniku kavitácie.

Existujú avšak aj technické aplikácie, v ktorých je vznik kavitácie žiadaným dejom. Ide predovšetkým o situácie, kde je možné využiť deštruktívne účinky kavitácie ku ničeniu znečisťujúcich látok alebo drvenie materiálu. Jednou z takýchto aplikácií je aj čistenie odpadových vôd. Hydrodynamická kavitácia sa využíva v kombinácii s rozličnými inými procesmi ku odstraňovaniu polutantov z vody. Táto varianta čistenia vody sa ukázala byť efektívna pre odstraňovanie baktérií, siníc ale aj organických zlúčením. Dôležitým prvkom, ktorý sa využíva pre tvorbu kavitácie pri tejto aplikácii je Venturiho dýza. Ide o jednoduché zariadenie založené na premene tlakovej energie na kinetickú, pri prietoku kvapaliny zúžením miestom v hrdle dýzy. To má za následok pokles tlaku, ktorý vedie ku vzniku kavitácie.

Pre reguláciu kavitácie vznikajúcej vo Venturiho dýze sa najčastejšie používa riadenie prietoku. Pre dosiahnutie čo najintenzívnejšej kavitácie sa bežne používajú iba minimálne úpravy tvaru dýzy. Najčastejšie sú zmeny dĺžky hrdla dýzy, alebo zmeny uhlu vstupného konfúzoru a výstupného difúzoru. Nastáva ale otázka, ako sa mení kavitácia generovaná vo Venturiho dýze v prípade výraznejšej zmeny v jej tvare. Touto problematikou sa zatiaľ zaberalo iba malé množstvo autorov a práve vyšetrenie tohto problému je hlavným cieľom tejto diplomovej práce.

Boli navrhnuté dva alternatívne tvary Venturiho dýzy, pričom v oboch bol upravený iba tvar steny výstupného difúzoru. Prvá varianta je model Venturiho dýzy, v ktorej má difúzor konkávny tvar. Zatiaľ čo v druhej variante má stena difúzoru tvar konvexný. Je zvolená reálna Venturiho dýza, ktorá je využitá ako základ pre všetky vyšetované modely. Následne je vytvorený CFD model s totožnými dimenziami ako zvolená dýza a je v ňom simulované prúdenie kvapaliny. Sú taktiež vytvorené dva výpočtové modely s rovnakými rozmermi a okrajovými podmienkami ako prvom prípade, ale s upraveným tvarom difúzoru. Vypočítaný charakter prúdenia a predovšetkým kavitácie je následne porovnaný medzi jednotlivými modelmi. Porovnanie výsledkov zo všetkých modelov poslúži k posúdeniu, či má zmena tvaru Venturiho dýzy vplyv na vzniknutú kavitáciu.

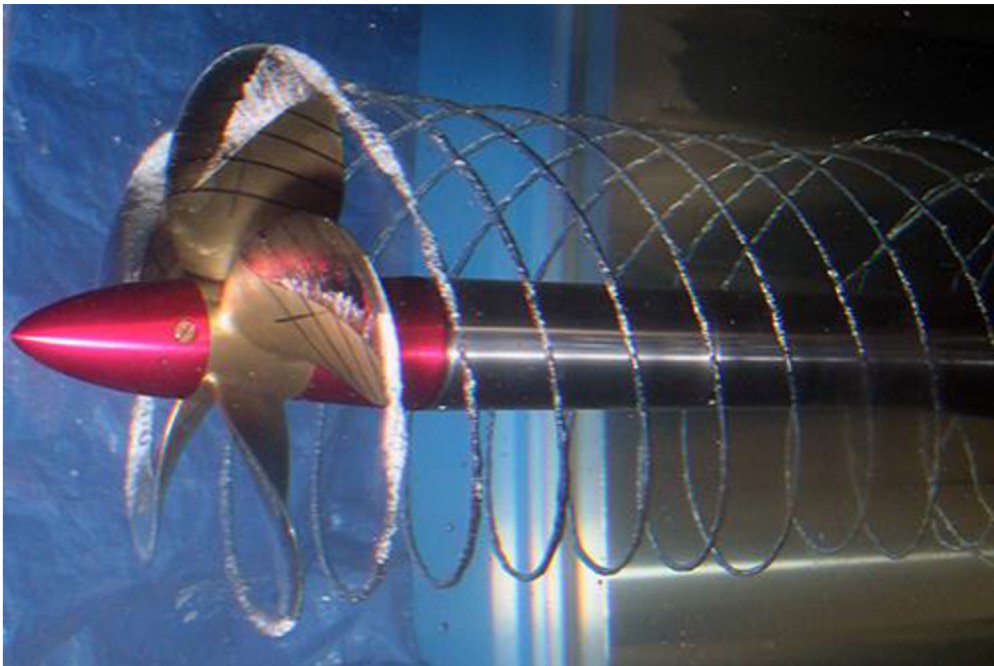
Následne je prevedené experimentálne meranie na reálnych modeloch navrhutej konkávnej a konvexnej dýzy. Každý z modelov je podrobený meraniu tlakových zmien vyvolaných kavitáciou pri prúdení s rozličnými kavitačnými číslami. Z výsledkov experimentálneho merania je určené, ktorá z navrhnutých variant upravenej Venturiho dýzy má najpriaznivejší vplyv na vzniknutú kavitáciu.

2 Teoretická časť

2.1 Kavitácia

Kavitácia je fyzikálny jav popisujúci vznik a následný kolaps vzduchových dutín v kvapaline, zapríčinený poklesom tlaku pod tlak nasýtených pár danej kvapaliny. Tento jav je dôležitým faktorom pri návrhu a stavbe všetkých strojov, ktoré využívajú vodu ako pracovné médium. Hlavným dôvodom je kavitačné poškodenie, ktoré môže vzniknúť na povrchu strojných súčastí vystavených kavitácií. Z tohto dôvodu v bežnej praxi prevláda snaha o zamedzenie vzniku kavitácie počas prevádzky hydraulických strojov. Existujú ale aj aplikácie, pri ktorých je kavitácia a jej deštruktívne účinky užitočným a žiadaným efektom. [1]

Časť objemu kvapaliny vyplnená kavitačnými bublinami sa nazýva kavitačná oblasť. Podľa tvaru rozdeľujeme kavitačné oblasti na kapsovitú, vláknovú a plošnú. V prípade kapsovitej oblasti, zhľuky kavitačných bublín nadobúdajú tvar oblaku. Tento druh kavitačnej oblasti je možné najčastejšie pozorovať pri prúdení v potrubí, dýzach alebo hydraulických strojoch. Pri vláknovej oblasti kavitačné bubliny tvoria dlhé reťazce, ktoré svojím tvarom pripomínajú vlákna. Najčastejším miestom výskytu kavitácie tohto tvaru sú koncové hrany lopatiek rotačných častí turbín a čerpadiel. Plošné kavitačné oblasti vznikajú pri stenách



Obr. 2.1 Príklad vláknovej kavitačnej oblasti vznikajúcej na konci lopatiek axiálnej turbíny.[2]

obtekaných telies. V tomto prípade tvar kavitačnej oblasti kopíruje tvar obtekaného telesa a vyskytuje sa najčastejšie pri obtekaní ponorených profilov. [1,3]

Pre určenie kritických podmienok, pri ktorých bezkavitačné prúdenie začína kavitovať sa používa kavitačné číslo, taktiež známe ako Thomov kavitačný súčiniteľ. Kavitačné číslo môže mať viaceré formulácie pre rozličné špecifické prípady, ale najčastejšie používaný tvar pre hydraulickú kavitáciu je :

$$\sigma = \frac{p_r - p_{np}}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (2.1)$$

Význam jednotlivých členov rovnice:

p_r → referenčný tlak
 p_{np} → tlak nasýtených pár danej kvapaliny

ρ	→	hustota danej kvapaliny
v	→	rýchlosť prúdenia v sledovanom mieste kvapaliny

Čitateľ tohto predpisu popisuje tlakový rozdiel medzi tlakom v kvapaline a tlakom nasýtených pár kvapaliny pre danú teplotu. Menovateľ vyjadruje hodnotu dynamického tlaku vyvolaného prúdením kvapaliny. Pre prípad $\sigma > 1$ predpokladáme, že pri prúdení kvapaliny nedôjde ku vzniku kavitácie a teda považujeme prúdenie za kavitačne bezpečné. Ak $\sigma \leq 1$ je možné očakávať, že počas prúdenia kvapaliny dôjde ku kavitácii. Pri návrhu a konštrukcii všetkých hydraulických strojov je snaha, aby kavitačné číslo vo všetkých miestach nekleslo pod kritickú hodnotu a teda nedošlo ku kavitácii počas prevádzky. [1,3]

2.2 Druhy kavitácie

Vznik kavitácie je vždy úzko spojený s výrazným poklesom tlaku v kvapaline. Pre iniciáciu rastu kavitačných bublín je nutné, aby tlak v kvapaline klesol pod hodnotu tlaku nasýtených pár. Tlak nasýtených pár je hladina tlaku, pri ktorej dochádza ku premene danej látky z kvapalného skupenstva na plynné. Presná hodnota tlaku nasýtených pár závisí na konkrétnej látke a teplote. Pre vodu o teplote 20 °C sa pohybuje okolo 2337,1 Pa. Pravdepodobnosť vzniku kavitácie, rovnako ako aj veľkosť vzniknutých bublín závisí na intenzite poklesu tlaku. Podľa príčiny vzniku tejto zmeny tlaku je možné rozdeliť kavitáciu na tri druhy: hydrodynamická, akustická a kavitácia spôsobená akceleráciou. [4,5]

Pri hydrodynamickej kavitácii je pokles tlaku vyvolaný vysokou rýchlosťou prúdenia kvapaliny. Zvýšenie rýchlosti prúdenia kvapaliny je spojené s nárastom kinetickej energie. V súlade so zákonom zachovania energie, zvýšenie kinetickej energie nevyhnutne vedie ku poklesu iného druhu energie, v tomto prípade najčastejšie tlakovej energie. Z tohto dôvodu v oblastiach s vysokou rýchlosťou prúdenia je tlak kvapaliny nízky a v oblastiach nízkej rýchlosti prúdenia je tlak vyšší. Toto pravidlo sa dá teoreticky poukázať aj na Bernoulliho rovnicu ideálnej kvapaliny medzi miestami označenými ako A a B :

$$\frac{1}{2} v_A^2 + gh_A + \frac{p_A}{\rho} = \frac{1}{2} v_B^2 + gh_B + \frac{p_B}{\rho} + \int_p \frac{\partial v_i}{\partial t} dx_i \quad (2.1)$$

Kde:

$$\frac{1}{2} v^2 \quad - \quad \text{kinetická merná energia}$$

$$\frac{p}{\rho} \quad - \quad \text{tlaková merná energia}$$

$$gh \quad - \quad \text{potenciálna merná energia}$$

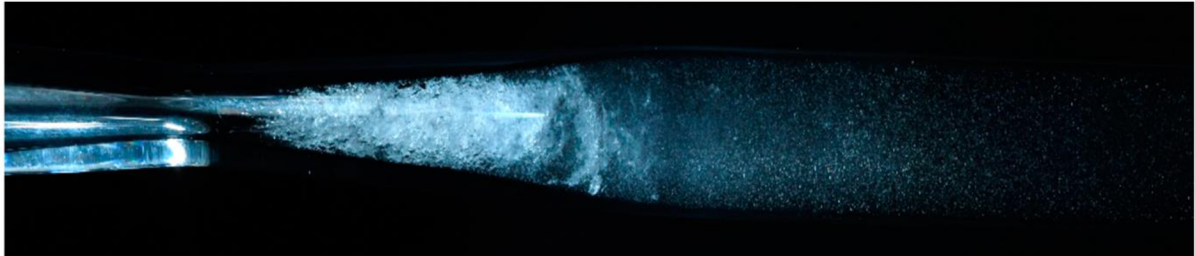
$$\int_p \frac{\partial v_i}{\partial t} dx_i \quad - \quad \text{zmena urýchľujúcej mernej energie medzi bodmi 1 a 2}$$

Za predpokladu, že sa jedná o stacionárne prúdenie počas ktorého nedochádza ku zmene potenciálnej energie, môžeme rovnicu zjednodušiť na tvar (2.2). Zo vzniknutého vzťahu je viditeľné, že súčet kinetickej a tlakovej energie je konštantný a platí výraz (2.3).

$$\frac{1}{2} v_A^2 + \frac{p_A}{\rho} = \frac{1}{2} v_B^2 + \frac{p_B}{\rho} \quad (2.2)$$

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 = konst \quad (2.3)$$

V prípade, že rýchlosť prúdenia je dostatočne vysoká na to, aby vyvolala pokles tlaku pod tlak nasýtených pár, dochádza ku vzniku kavitácie. Hydrodynamická kavitácia sa môže vyskytnúť takmer vo všetkých hydraulických strojoch. Predovšetkým na lopatkách rotujúcich častí hydraulických strojov, ako sú čerpadlá alebo turbíny. Ďalším miestom častého výskytu hydraulickej kavitácie sú zúžené miesta potrubia, dýzy alebo trysky. V týchto miestach dochádza ku zvýšeniu rýchlosti prúdenia kvapaliny vďaka zmenšenému prierezu potrubia. [4,6]



Obr. 2.2 Kavitačná oblasť vzniknutá v zúženej časti Venturiho trubice.[7]

Hydrodynamická kavitácia je v technickej praxi najčastejšie sa vyskytujúcim druhom kavitácie. Kvôli svojim nepriaznivým účinkom na strojne súčasti a poškodeniu, ktoré je schopná spôsobiť, je potrebné aby bola zohľadnená už od samotného návrhu hydraulických strojov. Predovšetkým pri dizajne strojných súčasti použitých v miestach, kde dochádza ku prúdeniu s vysokými rýchlosťami. Ide napríklad o lopatky obežných kôl vodných turbín, ktoré sa práve z tohto dôvodu predbežne vyrábajú z kavitácie odolných materiálov. Často sa pre dosiahnutie ešte lepšej odolnosti voči kavitáčnemu poškodeniu používajú špecializované ochranné nátery alebo prídavné látky v kvapaline. [8]

Na rozdiel od hydrodynamickkej kavitácie, akustická kavitácia môže vzniknúť aj v neprúdiacej kvapaline. V tomto prípade je pokles tlaku spôsobený tlakovými vlnami pri šírení zvuku kvapalinou. Zvuk sa v kvapaline šíri formou pozdĺžneho vlnenia, čo má v kvapaline za následok vytvorenie oblasti s premenlivou hustotou častíc. V kvapaline sa tvoria oblasti so zvýšenou a oblasti so zníženou hustotou molekúl. V týchto miestach sa spolu s hustotou molekúl mení aj tlak. V prípade, že amplitúda zvukového vlnenia šíriaceho sa v kvapaline je dostatočne veľká, môže tlak na miestach dolnej amplitúdy klesnúť až pod hranicu tlaku nasýtených pár. V technickej praxi sa akustická kavitácia vyvolaná ultrazvukom využíva na čistenie usadenín alebo drvenie keramiky. Hlavnou výhodou použitia akustickej kavitácie je pomerne presne riadenie miesta vzniku a veľkosti generovaných kavitáčnych bublín. Z tohto dôvodu je možné ju využiť aj v medicínskych aplikáciách napríklad na rozbíjanie obličkových kameňov. [9]

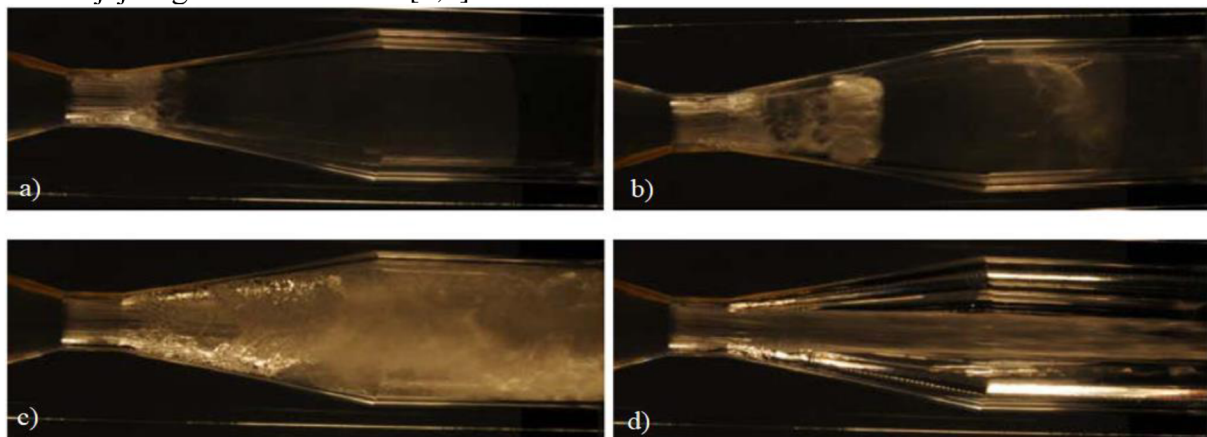
Posledným druhom je kavitácia spôsobená akceleráciou, v tomto prípade je kvapalina vystavená náhlejšiemu zmenám rýchlosti. Vznik kavitácie môže nastať pri náhlom uvedení kvapaliny do pohybu, rovnako ako pri prudkom zastavení. Akcelerácia vo väčšine prípadov pôsobí na nádobu obsahujúcu danú kvapalinu, pričom v samotnej kvapaline dochádza ku vzniku oblasti nízkeho tlaku. V tomto mieste dôjde ku rastu kavitáčnych bublín, ktorých život sa pohybuje v rozmedzí niekoľkých mikrosekúnd. Následný kolaps môže mať často značné deštruktívne účinky na okolité steny nádoby alebo iné pevné povrchy. [10]



Obr.2.3 Vznik a následný kolaps kavitačných bublín na dne sklenenej nádoby. Pokles tlaku ktorý viedol ku kavitácii, bol v tomto prípade výsledkom akcelerácie po prudkom údere do nádoby vo vertikálnom smere. [11]

2.3 Štádia vzniku kavitačnej oblasti

Kavitácia je komplexný dej, počas ktorého oblak vzniknutých kavitačných bublín prechádza niekoľkými štádiami. Prvé štádium sa nazýva počiatok kavitácie a tvorí prechod medzi bezkavitačným a kavitačným prúdením. V tomto štádiu dochádza ku vzniku prvých kavitačných bublín. Nasleduje čiastočne vyvinutá kavitácia, počas ktorej dochádza ku postupnému zväčšovaniu kavitačnej oblasti. Plne vyvinutou kavitáciou nazývame štádium, pri ktorom je kavitačná oblasť dostatočne veľká k tomu, aby mala vplyv na energetické vlastnosti systému. Dochádza pri nej taktiež ku vzniku vibrácií systému a kavitačnému poškodeniu na povrchoch pevných častí. Posledným štádiom, v ktorom sa kavitácia môže vyskytovať, je superkavitácia. Pri superkavitácii sa kavitačná oblasť šíri po prúde do veľkej vzdialenosti od miesta jej originálneho vzniku. [4,6]



Obr.2.4 Jednotlivé štádia kavitácie pri prúdení vo Venturiho dýze: a) počiatok kavitácie, b) čiastočne vyvinutá kavitácia, c) plne vyvinutá kavitácia, d) superkavitácia (upravené podľa [12])

2.4 Priebek vzniku kavitačných bublín

Pri tvorbe kavitačných bublín dochádza ku narušeniu spojitosti medzi molekulami kvapaliny, čo je veľmi energetický náročný proces. Z tohto dôvodu vznikajú kavitačné bubliny prevažne na miestach, kde je spojitosť kvapaliny už nejakým spôsobom narušená. Môže sa jednať napríklad o mikroskopické pevné častice alebo bublinky rozpustených plynov. Tieto častice slúžia ako inicializačné jadrá pri vzniku a následnom raste kavitačných bublín. [1,3]

Samotná expanzia kavitačnej bubliny je docielená vzájomnou kombináciou dvoch mechanizmov, nazývaných plynová a parná kavitácia. Plynová kavitácia je založená na difúzií rozpustených plynov prítomných v kvapaline. Je zapríčinená predovšetkým poklesom rozpustnosti daného plynu v kvapaline pri zníženom tlaku. V porovnaní s parnou kavitáciou je jej priebeh pomalší a vo veľkej miere závislý na obsahu rozpustených plynov v kvapaline. Pri parnej kavitácii je rast kavitačnej bubliny spôsobený skupenskou premenou kvapaliny na paru. Obsah kavitačnej bubliny je tvorený zmesou pár kvapaliny rovnako ako difundovanými plynmi z kvapaliny. [1,3]

Po dosiahnutí kritickej veľkosti, alebo presunutí bubliny do oblasti vyššieho tlaku dochádza ku jej kolapsu. Pri kolapse je zmes plynov vo vnútri bubliny stlačená v priebehu veľmi krátkeho časového okamihu, čo má za dôsledok zvýšenie jej teploty a kondenzáciu parných zložiek. Kavitačná bublina môže počas svojho zániku prejsť radom niekoľkých opakovaných rastov a kolapsov. [1,3]

Časový priebeh veľkosti kavitačnej bubliny je možné popísať pomocou Rayleigh-Plessetovej rovnice (2.4). Táto rovnica popisuje zjednodušený prípad pre osamotenú, symetrickú bublinu, guľového tvaru.

$$\frac{p_b(t) - p_\infty(t)}{\rho_L} = r_b \frac{d^2 r_b}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr_b}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{r_b} \frac{dr_b}{dt} + \frac{2\sigma_f}{\rho_L r_b} \quad (2.4)$$

Kde:

$p_b(t)$	-	tlak vo vnútri bubliny ako funkcia času
$p_\infty(t)$	-	tlak mimo bubliny, v nekonečne veľkej vzdialenosti od stredu
ρ_L	-	hustota kvapalnej fázy
r_b	-	polomer bubliny
ν_L	-	kinematická viskozita kvapalnej fázy
σ_f	-	povrchové napätie na rozhraní kvapalnej a plynnej fázy

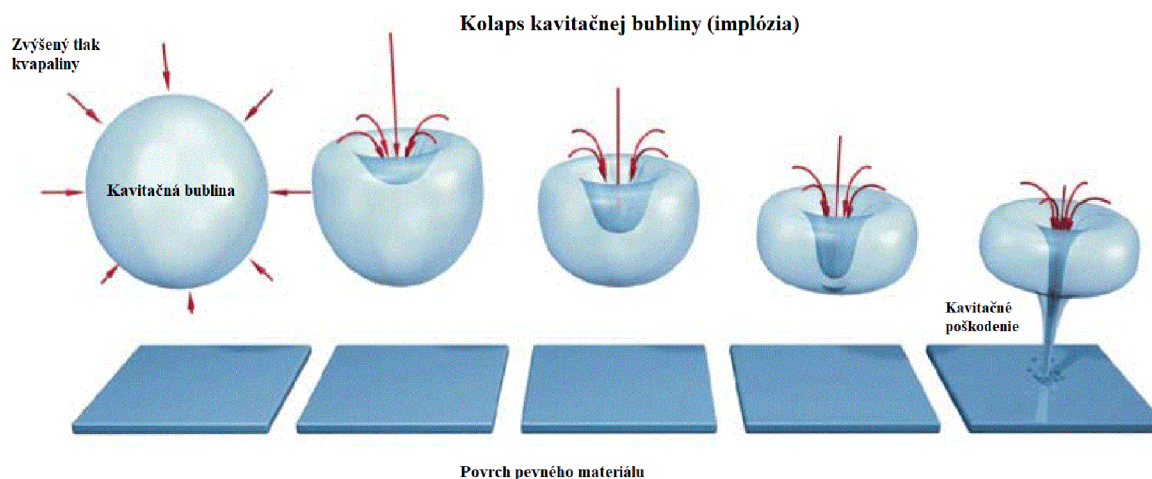
Z tejto rovnice je možné určiť polomer idealizovanej kavitačnej bubliny, za predpokladu známeho tlaku $p_\infty(t)$ a $p_b(t)$. Daný výraz presne nepopisuje reálne chovanie kavitačných bublín, ale vo väčšine prípadov slúži ako dostatočné priblíženie dynamiky kavitačných bublín. [13]

2.5 Kavitačné poškodenie

Kavitácia je v bežnej technickej praxi vnímaná ako negatívny jav, kvôli jej deštruktívnym účinkom na pevné povrchy. Zamedzenie vzniku kavitácie je v hydraulických

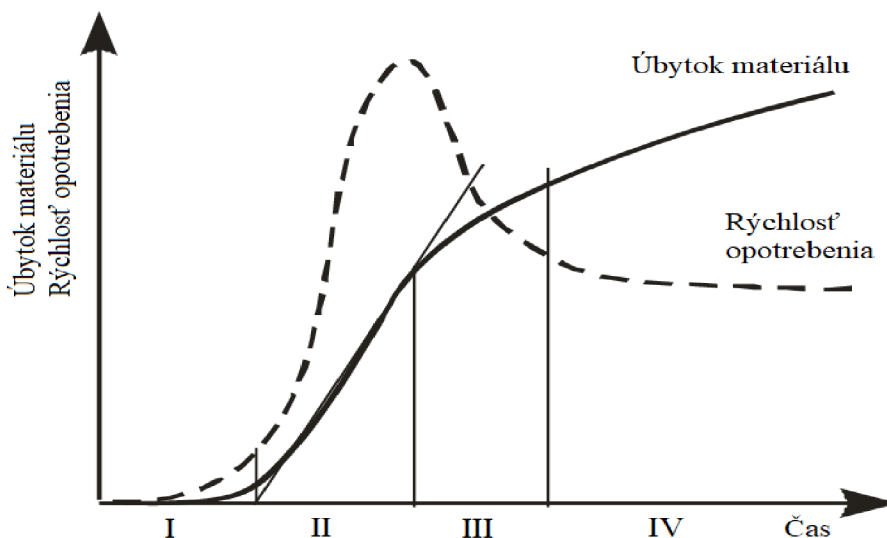
strojoch docielené samotnou konštrukciou, povrchovými úpravami alebo úpravami pracovnej kvapaliny. [8]

Ku kavitačnému poškodeniu dochádza pri kolapse kavitačných bublín v blízkosti povrchu pevných strojových častí. Kvapalina vnikajúca do kavitačnej bubliny pri jej kolapse je zastavená rázom na pevný povrch. Tento ráz spôsobuje výrazne mechanické namáhanie povrchu, ktoré je koncentrované na veľmi malú plochu. Pretože ku kolapsu kavitačných bublín dochádza vo veľmi krátkom časovom okamihu (rádovo niekoľko mikrosekúnd), dochádza taktiež ku prudkému zahriatiu plynnej zmesi, obsiahnutej v bubline pri jej kolapse. Z hľadiska kavitačného opotrebenia to znamená, že materiál nie je namáhaný iba mechanicky ale aj tepelne. [1,8]



Obr. 2.5 Priebeh kolapsu kavitačnej bubliny v blízkosti povrchu pevného materiálu a vzniknuté mechanické namáhanie. (upravené podľa [14])

Ku vytvoreniu pozorovateľného kavitačného poškodenia dochádza bežne až po dlhodobjšom vystavení kavitácií. Postupom času kavitácia spôsobuje zmenu pevnostných vlastností, praskanie a vylupovanie zrnok materiálu. Povrch poškodeného materiálu následne dostáva hubovitý tvar, ktorý je typický pre kavitačné opotrebenie. Podľa množstva ubudnutého materiálu a rýchlosti jeho úbytku je možné kavitačné poškodenie deliť na niekoľko etáp. [1,8]



Obr.2.6 Typický priebeh kavitačného opotrebenia a jeho etapy: I. Inkubačná doba, II. Akumulačná doba, III. Útlmová doba, IV. Ustálená oblasť. (upravené podľa [15])

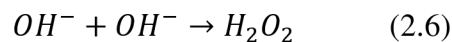
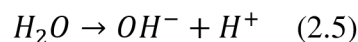
Prvou je inkubačná doba, počas ktorej dochádza iba ku minimálnemu úbytku materiálu. V povrchovej vrstve dochádza ku elastickej a plastickej deformácii, čo vedie ku jej deformačnému spevňovaniu. Dĺžka inkubačnej doby sa líši pre rozdielne materiály a slúži ako dôležitý faktor ku posudzovaniu kavitačnej odolnosti materiálov. Po inkubačnej dobe nasleduje akumulácia, počas ktorej dochádza ku najvyššej rýchlosti úbytku materiálu. Postupná zmena tvaru povrchu vedie ku zmierneniu intenzity kavitačného poškodenia, ktoré sa prejavuje v útlmovej dobe. Po jej skončení pokračuje po zvyšok kavitačného namáhania ustálený stav. V tomto stave má úbytok materiálu takmer konštantnú rýchlosť. [8,15]

2.6 Užitočné využitie kavitácie

Kavitačné poškodenie je nezanedbateľným faktorom pri návrhu a prevádzke hydrodynamických strojov. Napriek tomu, že v bežnej technickej praxi je snaha o limitovanie vzniku kavitácie, existujú aj aplikácie pri ktorých je vznik kavitácie žiadaným dejom. Ide o situácie, v ktorých je možné využiť deštruktívne účinky implodujúcich kavitačných bublín ku ničeniu nežiadúcich organických a anorganických látok.

Táto diplomová práca sa presnejšie zaoberá jednou konkrétnou aplikáciou kavitácie a to je čistenie odpadových vôd. Pri kolapse kavitačných bublín dochádza ku extrémnej lokálnej zmene tlaku a teploty vo vnútri bubliny. Táto zmena je dostatočne výrazná k iniciácii rozpadu molekúl vody a vytvoreniu voľných radikálov. Následnou reakciou vzniknutých radikálov a znečisťujúcich látok, dochádza ku rozkladu ich komplexných molekulových reťazcov a ich neutralizácii. [16]

V prípade kavitácie v bežnej vode bez špeciálnych prísad ide predovšetkým o vznik peroxidu vodíku.

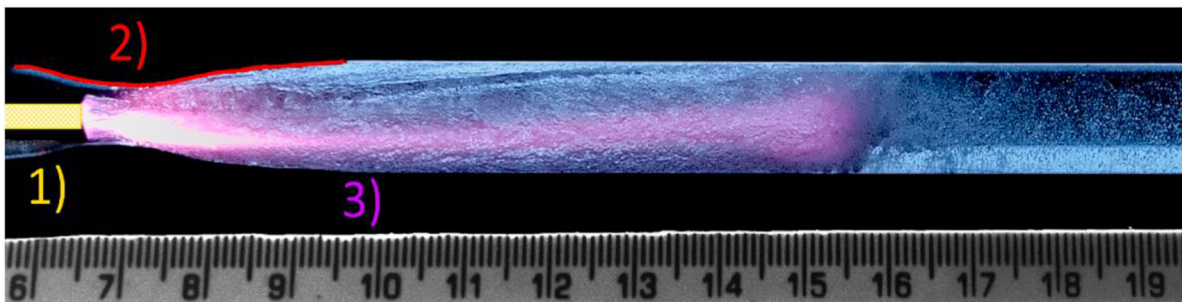


Molekula vody sa najskôr vplyvom vysokej teploty a tlaku pri kolapse kavitačnej bubliny rozpadne na kation vodíku a hydroxylový anión. Následne dochádza ku rekombinácii dvoch hydroxylových aniónov, ktorá vedie ku vzniku molekuly peroxidu vodíku. Peroxid vodíku je silným oxidačným činidlom, ktoré spôsobuje oxidáciu alebo mineralizáciu organických zlúčenín. Okrem vzniknutého peroxidu vodíku aj samotné hydroxylové anióny sú schopné reagovať s organickými zlúčeninami a zapríčiniť ich degradáciu. Pri kavitácii v bežnej vode nie je intenzita vzniku voľných radikálov dostatočná ku spoľahlivému odstráneniu všetkých znečisťujúcich látok. Pre zvýšenie intenzity čistiaceho procesu sa využívajú kombinácie hydrodynamickej kavitácie a rozličných prídavných oxidačných látok alebo procesov. Výsledná účinnosť čistenia vody nezáleží iba na použitom čistiacom procese ale aj na druhu odstraňovaných látok. Niektoré čistiace procesy a prídavné látky sú účinnejšie ku odstráneniu konkrétnych druhov znečisťujúcich látok, ale v prípade odlišných polutantov môže byť ich efektívnosť výrazne nižšia. [16,17]

Medzi najčastejšie prídavné látky používané v spolupráci s kavitáciou patrí peroxid vodíka (H_2O_2), ozón (O_3) alebo fentón (kombinácia H_2O_2 a $FeSO_4$). Prídavné látky slúžia pri procese čistenia vody, ako zdroje oxidačných činidiel. Na druhú stranu hydrodynamická kavitácia poskytuje priaznivé podmienky k intenzívnejšiemu rozkladu a vzájomnej reakcii voľných radikálov so znečisťujúcimi látkami. Vo všetkých prípadoch sa ukázalo, že kombinácia prídavného oxidačného činidla a kavitácie je efektívnejšia pre odstránenie znečisťujúcich látok, ako jednotlivé metódy osobitne. [17]

Okrem použitia prídavných látok, je taktiež možné použitie kavitácie súčasne s iným procesom vhodným ku neutralizácii znečisťujúcich látok. Jedným s použiteľných procesov je vystavenie čistej vody UV žiareniu. UV žiarenie sa bežne využíva ku likvidácii baktérií a iných znečisťujúcich látok. Pri spoločnom použití s hydrodynamickou kavitáciou spôsobuje fotolýzu molekúl vody a tým napomáha ku zvýšeniu intenzity degradácie polutantov. [17]

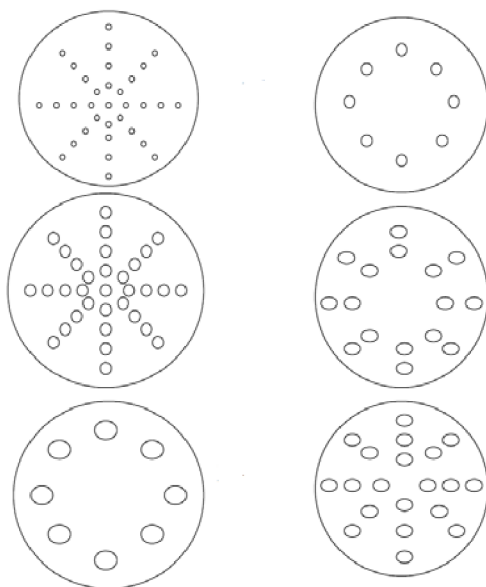
Ďalším pomerne novým spôsobom odstraňovania znečisťujúcich látok z vody je použitie kombinácie plazmy a kavitácie. Voda vystavená pôsobeniu nízko-plotnej plazmy obsahuje zvýšený počet reaktívnych foriem kyslíku a dusíku (napr. OH^- , O_3 , O_2^- , NO^-). Takto upravená voda má vynikajúce antibakteriálne vlastnosti a taktiež je známa pod názvom plazmou aktivovaná voda. Tvorba plazmou aktivovanej vody nie je technologicky jednoduchý proces. Hlavným dôvodom je vysoká dielektrická pevnosť vody, čiže najnižšie napätie potrebné na vyvolanie elektrickej iskry medzi dvomi elektródami oddelenými materiálom o definovanej hrúbke. Pre vodu má dielektrická pevnosť hodnotu viac ako 1 MV/cm. Táto vlastnosť spôsobuje, že vyvolanie dostatočnej ionizácie pre vznik plazmy vo vode je veľmi energeticky náročné. Tvorba nízko-plotnej plazmy je oveľa jednoduchšie uskutočniteľná v plynnom prostredí. Z tohto dôvodu sa plazmou aktivovaná voda najčastejšie vyrába zmiešaním vody a ionizovanej plynnej fázy. Väčšina bežne používaných technických procesov pre výrobu plazmou aktivovanej vody má jedno dôležité obmedzenie a tým je vyprodukované množstvo. Bežne zaužívané procesy nedokážu kontinuálne spracovávať veľké objemy vody a práve toto je aspekt, v ktorom kavitácia ponúka značné výhody.



Obr. 2.7 Spoločná aplikácia nízko-plotnej plazmy a kavitácie vo vode pretekajúcej Venturiho dýzou. 1) Elektróda umiestnená pred hrdlom dýzy, 2) Stena Venturiho dýzy, 3) Plazma produkovaná v plynnej fáze vzniknutej kavitáciou. (upravené podľa [18])

Tvorbou nízko-plotnej plazmy v kavitáčnej oblasti medzi dvomi elektródami, je možné kontinuálne produkovať plazmou aktivovanú vodu. Využitie tejto technológie sa preukázalo efektívne pri ničení cyanobaktérií a rias. [18]

Bez ohľadu na použitú kombináciu technológií má väčšina zariadení určených na čistenie vody pomocou kavitácie podobné zostavenie. Bežne ide o jednoduchý uzatvorený okruh s nádržou a čerpadlom ako zdrojom prietoku. Najdôležitejšou súčasťou takéhoto okruhu je prvok, ktorý zaisťuje samotnú tvorbu kavitácie. Najčastejšie používanými generátormi kavitácie sú Venturiho dýza a škrtiace clony. Používané škrtiace clony majú široký výber konfigurácií, počtu a veľkosti otvorov (obr. 2.8).



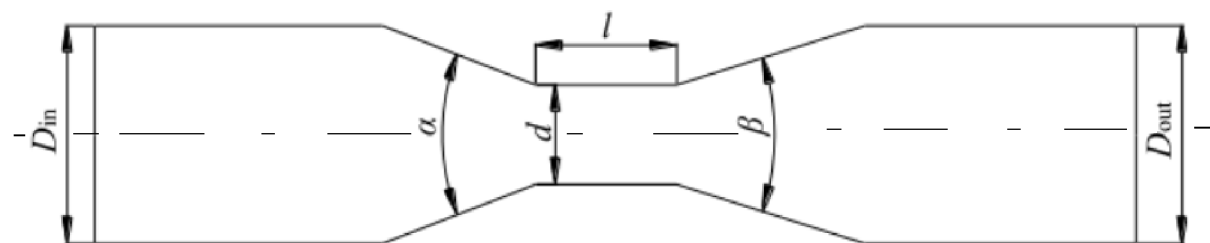
Obr. 2.8 Príklady niektorých používaných konfigurácií škrtiacich clôn. (upravené podľa [19])

Rozličné škrtiace clony sa od seba líšia intenzitou vzniknutej kavitácie, ale aj tlakovými stratami. V prípade použitia Venturiho dýzy je možné riadiť požadovanú intenzitu vzniknutej kavitácie zmenou prietoku, prípadne veľkosťou rozmeru najužšej časti dýzy. Pri aplikácií Venturiho dýzy pre tvorbu kavitácie nie je bežnou praxou upravovať tvar samotnej dýzy. [19]

2.7 Vplyv tvaru Venturiho dýzy na kavitáciu

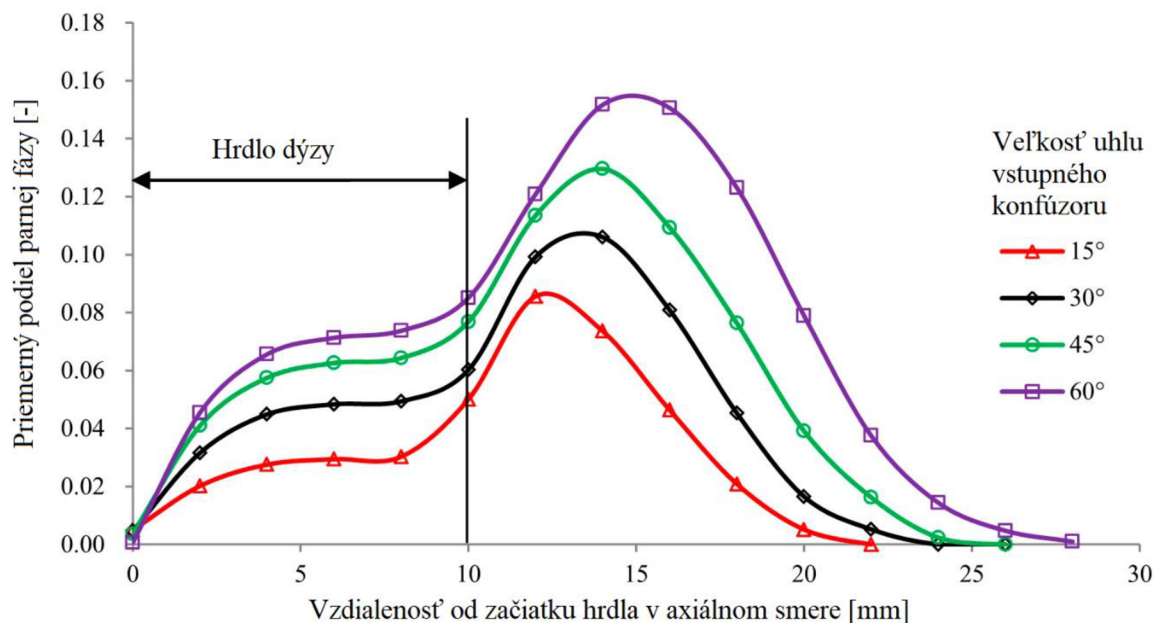
Problematikou vplyvu rozličných tvarov Venturiho dýzy na vzniknutú kavitáciu sa v minulosti zaoberalo iba malé množstvo autorov. Najčastejším spôsobom cielenej zmeny vzniknutej kavitácie vo Venturiho dýze je zmena prietoku. V prípade, že zmena prietoku nie je možná, sa optimalizuje veľkosť prietocnej plochy v mieste hrdla dýzy. Pričom pri snahe o zníženie kavitácie sa priemer hrdla zväčšuje a v prípade žiadanej vznik kavitácie sa priemer hrdla navrhuje menší. Existujú ale práce, ktoré sa zaoberali Venturiho dýzami rozličných tvarov a kavitácií produkovanou pri prúde kvapaliny danými dýzami. Výsledky týchto článkov sú prevažne založené na počítačovej simulácii dvojfázového prúdenia. Experimentálne overenie zistených poznatkov nie je veľmi časté. [20]

Najčastejšie vyšetrovaná zmena tvaru Venturiho dýzy je zmena uhlu vstupného konfúzoru a výstupného difúzoru.



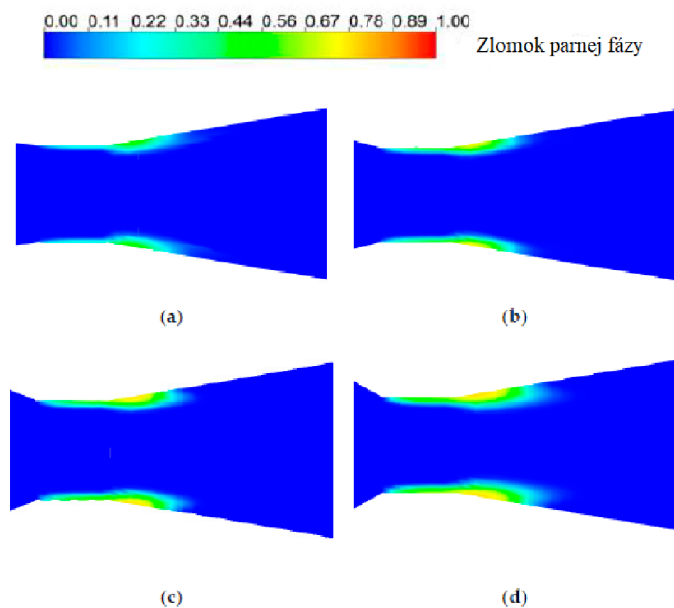
Obr. 2.9 Základné rozmery Venturiho dýzy, ktorú vo svojej práci vyšetroval P. Tang. Kde: D_{in} – vstupný priemer, D_{out} – výstupný priemer, d – priemer hrdla dýzy, l – dĺžka hrdla dýzy, α – uhol vstupného konfúzoru, β – uhol výstupného difúzoru. (upravené podľa [20])

Týmto prípadom sa zaoberali napríklad P.Tang, J.J. Manzano, a H. Li vo svojej práci *Investigation on the Effect of Structural Parameters on Cavitation Characteristics for the Venturi Tube Using the CFD Method*. V tejto práci bol vytvorený výpočtový model Venturiho dýzy (obr. 2.9), na ktorom bol simulovaný vznik kavitácie pri rozličných hodnotách uhlov α a β . Z výsledkov menovanej práce je znateľné, že pri zväčšení vstupného uhlu konfúzoru sa zväčšuje veľkosť vzniknutej kavitačnej oblasti (obr. 2.10).



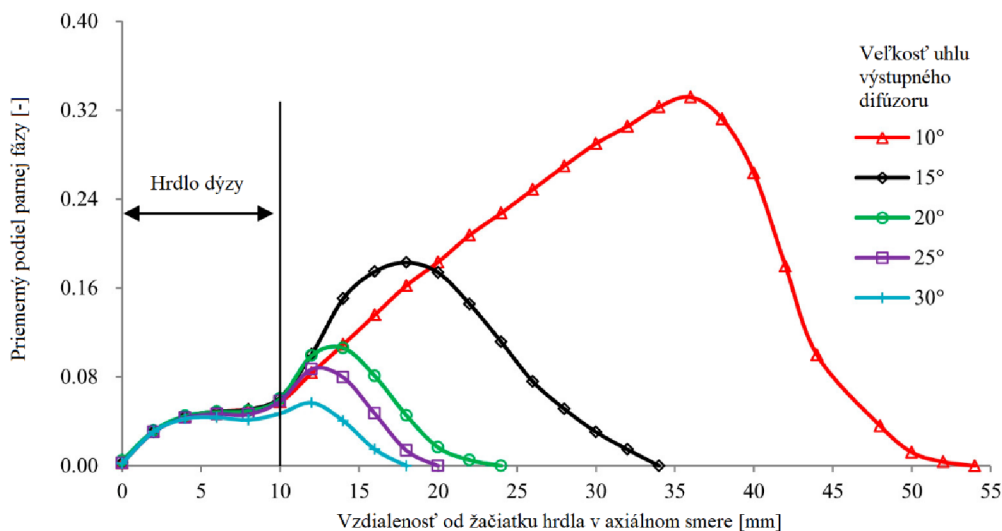
Obr. 2.10 Porovnanie veľkosti vzniknutých kavitačných oblastí pri rozličných hodnotách uhlu vstupného konfúzoru α . (upravené podľa [20])

Priebeh kavitačnej oblasti po dĺžke Venturiho dýzy má pre všetky uhly približne rovnaký tvar. So zmenou uhlu konfúzoru sa mení iba veľkosť vzniknutej kavitačnej oblasti. Pozorovateľná je taktiež mierna zmena miesta zániku kavitačnej oblasti. Pri väčšom uhle konfúzoru kavitačná oblasť končí vo väčšej vzdialenosti od hrdla. [20]



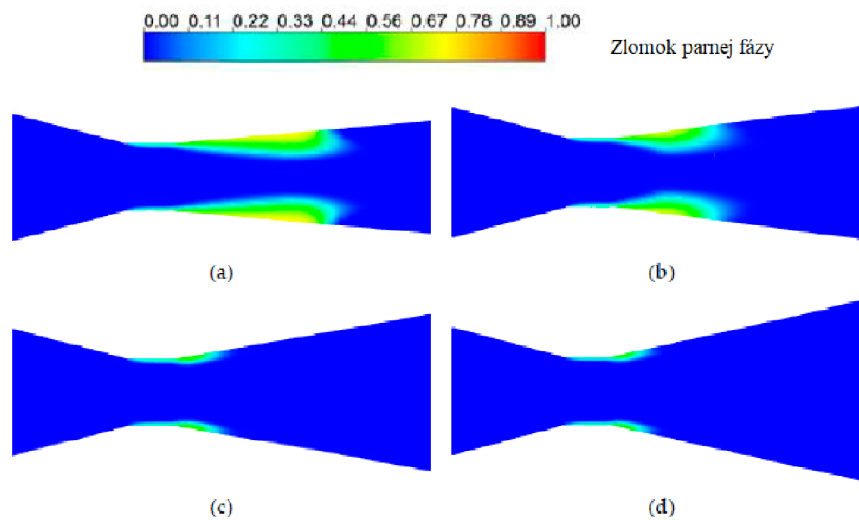
Obr. 2.11 Grafické zobrazenie vzniknutých kavitačných oblastí pre rozličné uhly α . a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°. (upravené podľa [20])

Pri simulácií Venturiho dýzy s rozličnými uhlami výstupného difúzoru sa preukázal presne opačný trend. Pri zväčšení uhlu difúzoru β dochádza ku zmenšeniu vzniknutej kavitačnej oblasti (obr. 2.12).



Obr.2.12 Porovnanie veľkosti vzniknutých kavitačných oblastí pri rozličných uhloch výstupného difúzoru β . (upravené podľa [20])

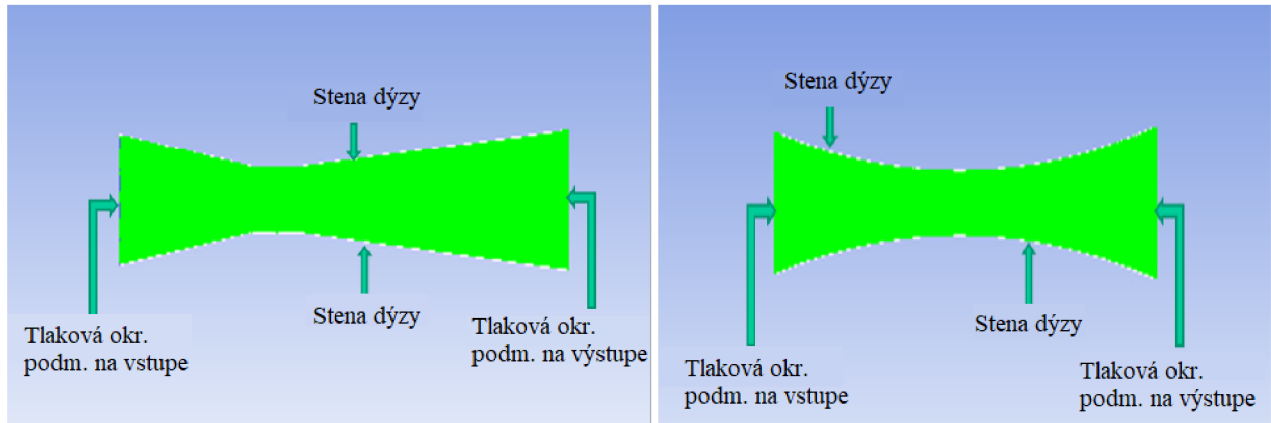
Z výsledkov simulácie je možné pozorovať, že zmena vo veľkosti kavitačnej oblasti je oveľa výraznejšia ako pri zmene uhlu konfúzoru. To isté platí aj pre vzdialenosť zániku kavitačného mraku od hrdla dýzy.



Obr. 2.13 Grafické zobrazenie vzniknutých kavitačných oblastí pre rozličné uhly β . a) 10°, b) 15°, c) 20°, d) 25°. (upravené podľa [20])

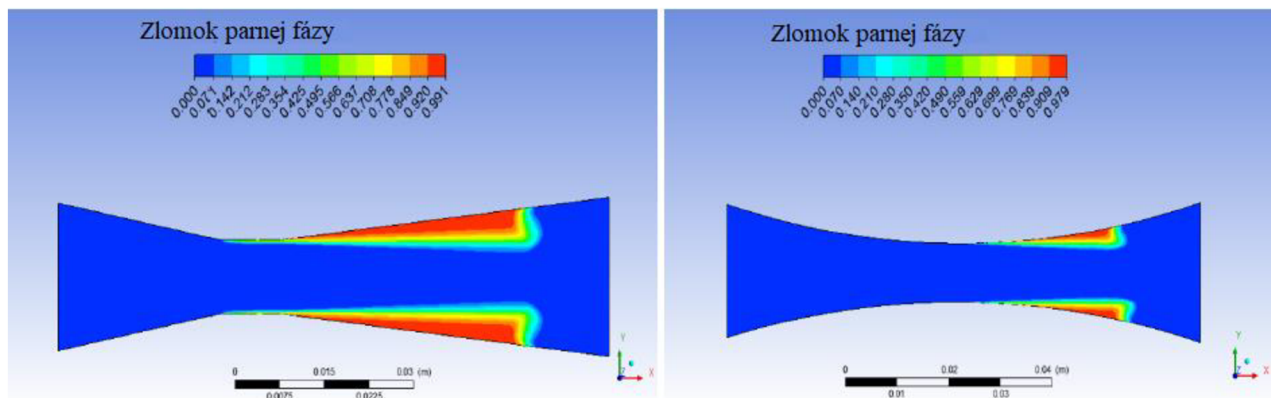
Zhrnutím výsledkov z tejto práce sa dá posúdiť, že pre vytvorenie čo najintenzívnejšej kavitácie vo Venturiho dýze je výhodné použitie dýzy s veľkým uhlom konfúzoru a malým uhlom difúzoru. Pričom uhol difúzoru má na veľkosť výslednej kavitačnej oblasti výrazne väčší vplyv ako uhol konfúzoru. [20]

Ďalšou prácou zaoberajúcou sa zmenou tvaru Venturiho dýzy a vzniknutou kavitáciou je *Numerical Investigation of Cavitation on Different Venturi Models*, ktorú spracovali Sedat Yalya, Shakhwan Yaseen a Ali Bahadır Olcay. Predmetom tejto práce bol návrh tvaru Venturiho dýzy s konkávnym konfúzorom a difúzorom. Kavitácia generovaná v tomto modeli bola následne pomocou CFD výpočtu porovnaná s klasickým tvarom Venturiho dýzy s rovnakými základnými rozmermi.



Obr. 2.14 Nákres dvoch modelov Venturiho dýzy porovnávaných v *Numerical Investigation of Cavitation on Different Venturi Models*. (upravené podľa [21])

Podľa výsledkov tejto práce je konkávnny model výhodnejší v prípade, že je cieľom zmenšenie vzniknutej kavitácie. Kavitačná oblasť produkovaná v konkávnom modeli dosahovala menšie rozmery. Taktiež došlo ku menšiemu rozvíreniu prúdu za kolabujúcim kavitačným mrakom. Súčasťou tejto práce bolo taktiež overenie vplyvu dĺžky hrdla na vzniknutú kavitáciu. V tomto prípade sa ukázalo, že zo zvyšujúcou dĺžkou hrdla dochádza ku zväčšeniu vzniknutej kavitačnej oblasti. [21]



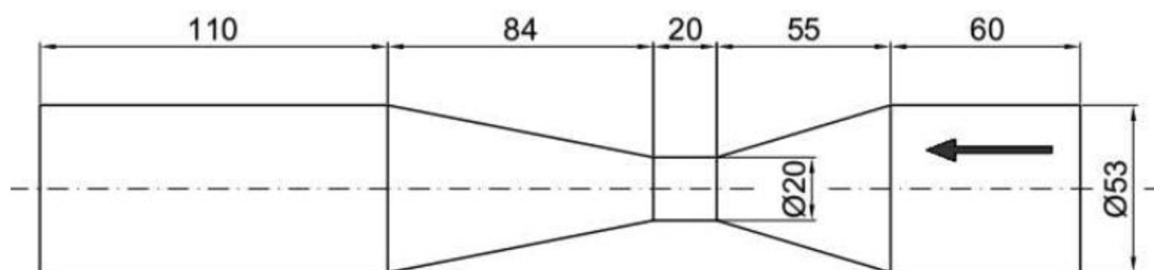
Obr. 2.15 Porovnanie vzniknutej kavitačnej oblasti vo Venturiho dýze bežného tvaru a Venturiho dýze s konkávnym konfúzorom a difúzorom. (upravené podľa [21])

Zameranie tejto diplomovej práce je veľmi podobné vyššie spomenutým prácam, ale s niekoľkými rozdielmi. Sústredí sa na zmenu tvaru výstupného difúzoru pri zachovanom tvare ostatných častí dýzy. Vychádza sa z predpokladu preukázaného v *Investigation on the Effect of Structural Parameters on Cavitation Characteristics for the Venturi Tube Using the CFD Method*, že tvar difúzoru má oproti konfúzorovi oveľa výraznejší vplyv na veľkosť vzniknutej kavitačnej oblasti. Zmena tvaru nie je založená na úprave uhlu difúzoru, ale na implementáciu steny s konkávnym a konvexným tvarom. Dva výsledné modely sú následne porovnané s klasickým prevedením Venturiho dýzy s totožnými rozmermi. [20]

3 Výpočetná časť

3.1 Geometria

Základná geometria Venturiho dýzy je inšpirovaná reálnou dýzou, ktorá sa nachádza v laboratóriu hydraulických strojov na fakulte FSI VUT. Na danej Venturiho dýze bolo už v minulosti prevedených niekoľko rozličných meraní zameraných na kavitáciu. Rovnako boli pre túto dýzu vytvorené CFD modeli zo zámerom simulácie kavitačného prúdenia. Predošlé práce sú teda vhodným zdrojom pre porovnanie výsledkov vzniknutej kavitácie. Ako hlavná inšpirácia pre vytvorenie CFD modelu použitého v tejto práci slúžila dizertačná práca *Kavitace vyvolaná rotací kapaliny* vypracovaná J. Kozákom. Predmetom danej dizertačnej práce bolo výpočtové, rovnako ako experimentálne, vyšetrenie kavitácie vo Venturiho dýze v prípade rozvíreného prúdenia. V experimentálnej časti bola použitá práve vyššie spomenutá Venturiho dýza. Pre túto dýzu bol v dizertačnej práci vytvorený taktiež 3D výpočtový model. [12]



Obr. 3.1 Základné rozmery použitej Venturiho dýzy, spolu s vyznačením smeru prúdenia kvapaliny [12]

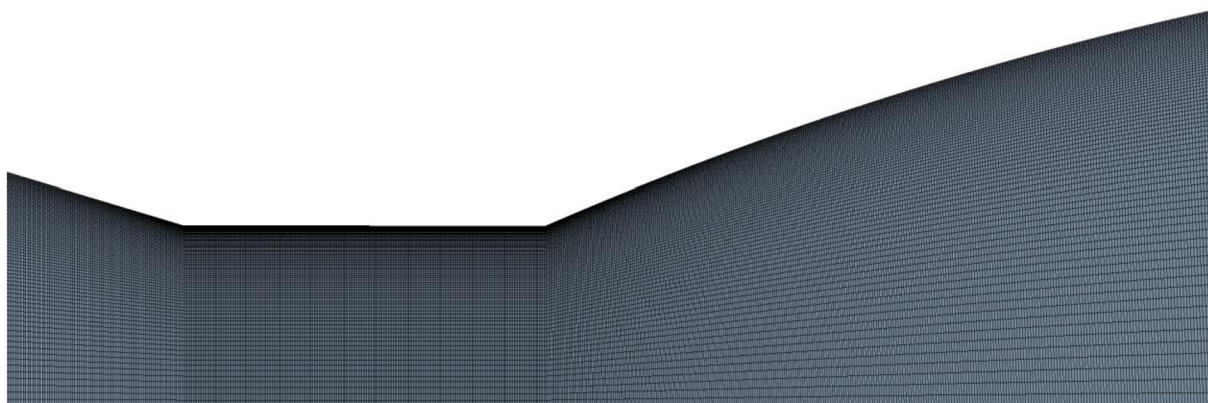
Pre účely tejto diplomovej práce sú vytvorené tri 2D výpočtové modeli rovnakej Venturiho dýzy. Prvý model presne kopíruje tvar a rozmery vybranej Venturiho dýzy, ďalšie dva majú upravený tvar výstupného difúzoru. V jednom prípade má difúzor konkávny a v druhom konvexný tvar steny. Konvexná rovnako ako konkávná stena je vytvorená ako časť kružnice dotýčnej na susediacu hranu. Pri tvorbe všetkých troch modelov je využitá osová symetria ku zmenšeniu rozmerov a počtu prvkov výsledných modelov. Výpočtová doména na výstupe zo všetkých modelov, je oproti reálny rozmerom dýzy predĺžená o 220 mm. Dôvodom je vytvorenie rozšírenej oblasti, kde je možné sledovať vývin prúdenia a prípadné vírové štruktúry vzniknuté pri prúdení dýzou. [12]



Obr. 3.2 Geometria troch vytvorených modelov Venturiho dýzy s vyznačeným smerom prúdenia. a) originálny tvar reálnej Venturiho dýzy v axisymetrickom zobrazení, b) model s konvexným tvarom výstupného difúzoru (konvexná stena vytvorená ako časť kružnice dotýčnej na stenu výstupného potrubia), c) model v konkávnom tvarom výstupného difúzoru (konkávná stena vytvorená ako časť kružnice dotýčnej na stenu hrdla dýzy).

3.2 Výpočtová sieť

Pri tvorbe výpočtovej siete je prioritou obmedzenie použitia trojuholníkových prvkov. Všetky výsledné siete sú teda tvorené čisto štvoruholníkovými prvkami. Počet prvkov a aj uzlov je totožný, pretože zmena v geometrii nie je tak markantná, aby spôsobila značnú zmenu plochy jednotlivých modelov. Veľký rozdiel v počte prvkov siete by taktiež mohol mať vplyv na porovnateľnosť výsledkov medzi jednotlivými modelmi. V jednotlivých modeloch je predovšetkým upravené rozloženie a rozmery jednotlivých prvkov, tak aby bolo čo najlepšie popísané prúdenie v okolí steny a v dôležitých častiach dýzy. Práve z tohto dôvodu je sieť vo všetkých prípadoch výrazne jemnejšia pri stenách dýzy, v jej hrdle a difúzore. Práve v týchto miestach sú očakávané najvýraznejšie prejavy kavitácie a jej celkového vplyvu na prúdenie.



Obr. 3.3 Detail vytvorenej výpočtovej siete na modeli s konvexnou stenou. Je možné sledovať zjemnenie siete pri stenách a v hrdle dýzy.

Kvalita vytvorených sietí je hodnotená na základe niekoľkých charakteristických veličín zobrazených v (tab. 3.1). Výsledne siete majú veľmi podobné kvalitatívne vlastnosti, ktoré by mali zaistiť správnosť získaných výsledkov a umožniť ich vzájomné porovnanie.

Model	Počet prvkov	Počet uzlov	Max. aspect ratio	Max. skewness	Max. y^+
Originálny tvar	152000	153981	5,56	0,26	7,3
Konvexný tvar			5,27	0,26	2,68
Konkávny tvar			6	0,26	20,69

Tab. 3.1 Porovnanie veličín, na základe ktorých bola hodnotená kvalita vytvorených sietí.

3.3 Okrajové podmienky a fyzikálne vlastnosti materiálov.

Okrajové podmienky sú pre všetky vyšetrované modely rovnaké. Na vstupe do Venturiho dýzy je predpísaná rýchlostná okrajová podmienka a na výstupe z dýzy je zadaná tlaková okrajová podmienka. Presné hodnoty daných okrajových podmienok boli prevzaté z už vyššie spomínanej práce J. Kozáka. Ide o hodnoty určené experimentálne, počas jedného z mnoha meraní prevedených v tejto práci. Zvolené hodnoty okrajových podmienok odpovedajú prúdeniu 6 l/s, pri ktorom došlo ku vzniku plne vyvinutej kavitácie. Okrem týchto okrajových podmienok je ešte na osi dýzy predpísaná symetria a steny sú definované ako

nepohyblivé bez šmyku. [12]

Okrajová podmienka	Číselná hodnota	Jednotka
Rýchlostná na vstupe	2.719628789	m/s
Tlaková na výstupe	80 000	Pa

Tab.3.2 Volené hodnoty použitých okrajových podmienok.

Pri výpočte kavitácie je nutné prúdenie riešiť ako nestacionárny dvojfázový prípad. Pričom dve použité fázy sú voda a vodná para. Pre obidve je nutné definovať ich fyzikálne vlastnosti a podmienky, pri ktorých dochádza ku premene jednej fázy na druhú. Premena medzi fázami je vo vyšetrovanom príklade určená tlakom nasýtených pár. Všetky fyzikálne vlastnosti uvedené v (tab. 3.3) sú považované za konštanty.

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Dynamická viskozita [kg/m*s]	Tlak nasýtených pár [Pa]
Voda	998,2	0,001003	3540
Vodná para	0,5542	1,34e-05	

Tab. 3.3 Hodnoty základných fyzikálnych vlastností použitých materiálov.

3.4 Numerické schémy a nastavenie riešiteľa

Turbulentné nestlačiteľné prúdenie je definované v programe Ansys Fluent na základe Reynoldsových stredovaných Navier-Stokesových rovníc, tiež známych pod skratkou RANS (3.3). Tieto rovnice vychádzajú z Navier-Stokesovej rovnice (3.1) pre nestlačiteľnú kvapalinu, pri zavedení Reynoldsovho rozkladu tlaku a okamžitej rýchlosti na stacionárnu a fluktujúcu zložku.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + a_i \quad (3.1)$$

Rovnica kontinuity :

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} v_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{v'_i v'_j}) \quad (3.3)$$

Rovnica kontinuity:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

Pri modelovaní turbulencie v CFD je snaha o výpočet Reynoldsovho tenzoru napätia (3.5), ktorý je vyjadrený ako násobok hustoty a strednej hodnoty fluktujúcich zložiek rýchlosti.

$$\tau_{ij} = \rho * \overline{(v'_i v'_j)} \quad (3.5)$$

Pre riešenie tohto problému sú najčastejšie používané dvojrovnícové modely turbulencie. Tieto modely sú založené na takzvanej Boussinesqovej hypotéze (3.6), ktorá zavádza ako veličinu turbulentnú viskozitu.

$$2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} = -\overline{v'_i v'_j} \quad (3.6)$$

Kde:

ν_t	-	turbulentná kinematická viskozita
S_{ij}	-	tenzor rýchlosti deformácie (3.7)
k	-	turbulentná kinetická energia (3.8)
δ_{ij}	-	Kroneckerovo delta

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{(v'_i v'_i)} \quad (3.8)$$

Vďaka využitiu Boussinqovej hypotézy je možné zredukovať počet šiestich neznámych z Reynoldsovoho tenzoru na skalárnu neznámu turbulentnej viskozity ν_t . Dve hlavné skupiny dvorovnicových modelov turbulencie sú k- ϵ a k- ω . Tieto modely uzatvárajú systém rovníc pridaním prenosových rovníc pre turbulentnú kinetickú energiu k , mieru disipácie kinetickej energie ϵ a špecifickú mieru disipácie kinetickej energie ω . Vo všetkých modeloch vytvorených v tejto diplomovej práci je využitý model turbulencie k- ϵ . [22]

Pre simuláciu kavitácie je nutné previesť dvojfázový výpočet, v ktorom dochádza ku voľnej premene kvapalnej fázy na plynnú a naopak. Premenu jednej fázy na druhú je možné modelovať rozličnými modelmi kavitácie, ktoré sú primárne založené na Rayleigh-Plessetovej rovnici (2.4). Pre účely numerických simulácií je možné túto rovnicu zjednodušiť na tvar (3.9).

$$\frac{dr_b}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_b(t) - p_L(t)}{\rho_L}} \quad (3.9)$$

Samotný prechod medzi jednotlivými fázami je v kavitačných modeloch riadený na základe transportnej rovnice hmotnostného zlomku pary (3.10).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{vap} \rho_{vap}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_{vap} \rho_{vap} \bar{v}_{vap,j}) = R_e - R_c \quad (3.10)$$

V tomto prípade α_{vap} označuje objemový zlomok pary v danom výpočtovom elemente, pričom maximálna hodnota je 1, v prípade že prvok je plne vyplnený parou. Koeficienty R_e a R_c popisujú rast a kolaps kavitačných bublín. Vzorce pre tieto koeficienty, rovnako ako finálny tvar transportnej rovnice sú odlišné pre jednotlivé kavitačné modely. Medzi najbežnejšie kavitačné modely patria Sighal et al., Zwart-Gerber-Belamri a Schnerr-Sauer. Vo výpočtoch pre účely tejto diplomovej práce bol využitý model Schnerr-Sauer. Transportná rovnica má pre model Schnerr-Sauer tvar (3.11).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{vap} \rho_{vap}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_{vap} \rho_{vap} \bar{v}_{vap,j}) = \frac{\rho_{vap} \rho_L}{\rho} \frac{D\alpha_{vap}}{Dt} \quad (3.11)$$

Objemový zlomok pary je určovaný pomocou množstva parných bublín n_b v jednotke objemu

kvapaliny podľa vzorca (3.12).

$$\alpha_{vap} = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi r_b^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi r_b^3} \quad (3.12)$$

$$r_b = \sqrt[3]{\frac{\alpha_{vap} \frac{3}{4} \frac{1}{n}}{1 - \alpha_{vap}}} \quad (3.13)$$

Výraz r_b popisuje polomer parnej bubliny a je ho možné určiť z rovnice (3.13). Zderivovaním z transportnej rovnice vychádza pre rýchlosť premeny hmoty vzorec (3.14).

$$R = \frac{\rho_{vap} \rho_L}{\rho} \alpha_{vap} (1 - \alpha_{vap}) \frac{3}{r_b} \sqrt{\frac{2(p_{vap} - p)}{3\rho_L}} \quad (3.14)$$

Finálne vyjadrenie Schnerr-Sauer modelu kavitácie má tvar:

Pre $p \leq p_{vap}$

$$R_e = \frac{\rho_{vap} \rho_L}{\rho} \alpha_{vap} (1 - \alpha_{vap}) \frac{3}{r_b} \sqrt{\frac{2(p_{vap} - p)}{3\rho_L}} \quad (3.15)$$

Pre $p > p_{vap}$

$$R_c = \frac{\rho_{vap} \rho_L}{\rho} \alpha_{vap} (1 - \alpha_{vap}) \frac{3}{r_b} \sqrt{\frac{2(p - p_{vap})}{3\rho_L}} \quad (3.16)$$

Pre riešenie zadaného problému boli volené výpočtové schémy na základe predošlých prác, ktoré sa zaoberali podobnými problémami. Výsledné numerické nastavenie riešiteľa je zhrnuté v (tab.3.4). [12,22]

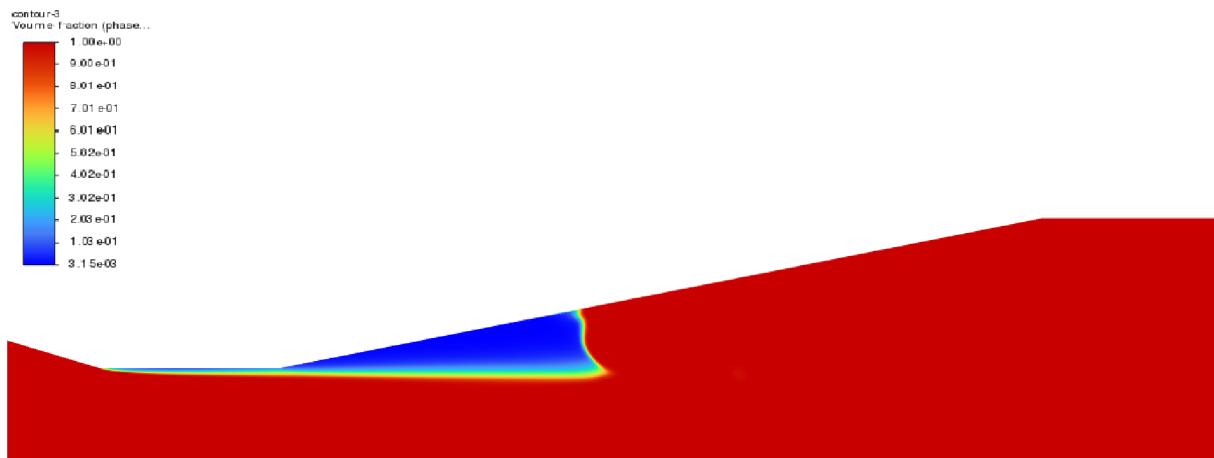
Turbulence Model	RNG k-ε
Near-Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLE
Gradient Discretization	Least Squares Cell Based
Pressure Discretization	PRESTO!
Momentum Discretization	Second Order Upwind
Volume Fraction Discretization	QUICK
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Turbulent Order Upwind	Second Order Upwind
Transient Formulation	First Order Implicit
Time Step Size [s]	1,5e-6

Tab.3.4 Tabuľka finálneho nastavenia numerického riešiteľa.

3.5 Aplikácia UDF pre korekciu turbulentnej viskozity

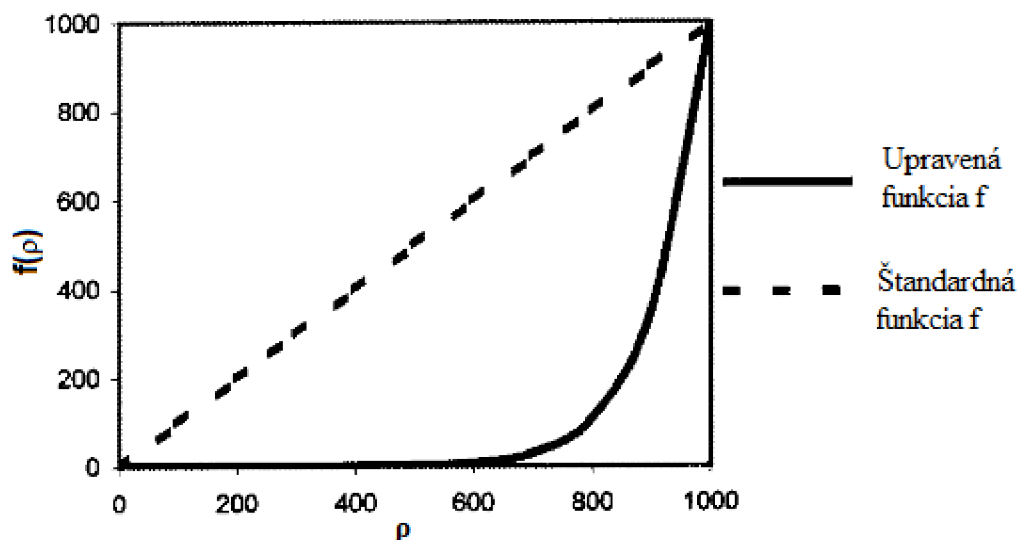
V priebehu výpočtov jednotlivých modelov sa vyskytla rada problémom. Kavitačná oblasť v simulovaných modeloch neodpovedala chovaniu kavitácie, sledovanom experimentálne v už existujúcich prácach. Podľa poznatkov z prevedených experimentov dochádza pri prúdení ku opakovanému pulzovaniu kavitačnej oblasti. V prvých výpočtoch

simulovaných modelov kavitačná oblasť vykonala približne jeden až dva pulzy a následne došlo ku jej zastaveniu. Tento problém bol riešený úpravou siete, zmenou použitého nastavenia riešiteľa a zmenou relaxačných parametrov.



Obr. 3.4 Znáznornenie stavu kavitačnej oblasti, keď došlo ku jej zastaveniu v prvotných výpočtoch. Oblasť po dosiahnutí tohto tvaru ďalej nepulzovala, iba na jej konci dochádzalo ku miernemu vlneniu. Práve tento problém bol príčinou zavedenia popísanej UDF. (Vyobrazená kontúra popisuje zlomok kvapalnej fázy, kde červená odpovedá čistej vode a modrá čistej vodnej pare.)

Po niekoľkých iteráciách výpočtov sa ukázalo, že problém s pulzáciami kavitačnej oblasti je možné vyriešiť aplikáciou užívateľom definovanej funkcie, tiež známej ako UDF (User Defined Function). Bola využitá UDF vytvorená v práci *Evaluation of the Turbulence Model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation*. Účelom tejto UDF je úprava hodnoty turbulentnej viskozity zmesi v závislosti na hustote. Nahradzuje štandardnú funkciu, ktorou je závislosť turbulentnej viskozity na hustote bežne definovaná vo Fluente. Upravená funkcia bola navrhnutá tak, aby sa výsledkami viac približovala chovaniu sledovanému experimentálne. [23]



Obr. 3.5 Porovnanie upravenej funkcie pre turbulentnú viskozitu a štandardnej funkcie používanej vo Fluente. (upravené podľa [23])

Po aplikácii upravenej funkcie je možné turbulentnú viskozitu vyjadriť podľa výrazu (3.17). Zmena turbulentnej viskozity má výrazný vplyv na oddeľovanie jednotlivých kavitačných oblakov. Ovplyvňuje taktiež spätné prúdenie kvapaliny, ktoré vedie ku oddeleniu kavitačnej oblasti vo forme vírového krúžku.

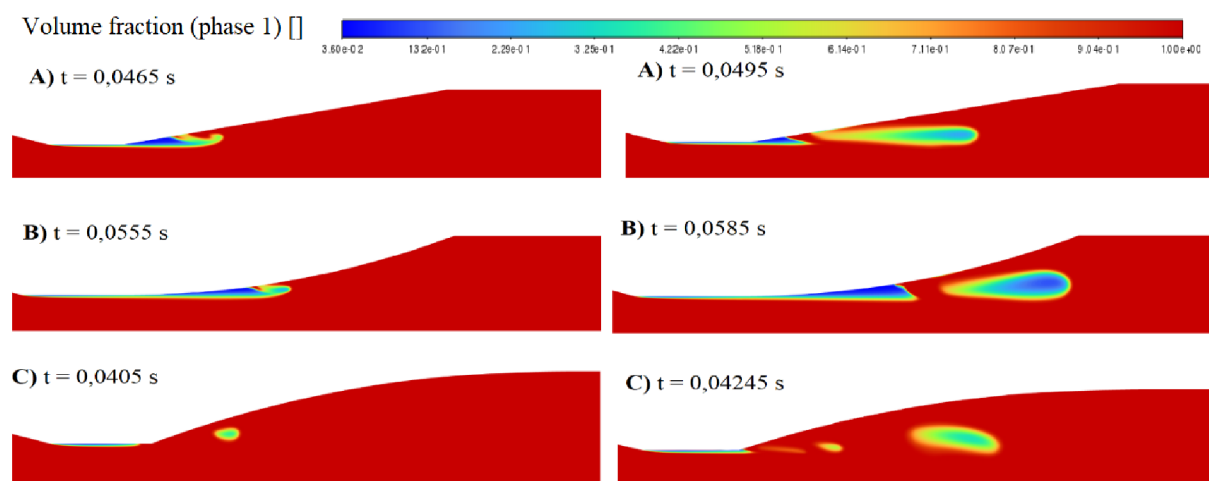
$$\mu_t = f(\rho)C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

$$f(\rho) = \rho_{vap} + \left(\frac{\rho_{vap} - \rho}{\rho_{vap} - \rho_L} \right)^n (\rho_L - \rho_{vap}) \quad n \gg 1 \quad (3.18)$$

Využitím uvedenej UDF sa podarilo vyriešiť problémy s pulzáciami kavitačnej oblasti. Kavitačná oblasť vo výpočtoch po tejto zmene vykonáva expanziu a kolaps v pravidelných cykloch. [23]

3.6 Spoločné vlastnosti prúdenia pre všetky modely

Prúdenie vo všetkých simulovaných modeloch zdieľa niekoľko spoločných vlastností. Rast kavitačnej oblasti začína na ostrých hranách hrdla Venturiho dýzy a postupne sa rozširuje v smere prúdenia kvapaliny. Následne expanduje do oblasti difúzoru dýzy, až kým nedosiahne svoj maximálny rozmer. Časť kavitačnej oblasti sa oddelí a je unášaná kvapalinou, až kým postupne nedochádza ku jej zániku. Zostávajúca kavitačná oblasť podlieha rapídneho kolapsu, počas ktorého sa stiahne do hrdla dýzy. Ku jej kolapsu dochádza v mieste hrdla, v ktorom sa pôvodne inicioval jej rast. Tento proces sa opakuje, čím dochádza ku pulzácii kavitačnej oblasti. Nie každý cyklus je úplne rovnaký ako predchádzajúce, počas niektorých pulzov dochádza ku prichyteniu sekcie kavitačnej oblasti na stene difúzoru. Táto časť sa následne oddelí od hlavnej kavitačnej oblasti a ku jej kolapsu dochádza na stene difúzoru.

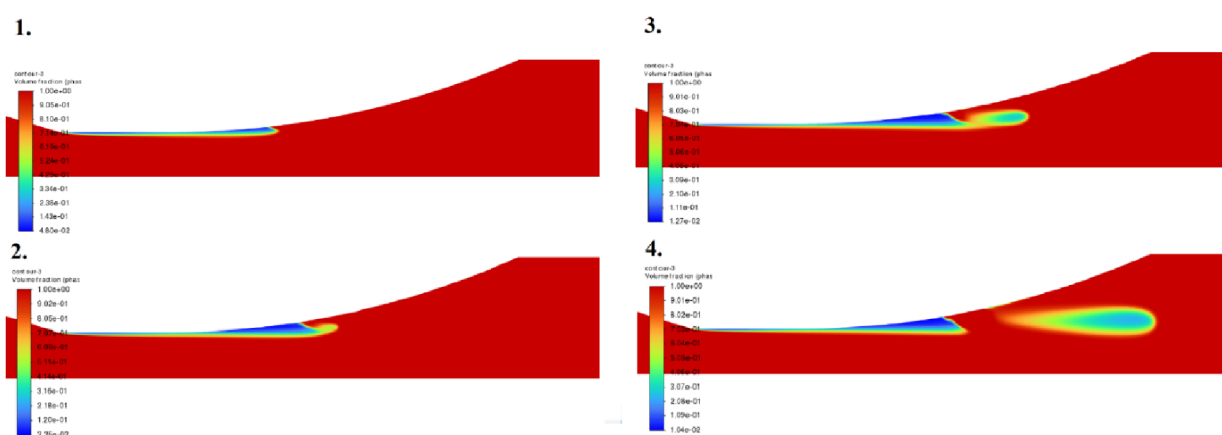


Obr. 3.6 Grafické porovnanie vzniknutých kavitačných oblastí v jednotlivých modeloch, vyjadrené pomocou zlomku obsahu kvapalnej fázy (červená farba popisuje čistú vodu a modrá farba popisuje čistú paru). Všetky snímky odpovedajú druhému cyklu expanzie kavitačnej oblasti a je ku nim pridelený korešpondujúci čas výpočtu. Písmenom A je označený model s klasickým tvarom Venturiho dýzy, B je model s konkávnou stenou a C je model s konvexnou

Na (obr. 3.6) je možné vidieť porovnanie vzhľadu kavitačnej oblasti vzniknutej v jednotlivých modeloch. Už na prvý pohľad je možné sledovať značné rozdiely. Predovšetkým v rozmeroch vzniknutých kavitačných oblastí a ich tvare. Taktiež je potrebné

podotknúť, že na všetkých snímkach je vyobrazený druhý cyklus expanzie kavitačnej oblasti. Pretože vo všetkých modeloch sa prvý cyklus ukázal byť odlišný od všetkých nasledujúcich. Rozdiel je predovšetkým vo veľkosti vzniknutej kavitačnej oblasti ale vo veľkosti časti kavitačného mraku, ktorý sa prichytí na stenu difúzoru. V prvom cykle sa na stenu difúzoru prichytí pomerne väčšia sekcia kavitačnej oblasti, ako v nasledujúcich cykloch. Toto chovanie je pravdepodobne spojené s časom potrebným na ustálenie výpočtu a počiatkových hodnotách vygenerovaných pri iniciácii výpočtu. Čas jednotlivých snímkov sa líši pre jednotlivé modely aj keď ide vo všetkých prípadoch o druhý cyklus. Príčinou je rozdielna frekvencia pulzácií kavitačnej oblasti v jednotlivých modeloch.

Vo vytvorenej simulácii sa vyskytol zaujímavý dej, ktorý bol už v minulosti sledovaný aj na experimentálnych modeloch. Ide o spätný prúd kvapaliny, ktorý vnikne pod expandujúcu kavitačnú oblasť a spôsobí jej oddelenie od steny difúzoru vo forme vírového krúžku. Takto vzniknutý vírový krúžok pokračuje v smere prúdenia kvapaliny až kým nedôjde ku jeho prirodzenému rozpadu.



Obr. 3.7 (1.) Ukážka na kavitačnej oblasti v konkávnom modeli. (2.) Postupné vytvorenie vírového krúžku vplyvom spätného prúdenia kvapaliny (3.). Následné oddelenie od hlavnej kavitačnej oblasti a pohyb v smere prúdenia (4.).

Toto chovanie sa preukázalo vo všetkých vyšetovaných modeloch, ale v každom modeli má vzniknutý vírový krúžok rozdielne rozmery. Veľkosť oddeleného vírového krúžku je závislá na veľkosti hlavnej kavitačnej oblasti. Tento dej je výpočtovo veľmi závislý na hodnote turbulentnej viskozity. Práve v tomto prípade je dôležitá aplikácia UDF, ktorá bola spomenutá v predchádzajúcej kapitole. [23]

3.7 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy klasického tvaru.

Ako prvý je vyhodnotený model kavitácie vo Venturiho dýze s tvarom a rozmermi odpovedajúcimi reálnej dýze. Tento model bude neskôr slúžiť, ako základ pre porovnanie kavitačných oblastí vzniknutých v modeloch s modifikovaným tvarom difúzoru.

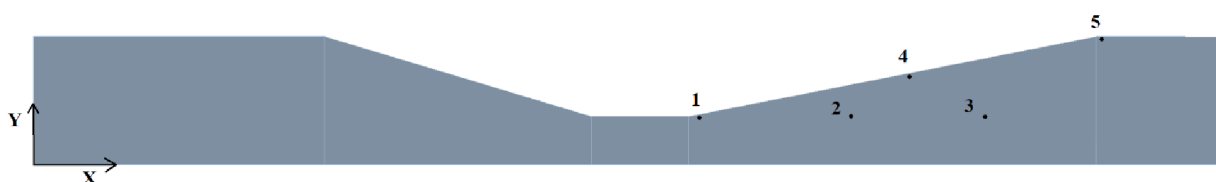
Pre vyhodnotenie tlakových pulzácií spôsobených opakovaným kolapsom kavitačného mraku je v dýze vybraných niekoľko bodov, v ktorých je zaznamenávaný tlak.

Označenie bodu	1	2	3	4 (Originálna dýza)	4 (Konkávna dýza)	4 (Konvexná dýza)	5
Súradnica x [m]	0,14	0,17	0,2	0,18	0,18	0,18	0,225

Súradnica y [m]	0,0095	0,0095	0,0095	0,018	0,013	0,022	0,0255
-----------------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	--------

Tab.3.5 Súradnice a označenie jednotlivých bodov, v ktorých boli sledované tlaky.

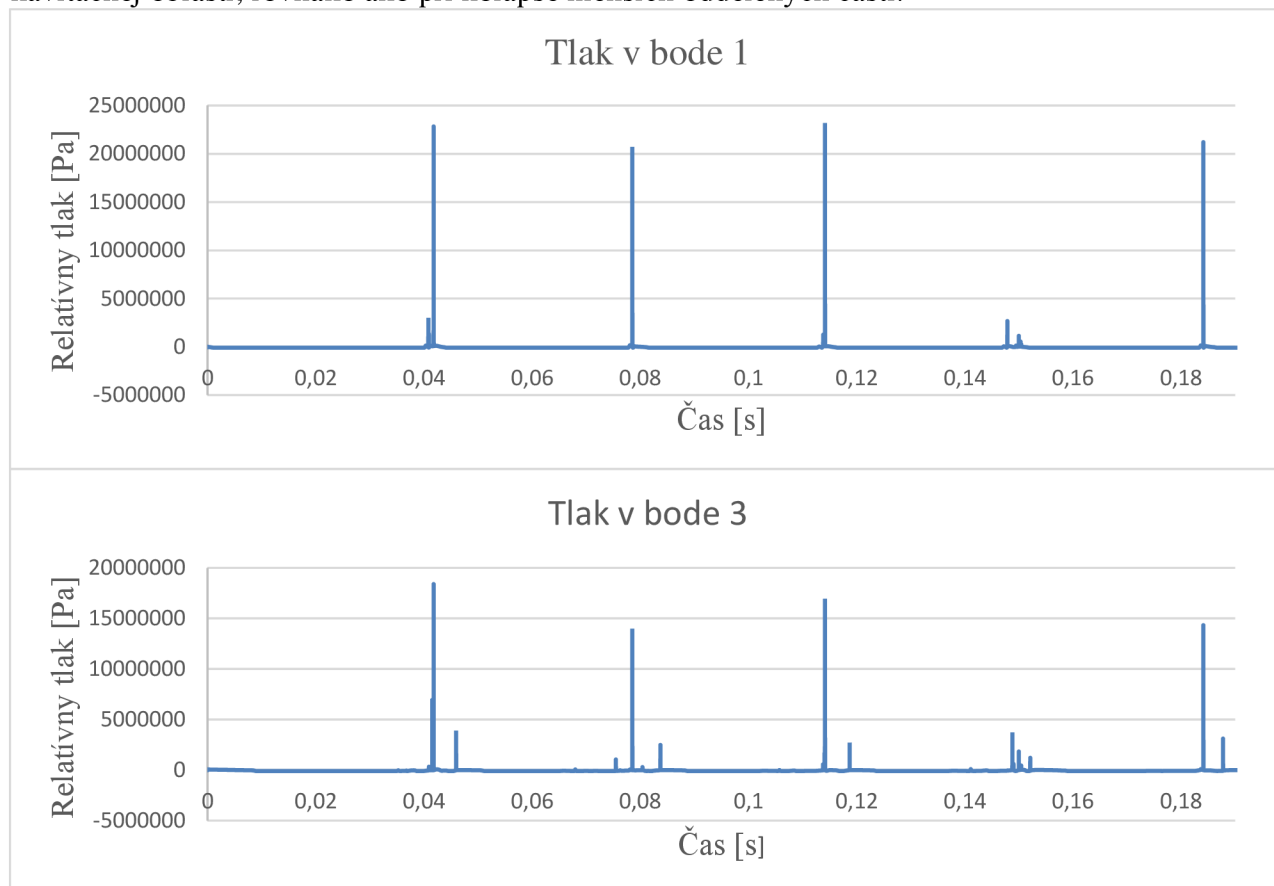
V (tab. 3.5) je zoznam súradníc jednotlivých bodov, ktoré boli využité pre záznam tlaku. Body 1 až 3 sú umiestnené v prúde kvapaliny v približne rovnakej úrovni ako hrana hrdla dýzy, na ktorej dochádza ku iniciácii kavitácie. Sú od tejto hrany vzdialené v troch rozličných vzdialenostiach, pričom bod 1 je umiestnený najbližšie. Zostávajúce dva body sú umiestnené v blízkosti stien dýzy, bod 4 v strede difúzoru a bod 5 tesne za koncom difúzoru. Všetky body rovnako ako počiatok súradnicového systému sú vyznačené v (obr. 3.8).



Obr. 3.8 Znáznornenie polohy jednotlivých bodov a počiatku súradnicového systému vo Venturiho dýze.

Body 1, 2, 3 a 5 majú totožné súradnice v každom vyšetřovanom modeli, ale súradnice bodu 4 sa v jednotlivých modeloch líšia. Príčinou je tvar steny difúzoru, ktorý je rozličný vo všetkých modeloch.

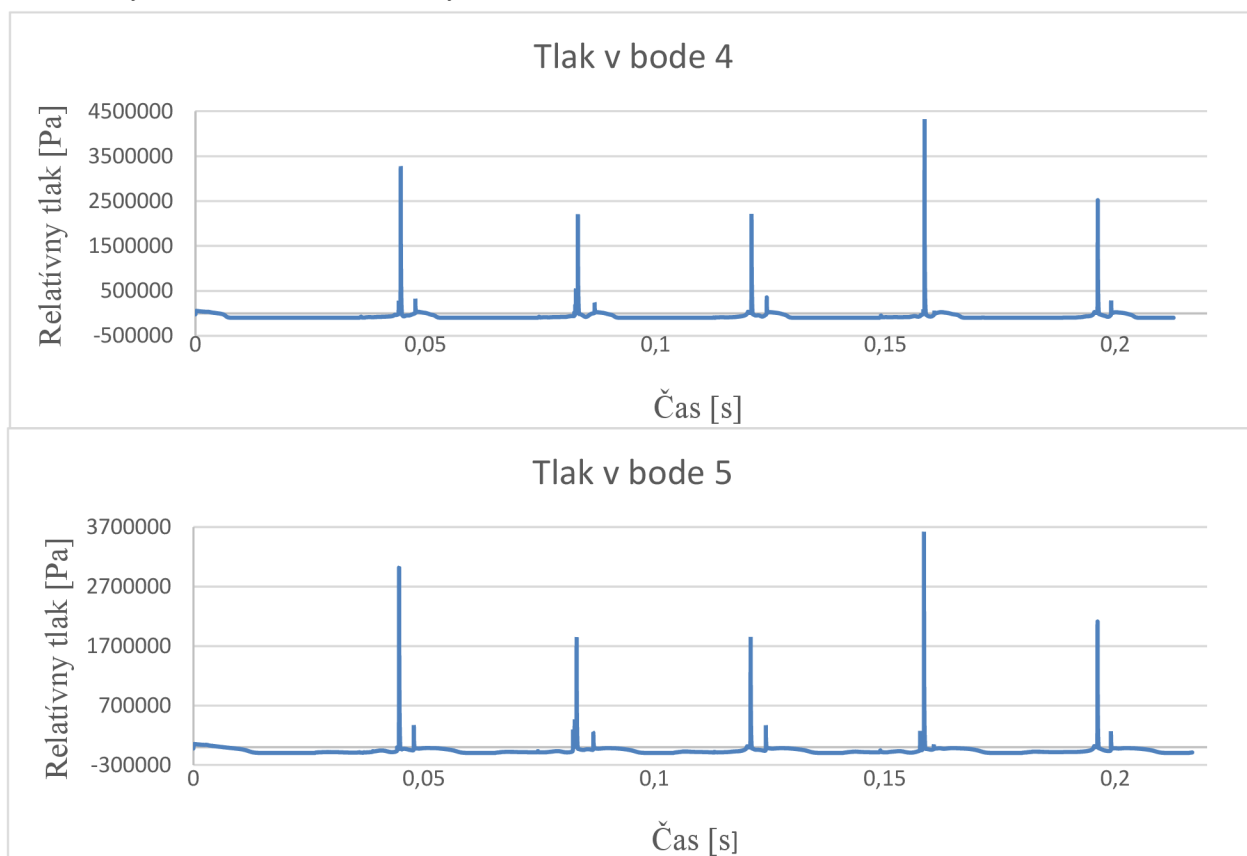
Po vykreslení priebehu tlaku je možné sledovať prudký nárast tlaku spôsobený kolapsom kavitáčnej oblasti. K týmto tlakovým výkyvom dochádza pri zaniknutí hlavnej kavitáčnej oblasti, rovnako ako pri kolapse menších oddelených častí.



Graf 3.1 Porovnanie záznamu tlaku v bodoch 1 a 3 pre Venturiho dýzu klasického tvaru..

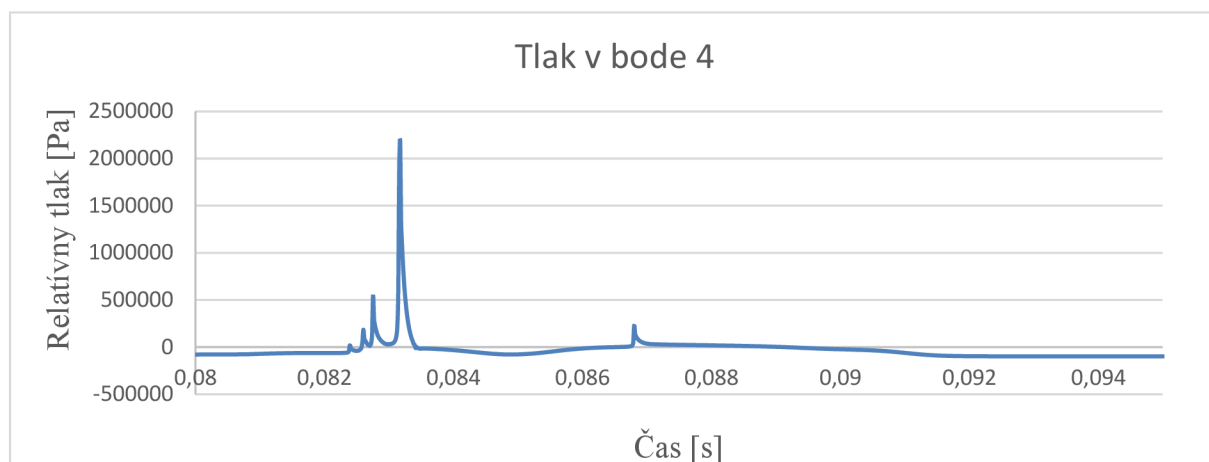
Ako je viditeľné na (graf 3.1), tak pri kolapse hlavnej kavitačnej oblasti je výkyv tlaku natoľko výrazný, že absolútne zatieni zmeny tlaku v iných fázach prúdenia. Na grafe popisujúcom tlak v bode 1 je preto z tlakových zmien možné sledovať predovšetkým kolaps hlavnej kavitačnej oblasti. Zatiaľ čo na zázname z bodu 3 sú lepšie zachytené aj implózie menších oddelených kavitačných oblastí, ktoré sa v grafe prejavujú ako menšie vrcholy.

Pre presnejší popis zmeny tlaku počas vývinu kavitácie budú využité záznamy z bodov 4 a 5. Pretože v týchto bodoch je tlaková zmena vyvolaná zánikom kavitačnej oblasti menej drastická, ako v bodoch umiestnených priamo v prúde kvapaliny. Umiestnenie týchto dvoch bodov bolo volené úmyselne v blízkosti steny, pretože práve tieto miesta sú vhodné pre umiestnenie tlakových snímačov. V prípade experimentálneho overenia výsledkov prevedeného výpočtu, by záznam z bodov 4 a 5 mal byť porovnateľný s reálne nameranými hodnotami v rovnakých miestach.



Graf 3.2 Porovnanie záznamu tlaku v bodoch 4 a 5. Oproti tlakom zaznamenaným v bodoch 1, 2 a 3 sú maximálne hodnoty výrazne nižšie.

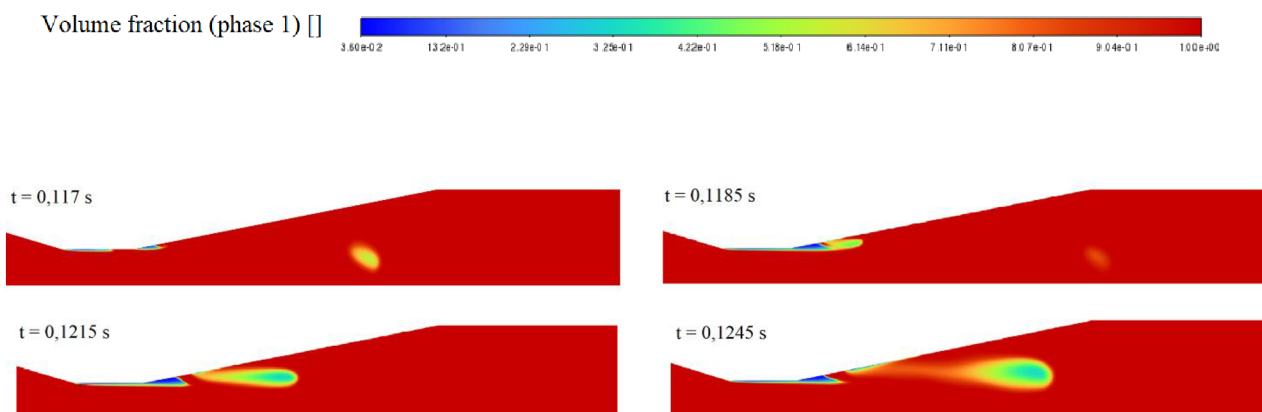
Pri pohľade na záznam z týchto bodov v (graf 3.2), je hneď na prvý pohľad značný rozdiel v maximálnych hodnotách tlaku. Je možné očakávať, že pri reálnom experimente s tlakovými snímačmi umiestnenými na rovnakých miestach dýzy, by záznam tlaku mal podobný priebeh. V (graf 3.2) je taktiež viditeľná zmena v hodnotách tlaku pri kolapse hlavnej kavitačnej oblasti počas jednotlivých cyklov. Po priblížení časti grafu popisujúcej kolaps kavitačnej oblasti je možné presnejšie popísať tlakové výkyvy, ku ktorým dochádza.



Graf 3.3 Detail zo záznamu tlaku v bode 4 určený pre lepšiu ilustráciu zmeny tlaku počas kolapsu kavitačnej oblasti.

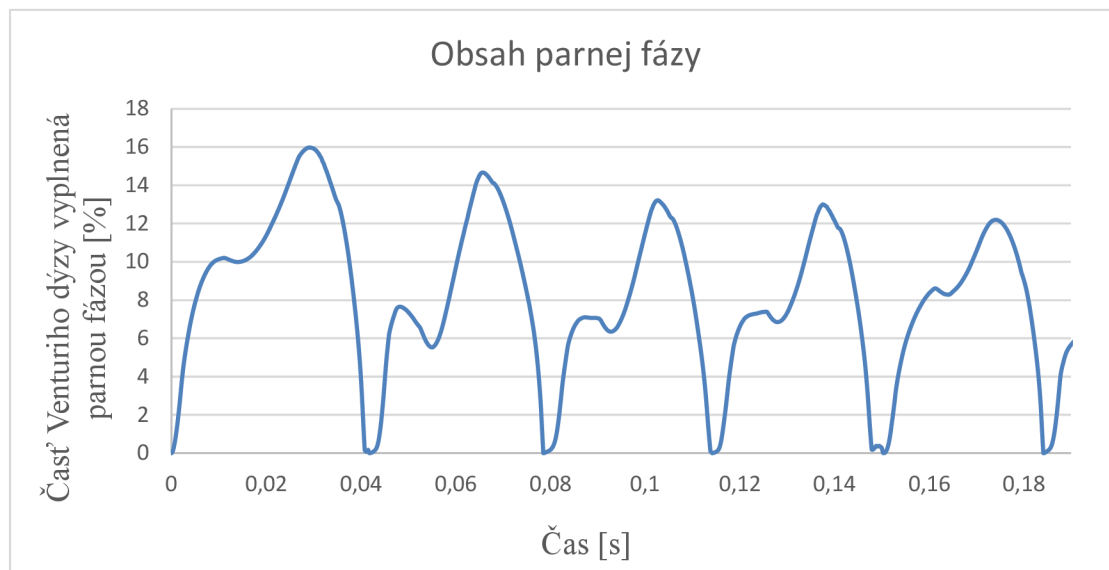
V (graf 3.3) je viditeľné, že zánik kavitačnej oblasti sa neprejaví na tlaku iba ako jeden výrazný vrchol. Najskôr vznikne niekoľko menších vrcholov odpovedajúcich zániku menších sekcií kavitačnej oblasti. Ide predovšetkým o kavitačné bubliny kolabujúce na stene difúzoru a konci hrdla. Ďalej dochádza ku výraznému skoku tlaku pri kolapse hlavnej kavitačnej oblasti. Nasledovne dochádza ku kolísaniu tlaku po určitý časový interval. Počas tohto intervalu začína iniciácia novej kavitačnej oblasti. Menší nárast tlaku viditeľný v čase 0,0868 s odpovedá zániku kavitačnej oblasti, ktorá sa oddelila od hlavnej a bola unášaná prúdom.

Výstupom z výpočtu je taktiež vizuálna reprezentácia vzniknutej kavitácie a jej chovania počas jednotlivých pulzov. Rast a kolaps kavitačnej oblasti má počas všetkých pulzov veľmi podobný priebeh. Rozdiely sú najčastejšie vo veľkosti časti kavitačnej oblasti prichytenej na stenu difúzoru alebo rozmeroch vzniknutého vírového krúžku.



Obr. 3.9 Priebeh vzniku kavitačnej oblasti počas jedného z pulzov. Jednotlivé kontúry vyobrazujú podiel kvapalnej fázy v rozličných časových intervaloch.

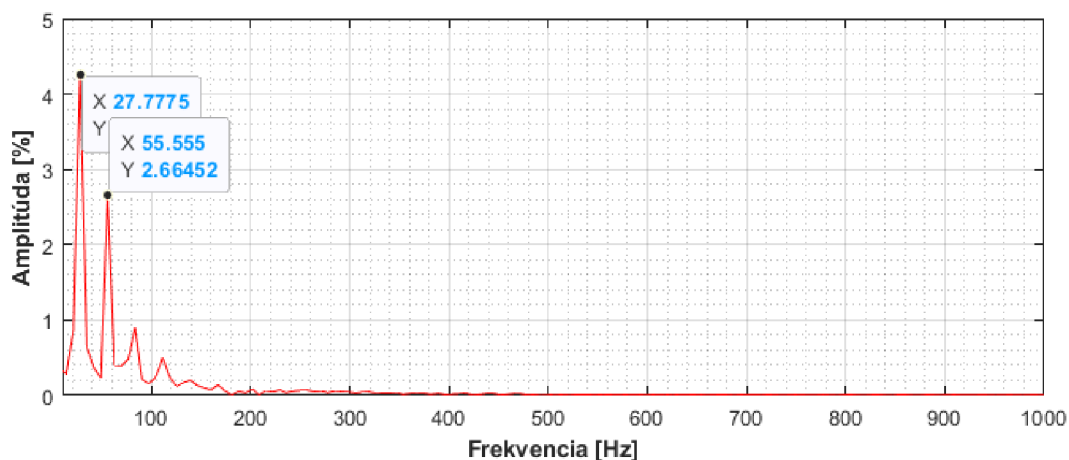
Na (Obr.3.9) je vyobrazený priebeh rastu kavitačnej oblasti v modeli s klasickým tvarom steny difúzoru. V čase 0,1185 s dochádza ku spätnému prúdeniu a vzniku vírového krúžku, tak ako bolo popísané v predchádzajúcej kapitole. Taktiež je viditeľné, že ku iniciácii kavitačnej oblasti dochádza na vstupnej a výstupnej hrane hrdla Venturiho dýzy. Počas svojho zániku hlavná kavitačná oblasť končí svoj kolaps v približne rovnakých miestach, kde pôvodne začal jej rast. Zmena veľkosti kavitačnej oblasti je počas celého vypočítaného časového intervalu sledovaná podľa počtu buniek siete vyplnených plynnou fázou. Pričom bunky vyplnené zmesou plynnej a kvapalnej fázy boli započítané podľa toho, v akom pomere sú jednotlivé fázy.



Graf 3.4 Priebeh množstva parnej fázy vo Venturiho dýze klasického tvaru

Veľkosť kavitačnej oblasti počas všetkých pulzov je zobrazená v (graf 3.4), kde je vyjadrená ako percentuálna časť obsahu výpočtovej domény vyplnená parnou fázou. Počas prvého pulzu má kavitačná oblasť väčšie rozmery a mierne odlišný priebeh ako v nasledujúcich cykloch. Príčinou je neustálenosť výpočtu počas prvého pulzu a hodnoty vygenerované pri iniciácii výpočtu. V prípade všetkých pulzov je pozorovateľný pokles obsahu parnej fázy tesne pred dosiahnutím maxima. Tento pokles je spôsobený kolapsom oddelených častí kavitačnej oblasti ešte predtým, ako hlavná kavitačná oblasť dosiahne svoju maximálnu veľkosť.

Pre určenie frekvencie pulzácií kavitačnej oblasti boli použité dva postupy. V prvom slúži ako základ tlakový záznam nameraný v bode 1. Pretože bod 1 sa nachádza najbližšie ku výstupnej hrane hrdla dýzy, záznam z tohto bodu je najmenej ovplyvnený kolapsom oddelených častí kavitačnej oblasti. Výrazné tlakové vrcholy, ktoré sú na tomto zázname pozorovateľné, odpovedajú kolapsu hlavnej kavitačnej oblasti. Odčítaním časových intervalov medzi jednotlivými vrcholmi je možné určiť periódy jednotlivých pulzov. Pomocou priemernej periódy za celý napočítaný úsek sa dá určiť približná frekvencia pulzov. Druhým spôsobom je vyhodnotenie obsahu parnej fázy pomocou Fourierovej transformácie.



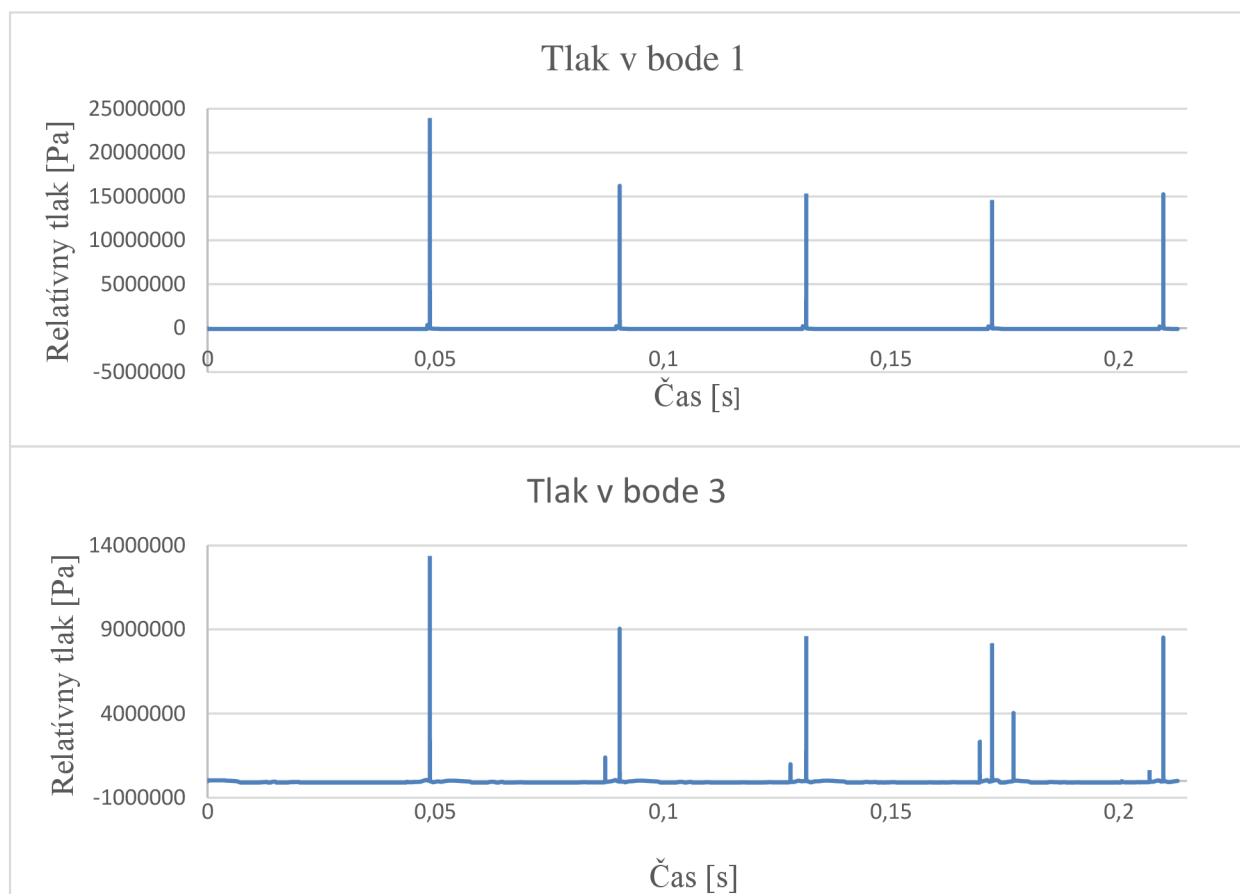
Graf 3.5 Výsledok Fourierovej transformácie zo záznamu obsahu parnej fázy vo Venturiho dýze klasického tvaru.

Výstupom z frekvenčne amplitúdovej charakteristiky je niekoľko frekvencií vyšetřovaného

systemu. Pulzáciám hlavnej kavitačnej oblasti odpovedá najnižšia frekvencia, ktorá má aj najvyššiu amplitúdu. Ostatné frekvencie sú jej násobkom a so zvyšujúcou sa frekvenciou dochádza ku zníženiu amplitúdy. Frekvencia pulzácií kavitačnej oblasti určená pomocou Fourierovej transformácie má hodnotu $27,78 \text{ Hz}$. V prípade metódy odčítania z tlakových vrcholov je hodnota frekvencie $28,14 \text{ Hz}$. Odchýlka medzi jednotlivými metódami je $0,36 \text{ Hz}$.

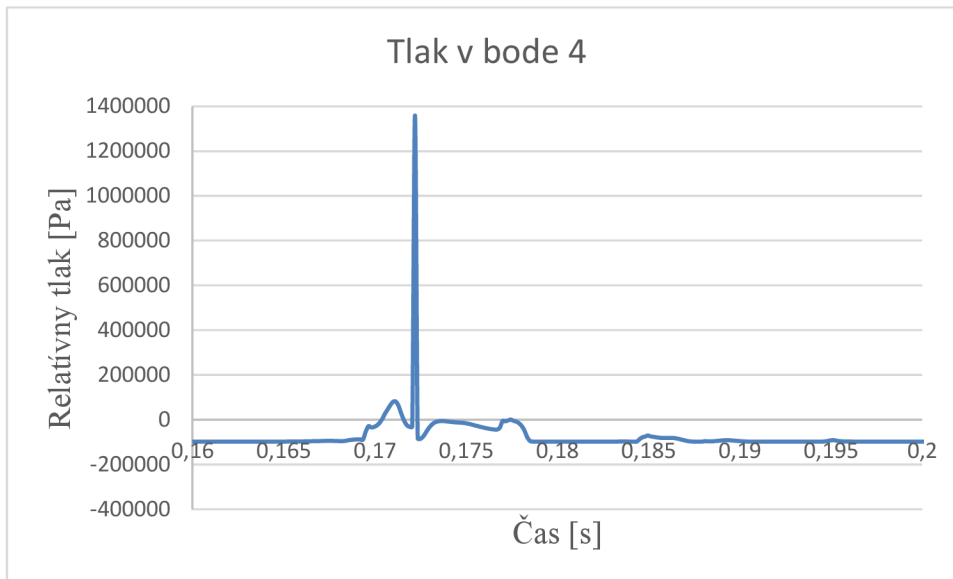
3.8 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy konkávneho tvaru

Pre výpočet modelu s konkávnym tvarom steny difúzoru zostávajú všetky okrajové podmienky totožné ako v predchádzajúcom prípade. Záznam priebehu tlaku bol vytvorený v rovnakých bodoch ako v dýze s klasickým tvarom. Jedinou výnimkou je bod 4, ktorý musel byť posunutý kvôli zmene tvaru steny difúzoru.



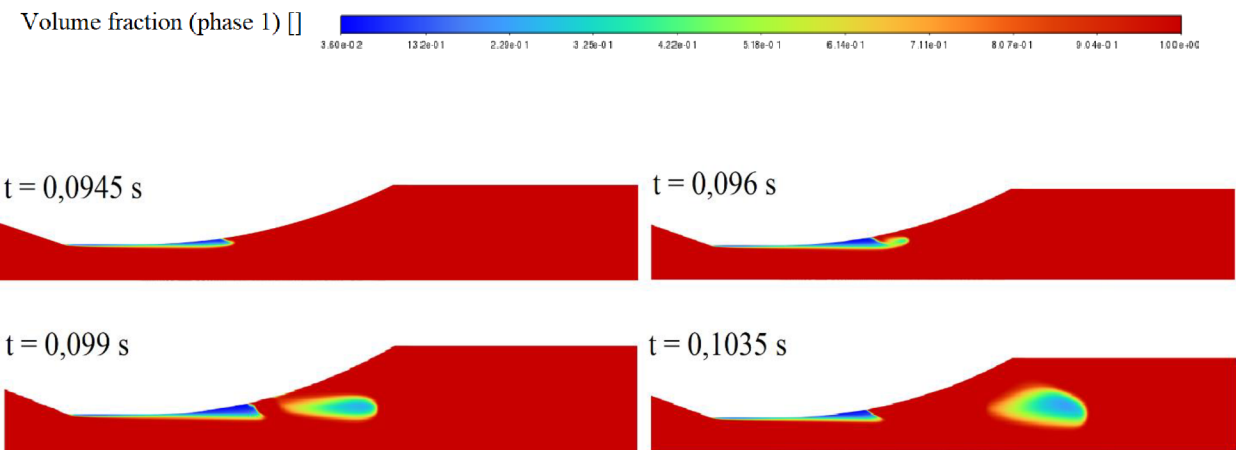
Graf 3.6 Porovnanie záznamu tlaku v bode 1 a v bode 3 pri prúde vo Venturiho dýze konkávneho tvaru.

Na tlakovom priebehu v bode 1, ktorý je znázornený v (graf 3.6), nie je na rozdiel od predchádzajúceho modelu znateľný žiadny vplyv kolabujúcich oddelených častí kavitačnej oblasti. Príčinou je väčšia dĺžka vzniknutej kavitačnej oblasti, čo vedie taktiež ku zväčšeniu vzdialenosti medzi hrdlom dýzy a miestom oddelenia menších sekcií kavitačnej oblasti. Na zázname tlaku z bodu 3, ktorý sa nachádza vo väčšej vzdialenosti od hrdla dýzy, sa prejavujú už aj implózie oddelených sekcií.



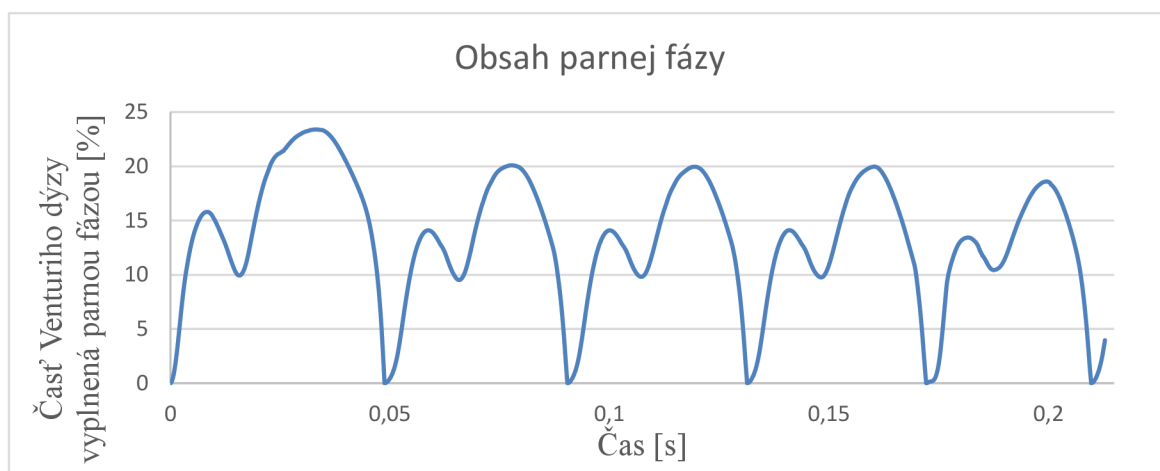
Graf 3.7 Detail zo záznamu tlaku v bode 4 zachytávajúci kolaps kavitačnej oblasti počas jedného z cyklov.

Oproti dýze s klasickým tvarom sú tlakové zmeny pri kolapse hlavnej kavitačnej oblasti menej výrazné. Rovnako ako z pohľadu dosiahnutých hodnôt, tak aj rýchlosti tlakových zmien.



Obr. 3.10 Grafické znázornenie rastu kavitačnej oblasti vo Venturiho dýze konkávneho tvaru, ilustrované na kontúre podielu kvapalnej fázy.

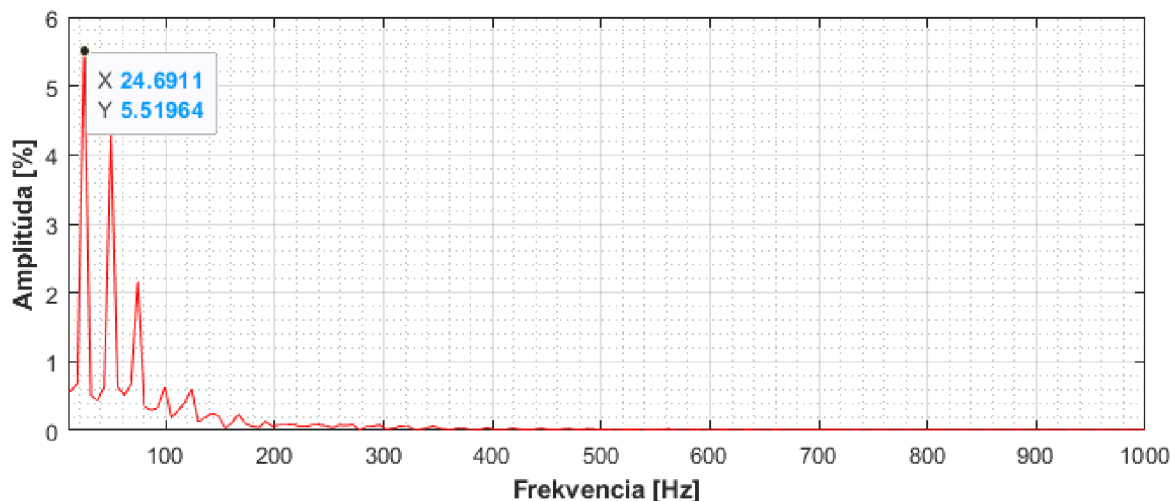
Vznik kavitačnej oblasti má podobný priebeh ako v prípade dýzy s klasickým tvarom, iba s pár rozdielmi. Rast kavitačnej oblasti sa iniciuje prevažne na vstupnej hrane hrdla dýzy, pretože na výstupe z hrdla došlo zmenou tvaru ku zániku ostrej hrany. Kavitačná oblasť expanduje do väčšej vzdialenosti od miesta jej iniciácie, predtým než dôjde ku oddelovaniu jej menších sekcií. Hlavnou príčinou tohto chovania je predĺženie zúženej sekcie dýzy, zapríčinené upraveným tvarom difúzoru. Výsledná kavitačná oblasť teda dosahuje väčšie rozmery a ku jej odtrhávaniu dochádza vo väčšej vzdialenosti od hrdla. Zmena v rozmeroch generovanej kavitačnej oblasti taktiež vedie ku predĺženiu času potrebnému ku jej rastu a následnému kolapsu.



Graf 3.8 Množstvo parnej fázy vo Venturiho trubici konkávneho tvaru počas jednotlivých cyklov.

V (graf 3.8) je viditeľný nárast vo veľkosti vzniknutej kavitačnej oblasti oproti dýze klasického tvaru. Aj v tomto prípade je prvý pulz mierne rozmerovo odlišný od nasledujúcich pulzov. Príčinou je aj v tomto modeli čas potrebný na ustálenie výpočtu.

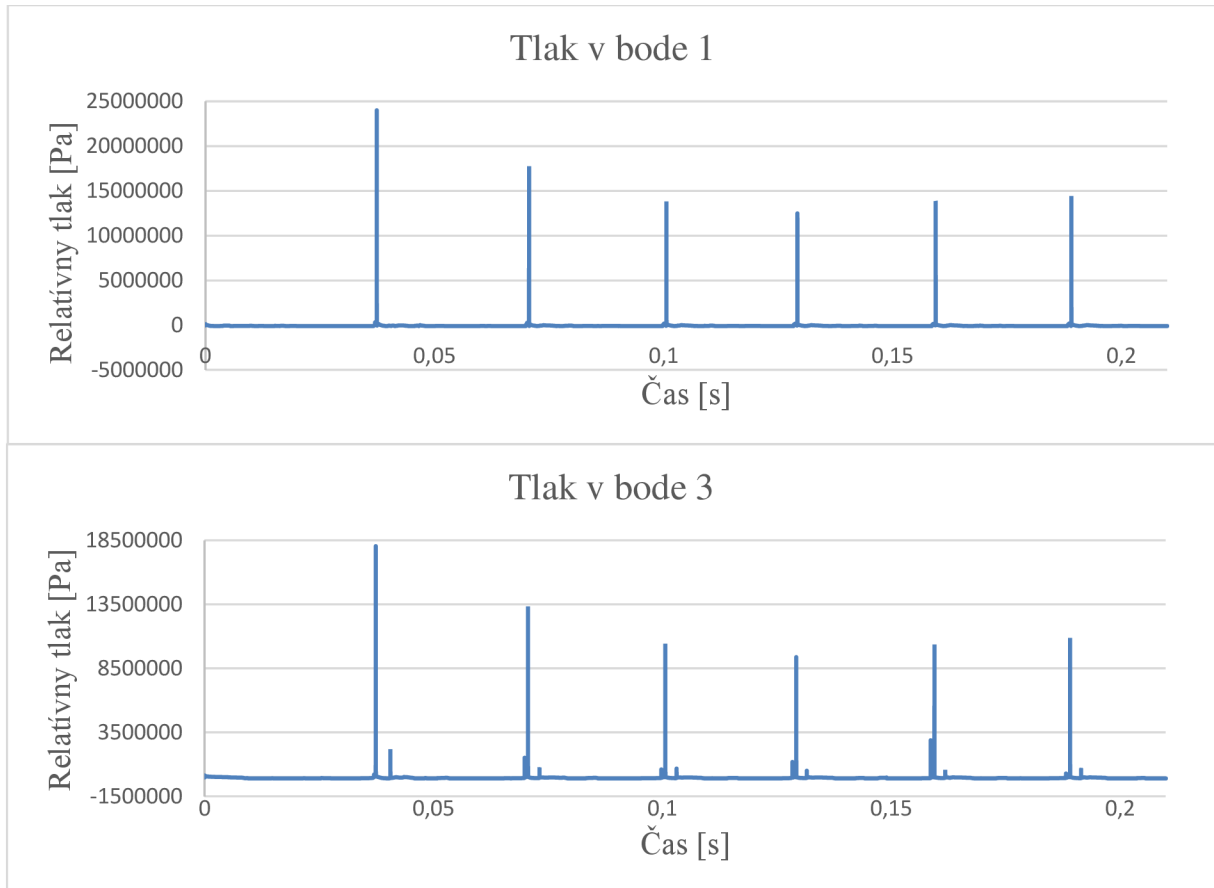
Pre určenie frekvencie pulzov hlavnej kavitačnej oblasti boli použité presne rovnaké postupy, ako v prípade dýzy s klasickým tvarom difúzorov. Pričom v konkávnom modeli bola pomocou Fourierovej transformácie určená frekvencia 24,69 Hz a odčítaním z tlakových vrcholov frekvencia 24,84 Hz. V tomto prípade je diferenciu výsledných frekvencií z jednotlivých metód 0,15 Hz.



Graf 3.9 Výstup z Fourierovej transformácie záznamu množstva parnej fázy v modeli Venturiho dýzy s konkávnou stenou.

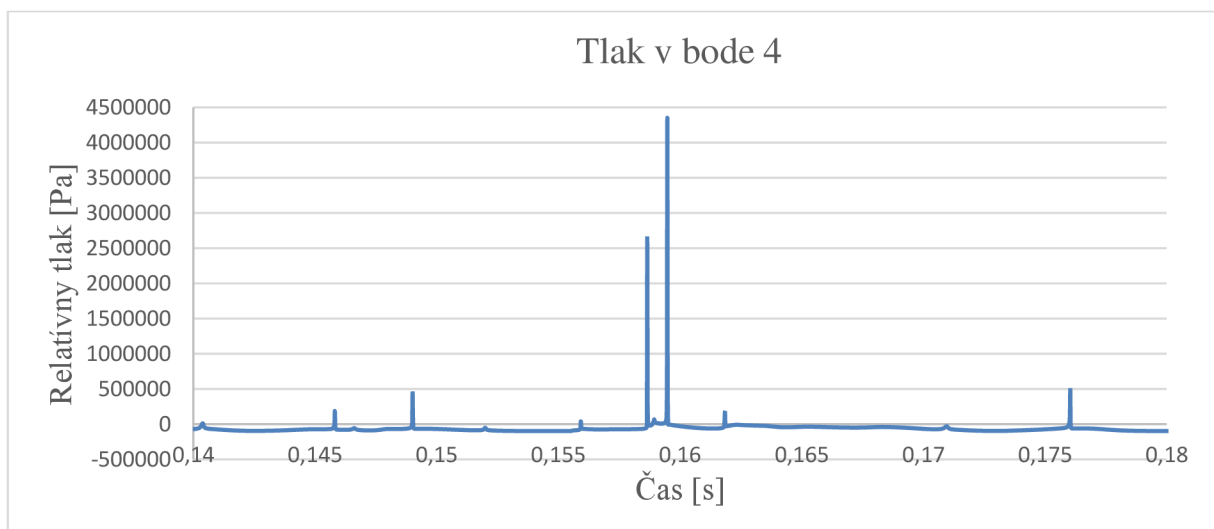
3.9 Kavitácia v modeli Venturiho dýzy konvexného tvaru

Venturiho dýza s konvexným tvarom difúzorovej steny je ďalšou vyšetřovanou modifikáciou. Rovnako ako vo všetkých ostatných modeloch okrajové podmienky a nastavenie výpočtového riešiteľa zostávajú rovnaké.



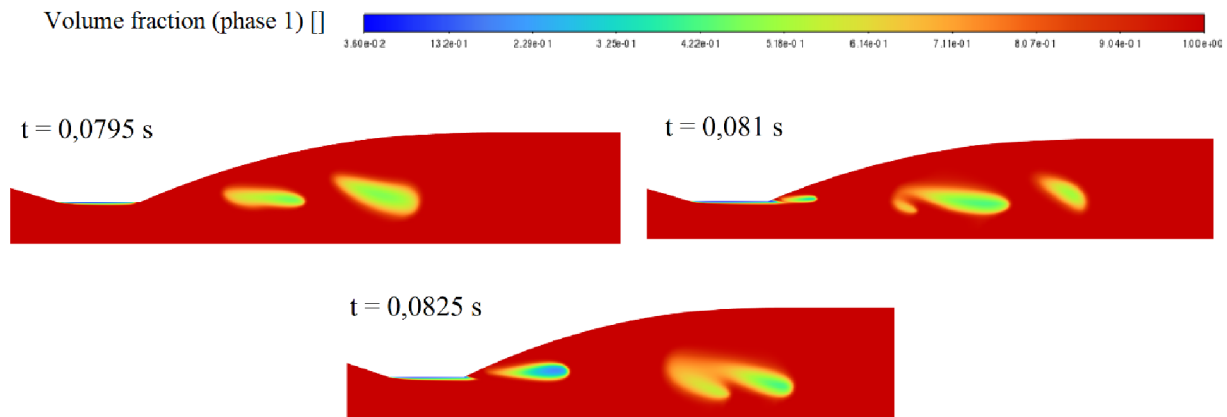
Graf 3.10 Porovnanie záznamu tlaku z bodov 1 a 3 vo Venturiho dýze konvexného tvaru.

Z priebehu tlaku vyobrazeného v (graf 3.10) je viditeľné, že podobne ako v predchádzajúcich prípadoch je tlakový vplyv kolabujúcich oddelených sekcií znateľný až vo väčšej vzdialenosti od hrdla dýzy. Tlakové výkyvy vyvolané oddelenými kavitačnými oblasťami sú taktiež menej výrazné ako v dvoch predchádzajúcich modeloch.



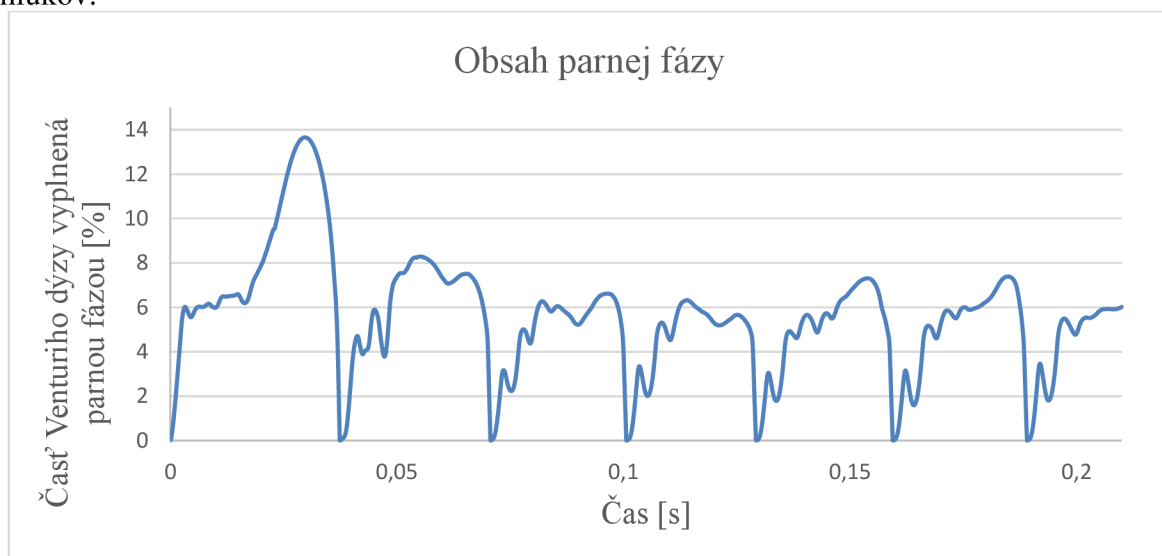
Graf 3.11 Detail tlakového záznamu z bodu 4 vyobrazujúci zmeny tlaku pri kolapse hlavnej kavitačnej oblasti v dýze s konvexným tvarom.

V časovom intervale vykreslenom v (graf 3.11) je okrem tlakového vrcholu vyvolaného kolapsom hlavnej kavitačnej oblasti, možné taktiež vidieť celú radu menších tlakových vrcholov. Tieto tlakové zmeny majú rozličné veľkosti a vyskytujú sa v nepravidelných odstupoch pred a aj po zániku hlavnej kavitačnej oblasti. Vznikajú pri kolapse oddelených kavitačných oblastí, ktoré vznikli ešte v predchádzajúcich cykloch. Kavitačná oblasť v konvexnom modeli pulzuje v takom režime, že pri vzniku nového kavitačného mraku ešte nedošlo ku úplnému zániku kavitačných oblastí z predchádzajúceho cyklu. Toto chovanie je možné sledovať na tlakovom zázname v (graf 3.11), ale aj na kontúrach kvapalnej fázy.



Obr. 3.11 Grafické znázornenie rastu kavitačnej oblasti v modeli s konvexnou stenou. Možné pozorovať súčasnú existenciu kavitačných oblastí z viacerých cyklov a ich interakciu.

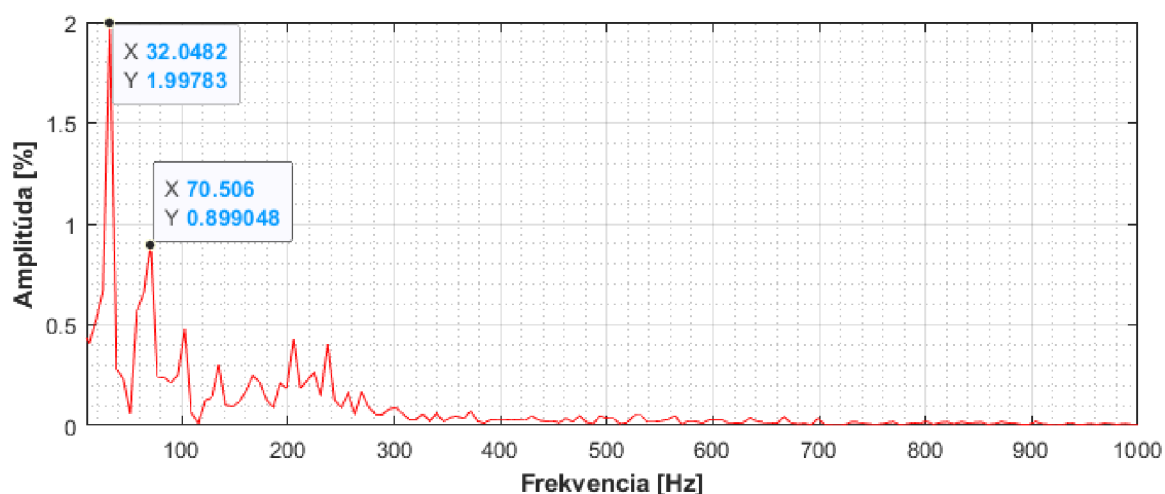
Kavitačná oblasť v konvexnom modeli je iniciovaná na ostrých hranách vstupu a výstupu hrdla Venturiho dýzy. Hlavná kavitačná oblasť je v porovnaní s predchádzajúcimi modelmi veľmi krátka a jej expanzia iba minimálne zasahuje do priestoru difúzoru. Oddelenie sekcií kavitačnej oblasti prebieha v mieste tesne za koncom hrdla dýzy. Do priestoru difúzoru sa prevažne dostávajú iba oddelené časti kavitačnej oblasti, ktoré sú ďalej unášané prúdom kvapaliny. Za časový interval potrebný ku rozpadu separovanej kavitačnej oblasti dôjde ku vzniku a oddeleniu novej oblasti. V časti Venturiho dýzy s väčším priemerom, kde má prúdenie nižšiu rýchlosť, následne dochádza ku vzájomnej interakcii niekoľkých kavitačných zhlukov.



Graf 3.12 Priebeh veľkosti kavitačnej oblasti v modeli Venturiho dýzy s konvexnou stenou.

V (graf 3.12) je možné vidieť, že v modeli konvexnej Venturiho dýzy je rozdiel medzi prvým a všetkými ostatnými cyklami najvýraznejší. Príčinou je ustálenie výpočtu, ale aj vzájomná interakcia oddelených kavitačných oblastí v prúde kvapaliny počas ostatných cyklov. Existencia kavitačných oblastí z viacerých cyklov v tom istom časovom momente je viditeľná aj na tvare krivky v (graf 3.12). Pri porovnaní s predchádzajúcimi modelmi ide o diametrálne odlišný priebeh.

Pre určenie frekvencie pulzácií kavitačnej oblasti v konvexnom modeli boli aplikované rovnaké postupy ako v predošlých modeloch. Pomocou Fourierovej transformácie bola získaná frekvencia 32,05 Hz a odčítaní z tlakových vrcholov frekvencia 32,95 Hz. Rozdiel frekvencií určených obomi metódami je 0,9 Hz.



Graf 3.13 Výstup z Fourierovej transformácie záznamu množstva parnej fázy pre Venturiho dýzu s konvexnou stenou difúzoru.

3.10 Optimalizácia tvaru difúzoru

Po dokončení výpočtov vo všetkých vyšetovaných modeloch je možné vzájomné porovnanie výsledkov. Pre určenie varianty, ktorá je z pohľadu tvorby kavitácie najvýhodnejšia je použitých niekoľko faktorov. Jedná sa predovšetkým o veľkosť vzniknutej kavitačnej oblasti, frekvenciu pulzácií a tlakovú zmenu pri kolapse. Všetky hodnoty okrem frekvencie sú určené, ako priemer maximálnych hodnôt v jednotlivých napočítaných cykloch. Ku porovnaniu tlakových zmien počas kolapsu sú použité iba hodnoty z bodov 4 a 5. Príčinou je možnosť jednoduchého týchto hodnôt v experimentálnych podmienkach. Pri určovaní veľkosti vzniknutej kavitačnej oblasti je zanedbávaný prvý cyklus. Ako už bolo preukázané vo všetkých modeloch, prvý cyklus sa svojou veľkosťou líši od všetkých ostatných cyklov.

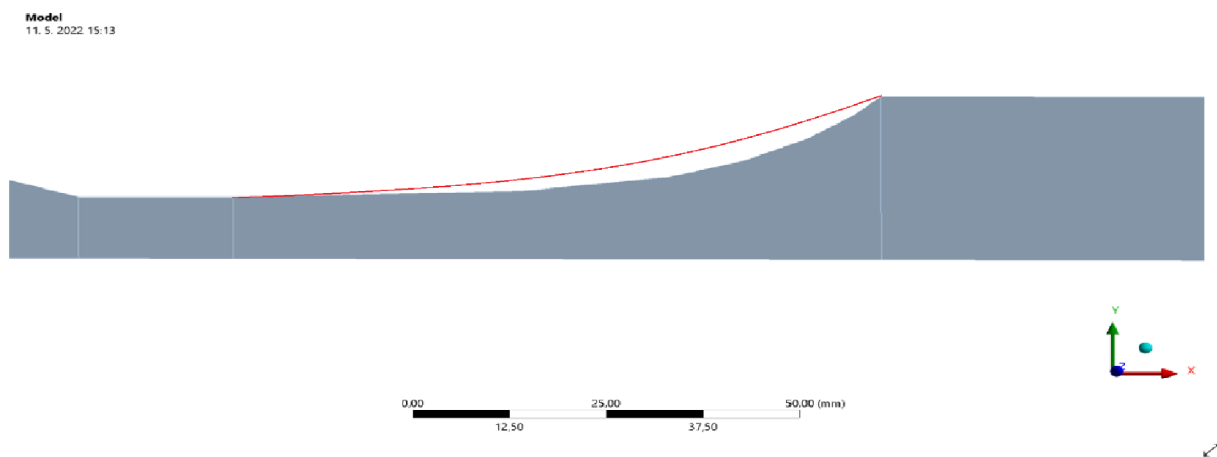
Model dýzy	Maximálny obsah parnej fázy [%]	Maximálny tlak v bode 4 [MPa]	Maximálny tlak v bode 5 [MPa]	Frekvencia pulzácií [Hz]
Klasický	13,06	2,798	2,344	27,78
Konkávny	19,54	0,904	0,725	24,69
Konvexný	7,16	6,432	5,585	32,05

Tab.3.6 Porovnanie hodnôt dôležitých charakteristík kavitačných oblastí vzniknutých v simulovaných modeloch. Obsah parnej fázy a tlaky sú určené ako priemer maximálnych hodnôt z jednotlivých cyklov. Pre frekvencie sú použité hodnoty určené pomocou Fourierovej transformácie.

Z výsledkov v (tab 3.6) sú značné rozdiely medzi Venturiho dýzou s klasickým tvarom a upravenými variantami. V konkávnom modeli dochádza ku vzniku kavitačnej oblasti o väčších rozmeroch, ale s tým je spojená taktiež nižšia frekvencia pulzácií. V konvexnom modeli je generovaná kavitačná oblasť značne menšia, ale na druhú stranu dochádza ku výraznejším tlakovým zmenám. Veľkosť tlakového skoku pri kolapse kavitačnej oblasti napovedá o agresivite produkovanej kavitácie. Pri využití kavitácie ku ničeniu znečisťujúcich látok sú tlakové výkyvy dôležitým faktorom. Je avšak potrebné, aby kavitácia ovplyvnila svojimi deštruktívnymi účinkami čo najväčšiu časť pretekanej kvapaliny. Z tohto hľadiska je malý rozmer generovanej kavitačnej oblasti značnou nevýhodou.

Pre účely odstraňovania polutantov zo znečistenej vody by ideálny model Venturiho dýzy mal generovať kavitačnú oblasť o veľkosti sledovanej v konkávnom modeli, ale s tlakovými zmenami zistenými v konvexnom modeli. Ku takejto situácii nedošlo ani v jednom z vyšetovaných modelov, ale stále existuje možnosť sa ideálnemu stavu aspoň priblížiť. S použitím znalostí z vyhotovených modelov a existujúcej literatúry, je vytvorený ďalší model Venturiho dýzy. Hlavným cieľom tohto modelu je upraviť stenu difúzoru tak, aby došlo ku vzniku kavitácie s lepšími parametrami ako v už vyšetovaných modeloch.

Novo navrhnutý model je zobrazený v (obr.3.12), kde červená krivka popisuje tvar



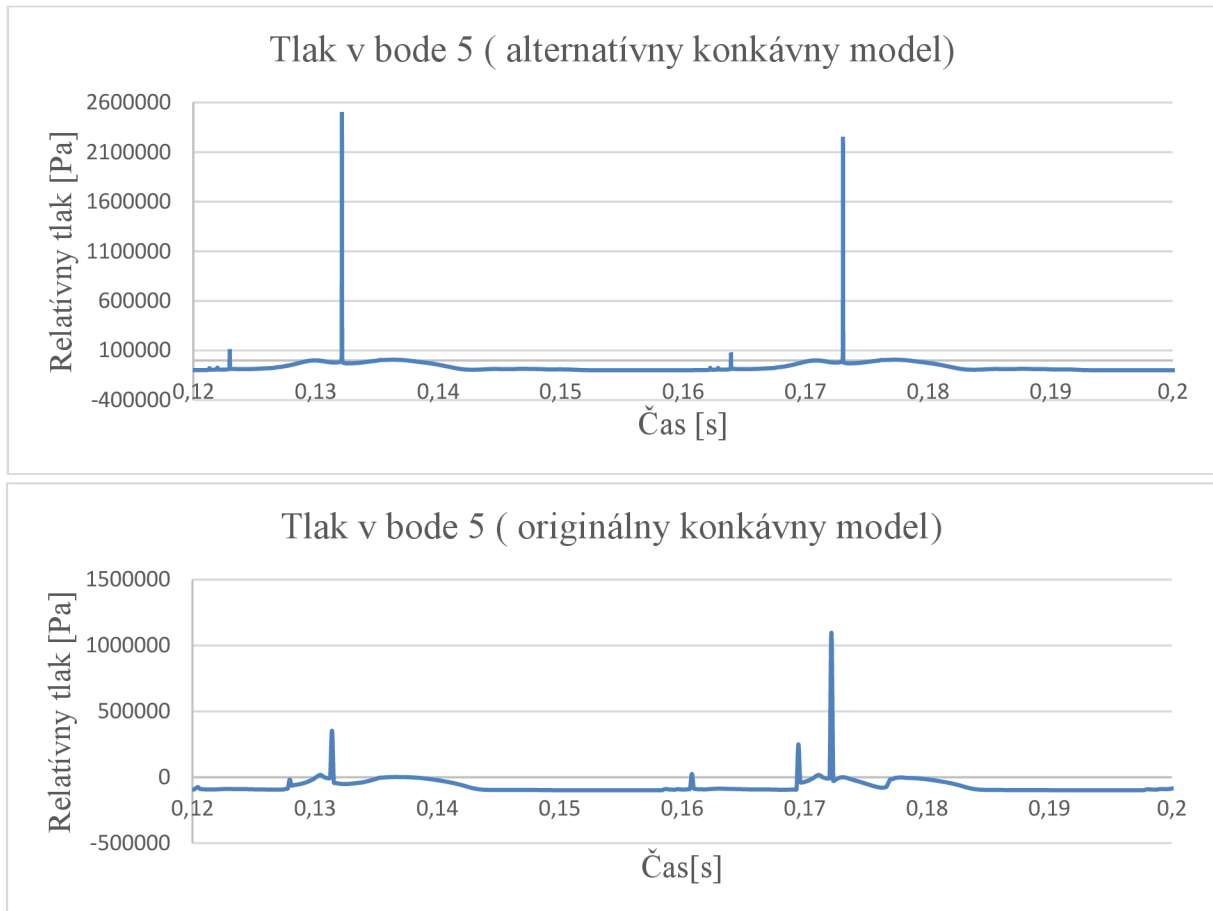
Obr. 3.12 Detail tvaru difúzoru nového konkávneho modelu. Červená linka vyznačuje stenu konkávneho modelu vyhodnocovaného v kapitole 3.8.

prechádzajúcej konkávnej dýzy. Nový model má rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch, všetky rozmery totožne s reálnou Venturiho dýzou a jedinou úpravou je zmena tvaru steny difúzoru. Stena difúzoru má konkávny tvar, ale v tomto prípade už stena nebude tvorená časťou kružnice. Jedná sa o stenu mierne zložitejšieho tvaru, ktorý je volený zo zámerom o predĺženie zúženej časti dýzy. Z práce *Numerical Investigation of Cavitation on Different Venturi Models* spomenutej v kapitole 2.7 vyplýva, že zväčšením dĺžky hrdla dýzy dochádza ku vzniku výraznejšej kavitácie. Po modifikácii tvaru dochádza taktiež ku zmene veľkosti zaoblenia steny. [21]

Model	Počet prvkov	Počet uzlov	Max. aspect ratio	Max. skewness	Max. y+
Originálny konkávny tvar	152000	153981	6	0,26	20,69
Alternatívny konkávny tvar			7,28	0,48	20,69

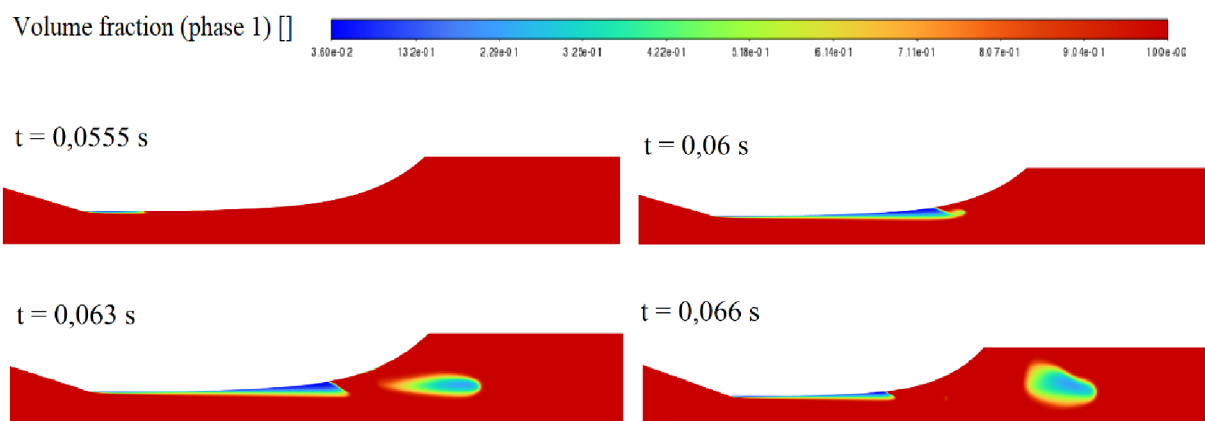
Tab. 3.7 Porovnanie vlastností siete originálnej konkávnej dýzy a novo vytvoreného modelu.

Pre CFD výpočet na novom modeli sú použité rovnaké okrajové podmienky ako v predchádzajúcich modeloch. Sieť alternatívneho konkávneho modelu má vlastnosti popísané v (tab. 3.7).



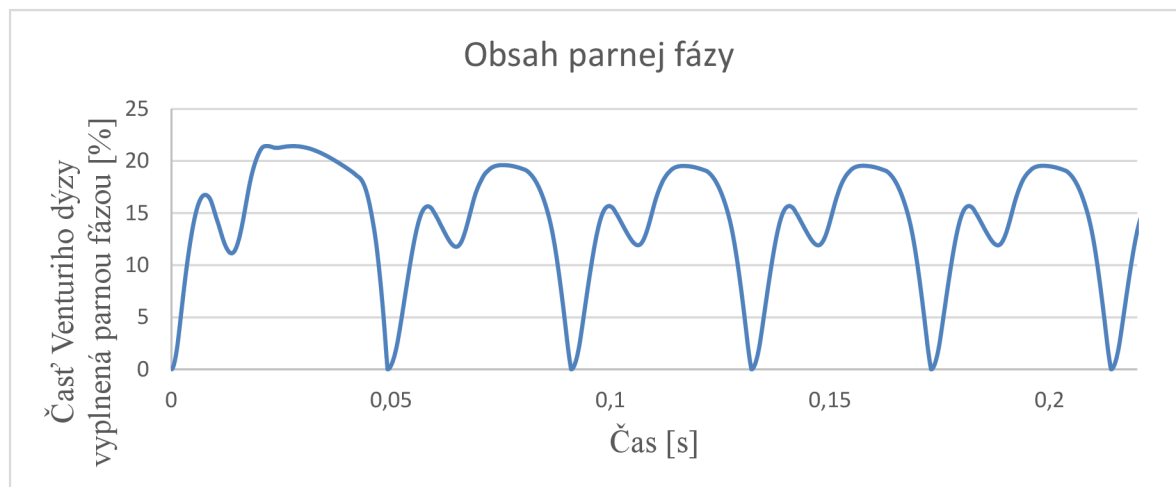
Graf 3.14 Porovnanie tlaku v bode 5 medzi originálnym a upraveným konkávnym modelom. Záznamy tlaku sú vynesené pre ten istý časový interval.

V (graf 3.14) je viditeľný rozdiel v zmene tlaku pri kolapse kavitačnej oblasti medzi originálnym konkávnym modelom a novým modelom. Tlaková vrcholy generované pri kolapse kavitačnej oblasti dosahujú výrazne vyššie hodnoty v novom modeli. Rovnaké chovanie sa prejavuje aj v záznamoch tlaku vo všetkých ostatných bodoch.



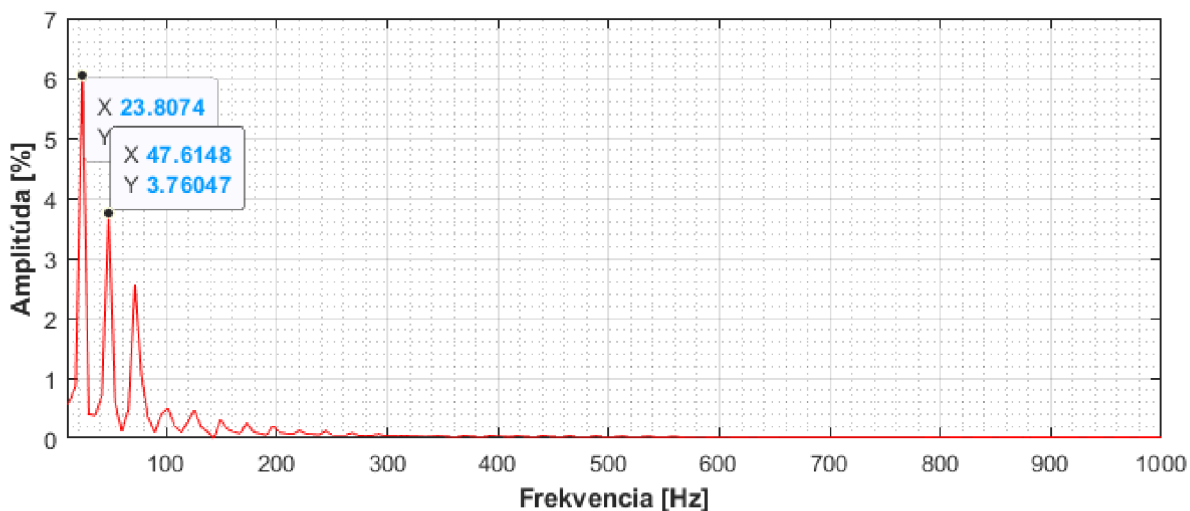
Obr. 3.13 Grafické znázornenie rastu kavitačnej oblasti počas jedného z cyklov v upravenom modeli konkávnej dýzy.

Vznik kavitácie má v novom modeli veľmi podobný priebeh ako v originálnej konkávnej dýze. Z hľadiska veľkosti vzniknutej kavitačnej oblasti došlo iba ku minimálnym zmenám. To isté platí aj pre rozmery oddelených sekcií kavitačnej oblasti.



Graf 3.15 Grafické znázornenie množstva parnej fázy vo Venturiho dýze s upraveným konkávnym tvarom.

Čo sa týka frekvencie pulzácií, tak pomocou Fourierovej transformácie bola určená frekvencia 23,81 Hz a odčítaním z tlakových vrcholov frekvencia 24,27 Hz. Rozdiel medzi frekvenciami určenými jednotlivými metódami je 0,46 Hz.



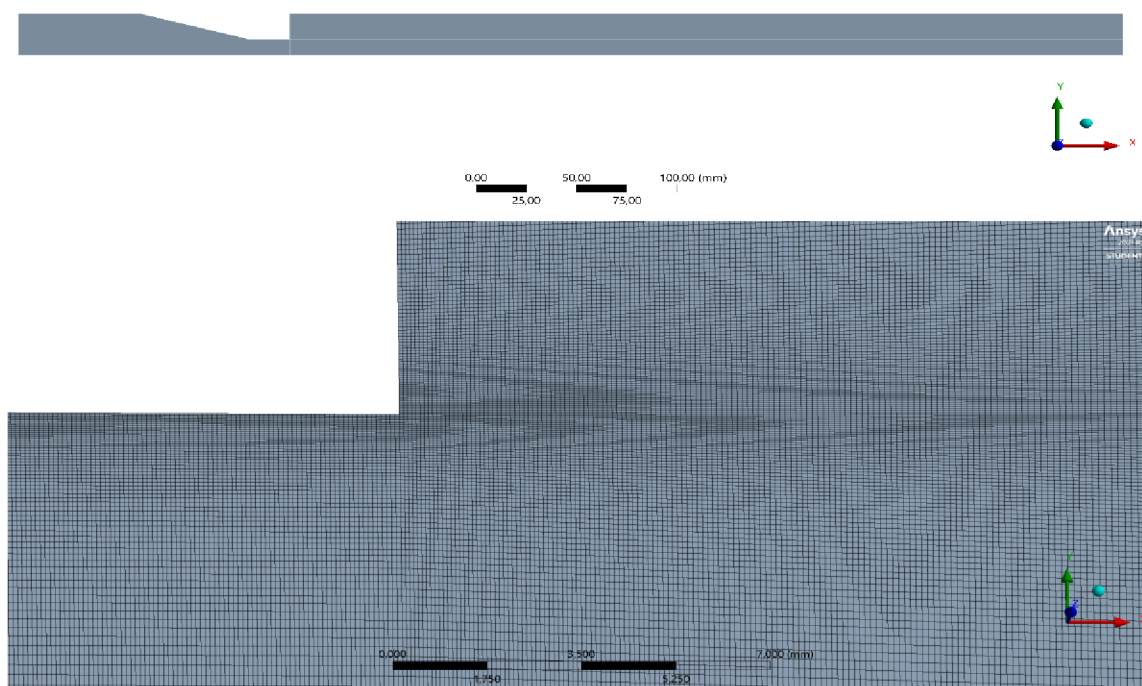
Graf 3.15 Frekvenčne amplitúdová charakteristika, ktorá je výstupom Fourierovej transformácie zo záznamu množstva parnej fázy pre upravenú konkávnu dýzu.

3.11 Overenie významu difúzoru

Vo všetkých doteraz vyšetrovaných modeloch bol uvažovaný difúzor, ako prechod zo zmenšeného priemeru hrdla dýzy na priemer výstupného potrubia. Existuje ale varianta, kde prechod medzi týmito dvomi priermi je realizovaný ostrým skokom. Význam difúzoru vo Venturiho dýze pre tvorbu kavitácie, sa dá overiť pomocou CFD výpočtu bezdifúzorového modelu. Výsledky vzniknutej kavitácie v tomto modeli je následne možné porovnať

s ostatnými doteraz vyšetrovanými modelmi.

Model
14_5_2022 16:49



Obr. 3.14 Geometria bezdifúzorového modelu a detail siete v oblasti výstupu z hrdla dýzy. Bolo nutné značne zjemnenie siete hlavne v blízkosti výstupnej hrany hrdla, pretože práve v tomto mieste dochádza ku rastu a oddelovaniu kavitačnej oblasti.

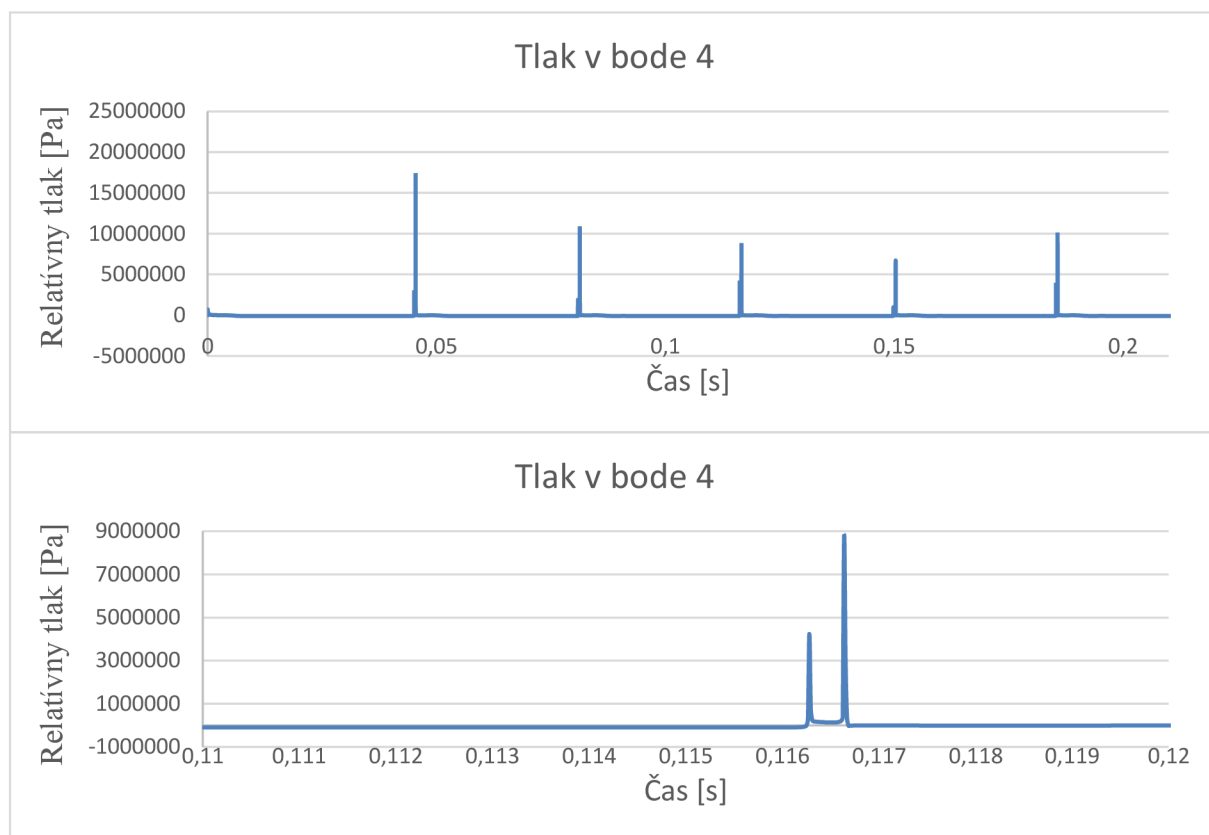
Tvar bezdifúzorového modelu je možné vidieť na (obr. 3.14), rovnako ako detail siete vo výstupnej časti hrdla dýzy. Sieť musela byť dostatočne zjemnená hlavne v blízkosti hrany hrdla dýzy. Práve v tomto mieste dochádza ku rastu a oddeleniu kavitačnej oblasti. Ide taktiež o miesto vzniku vírového krúžku, ktorý je následne unášaný prúdom kvapaliny.

Z dôvodu zväčšenia plochy výpočtovej domény a zjemnenia v kritických miestach prúdenia, došlo kú nárastu počtu elementov siete.

Model	Počet prvkov	Počet uzlov	Max. aspect ratio	Max. skewness	Max. y+
Bezdifúzorový tvar	306 975	308 936	13,61	0,19	3,64

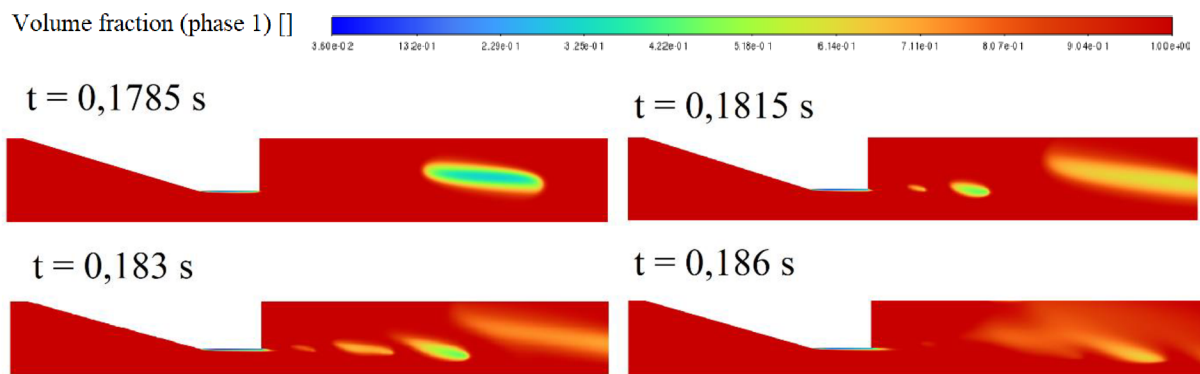
Tab. 3.8 Základné vlastnosti siete bezdifúzorového modelu Venturiho dýzy.

V (tab. 3.8) sú popísané vlastnosti siete vytvorenej pre bezdifúzorový model Venturiho dýzy. Je možné sledovať značný rozdiel v počte elementov siete oproti ostatným modelom, čo môže spôsobiť nepresnosti pri porovnávaní vypočítaných hodnôt medzi modelmi. Model by mal byť aj napriek tomu dostatočný pre vytvorenie aspoň približného porovnania vzniknutej kavitácie s ostatnými modelmi.



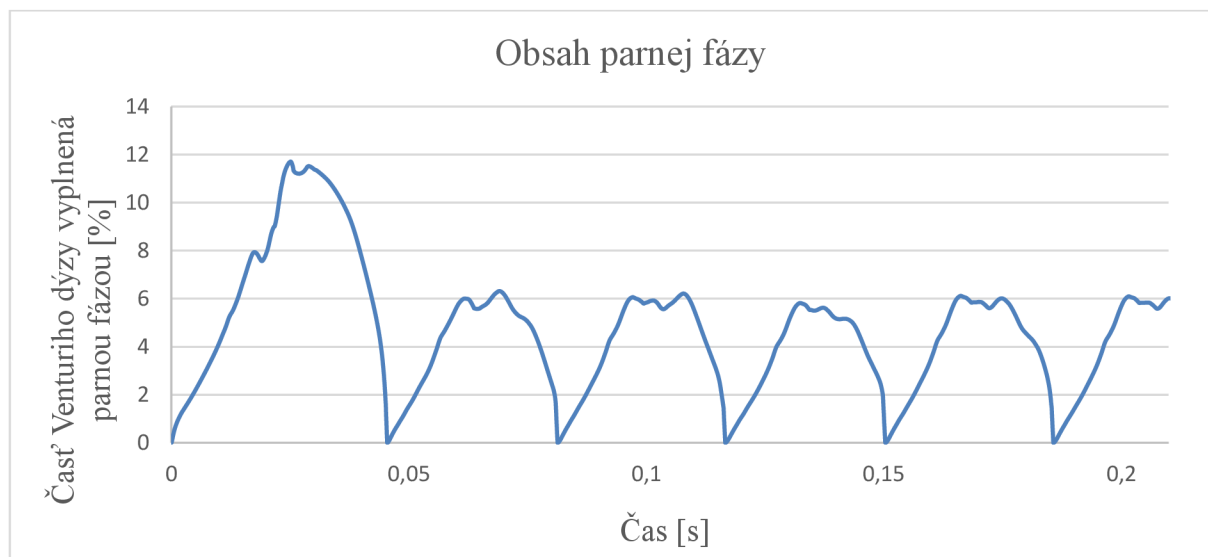
Graf 3.16 Záznam tlaku v bode 4 z bezdifúzorového modelu a detail kolapsu kavitačnej oblasti počas jedného z cyklov.

Na zázname tlaku v (graf 3.16) je viditeľný iba veľmi malý vplyv oddelených častí kavitačnej oblasti. Aj na detailnejšom vyobrazení jedného z cyklov, nie sú okrem dvoch tlakových vrcholov znateľné iné výrazne zmeny tlaku.



Obr.3.15 Grafické znázornenie priebehu vzniku kavitačnej oblasti v bezdifúzorovom modeli.

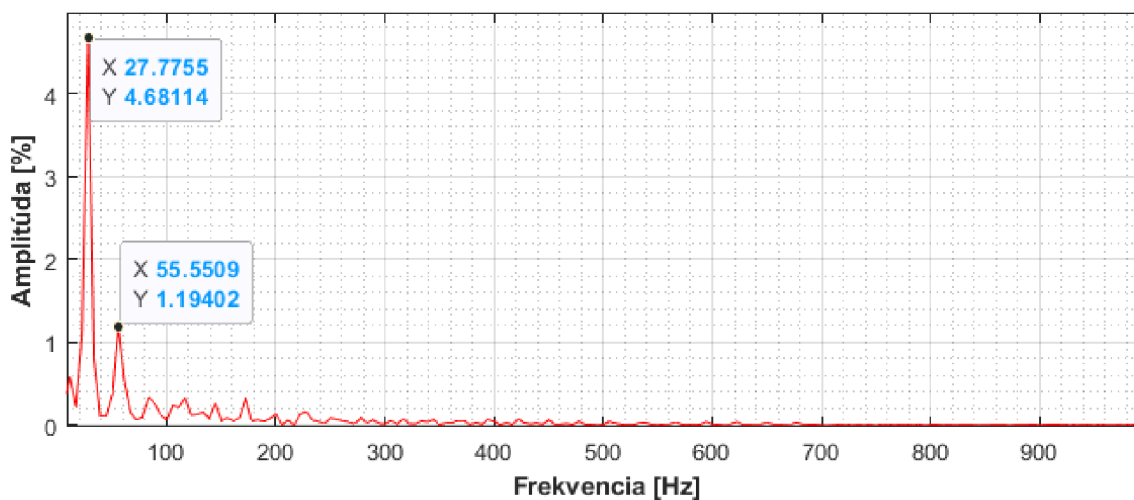
Na (obr.3.15) je možné pozorovať priebeh vzniku kavitačnej oblasti v bezdifúzorovom modeli a už na prvý pohľad je viditeľná podobnosť s priebehom v konvexnej dýze. Na stene hrdla dýzy sa udržuje pomerne malá kavitačná oblasť, z ktorej sa následne oddeľujú zhľuky kavitačných bublín. Tie sú unášané prúdom kvapaliny a dochádza ku ich interakciám s oddelenými kavitačnými oblasťami z predchádzajúcich cyklov.



Graf 3.17 Vykreslenie veľkosti kavitačnej oblasti v bezdifúzorovom modeli počas celého vyšetřovaného časového intervalu.

Na zázname veľkosti kavitačnej oblasti je podobne ako v prípade konvexnej dýzy možné pozorovať výrazný rozdiel prvého cyklu oproti všetkým ostatným. Aj v tomto prípade je tento rozdiel pravdepodobne spôsobený neustáleným výpočtom a hodnotami po iniciácii výpočtu. Nejedná sa o jediný aspekt, v ktorom je tento model podobný konvexnej dýze. Taktiež celkový priebeh vzniku kavitačnej oblasti a tvar krivky v (graf. 3.17), je v bezdifúzorovom modeli veľmi podobný výsledkom z konvexného modelu.

Frekvencia pulzov v bezdifúzorovej dýze má po určení pomocou Fourierovej transformácie hodnotu 27,78 Hz a odčítaním z tlakových vrcholov hodnotu 28,49 Hz. Rozdiel medzi jednotlivými metódami je 0,71 Hz.



Graf 3.18 Výstup z Fourierovej transformácie po spracovaní záznamu obsahu parnej fázy v bezdifúzorovom modeli.

3.12 Porovnanie výsledných výsledkov zo všetkých modelov

Po spracovaní výsledných hodnôt tlaku a obsahu parnej fázy v jednotlivých modeloch je možné zostaviť (tab. 3.9).

Model dýzy	Maximálny obsah parnej fázy [%]	Maximálny tlak v bode 4 [MPa]	Maximálny tlak v bode 5 [MPa]	Frekvencia pulzácií [Hz]
Klasický	13,06	2,798	2,344	27,78
Konkávny	19,54	0,904	0,725	24,69
Konvexný	7,16	6,432	5,585	32,05
Alt. konkávny	19,51	2,656	1,893	23,81
Bezdifúzorový	6,07	9,121	9,460	27,78

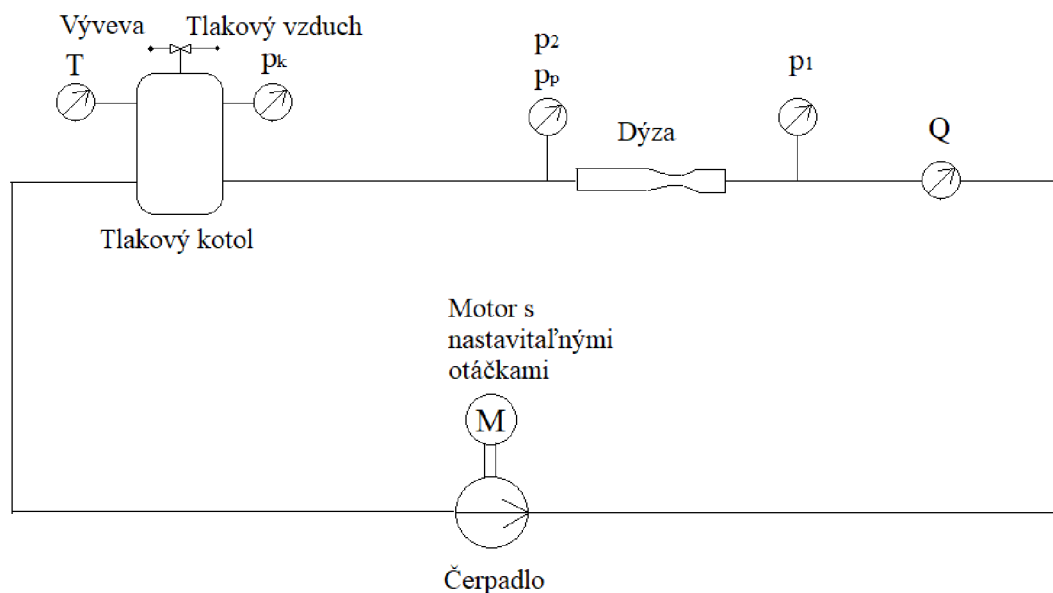
Tab. 3.9 Porovnanie hodnôt významných veličín z jednotlivých modelov.

Ku vzniku kavitačnej oblasti najväčších rozmerov dochádza v pôvodnom konkávnom modeli. Ale tlakové pulzácie sú v tomto modeli zo všetkých variant najnižšie. Naopak v bezdifúzorovom modeli sú tlakové zmeny najvýraznejšie, ale generovaná kavitačná oblasť najmenšia. Podobné chovanie ako v bezdifúzorovom modeli bolo sledované taktiež v modeli v konvexnou stenou. Po úpravách tvaru steny difúzoru v alternatívnom konkávnom modeli boli docielené vyššie tlakové zmeny pri zachovaní rozmerov kavitačnej oblasti. S ohľadom na všetky parametre zistené výpočtom z vyšetovaných modelov je možné odhadnúť, že najvýhodnejším modelom pre tvorbu kavitácie je alternatívny konkávny tvar. Použitím tohto modelu pri zadaných podmienkach je možné vyvolať kavitáciu s väčšími rozmermi ako vo Venturiho dýze klasického tvaru. Zmeny tlaku vyvolané pri kolapse kavitačnej oblasti zostávajú pritom porovnateľne veľké. Najväčšou nevýhodou použitia tohto modelu je nízka frekvencia pulzov, ktorá je spojená s veľkosťou kavitačnej oblasti. Čas potrebný na rast a následný zánik kavitácie narastá pri zväčšení rozmerov vzniknutej kavitačnej oblasti.

4 Experimentálna časť

4.1 Testovací okruh a použitá meracia technika

Z dôvodu potvrdenia výsledkov z CFD výpočtu je potrebné vykonať reálny experiment. V danom experimente sú testované dve Venturiho dýzy s tvarom totožným s výpočtovými modelmi. Presnejšie sa jedná o konvexnú dýzu a pôvodnú konkávnu dýzu. Alternatívna konkávna dýza, ktorá sa z výsledkov javí ako najvýhodnejšia nie je použitá z dôvodu zložitosti svojho tvaru. Dýza, ktorá by dostatočne presne kopírovala tvar alternatívneho konkávneho modelu by bola technicky aj finančne náročná na výrobu. Tvorba dýzy, ktorej najzložitejší prvok je časť kružnice o známom polomere je omnoho jednoduchšia.



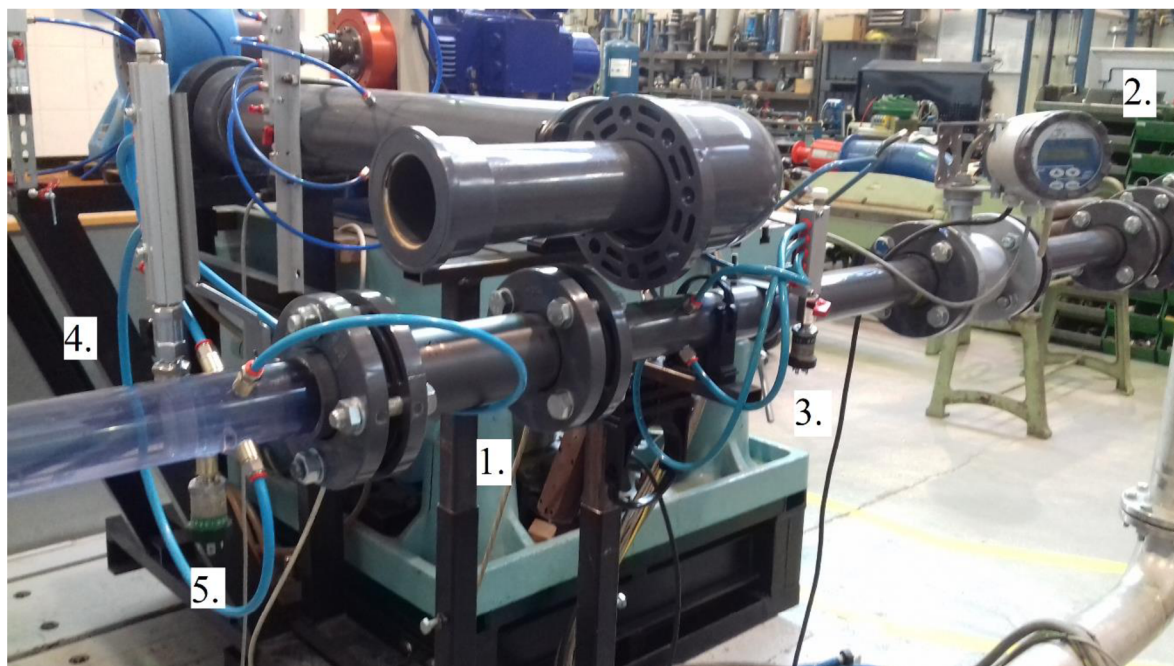
Obr. 4.1 Merací okruh na ktorom bolo prevedené meranie Venturiho dýz s upraveným tvarom.

Zoznam použitej meracej techniky:

- p_1 - Tlakomer, BD Sensors typ DMP 331, rozsah 0 – 4 bar, presnosť 0,35% FSO
- p_2 - Tlakomer, BD Sensors typ DMP 331, rozsah 0 – 4 bar, presnosť 0,35% FSO
- p_p - Tlakomer, BD Sensors typ DMP 331, rozsah 0 – 6 bar, presnosť 0,35% FSO
- p_k - Tlakomer, BD Sensors typ DMP 331, rozsah 0 – 4 bar, presnosť 0,35% FSO
- Q - Prietokomer magneticko-indukčný, ELA spol. s.r.o., typ MQI 99 – SN, rozsah 0,3 – 12 m/s, presnosť 0,3% z meranej hodnoty
- T - Odporový teplomer, RAWET s.r.o., rozsah -25°C ... 120°C , presnosť 0,3% z rozsahu

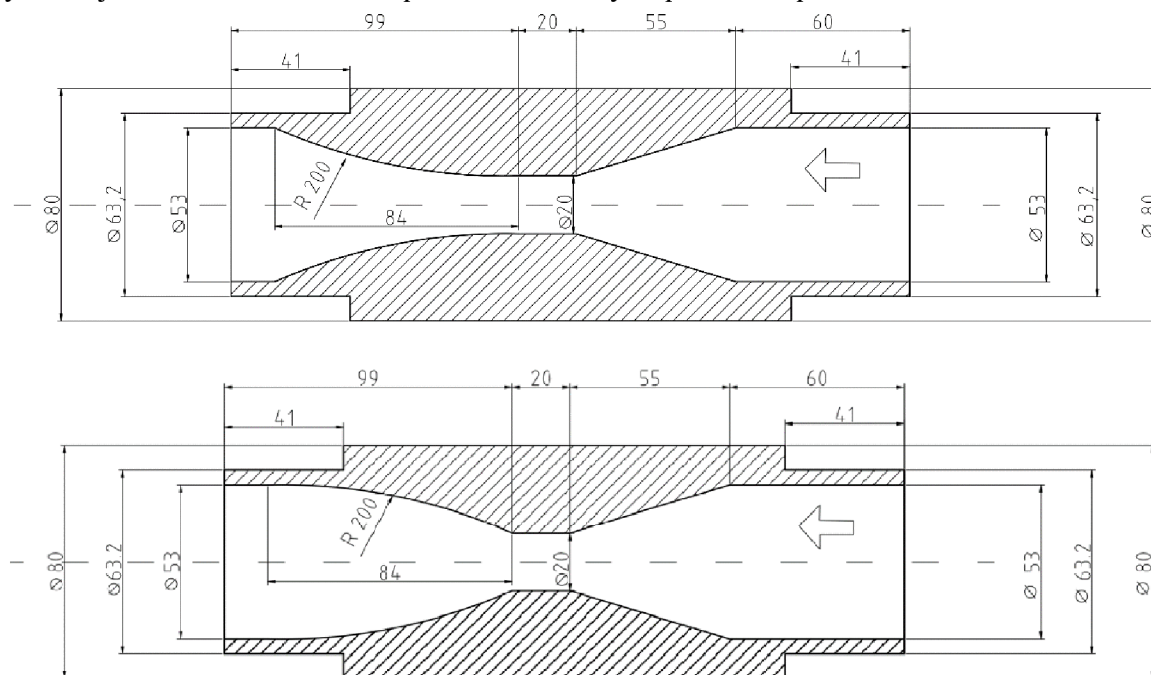
Počas merania je zaznamenávaný tlak p_1 na vstupe do dýzy a tlak p_2 na výstupe. V oboch prípadoch sa jedná o priemernú hodnotu tlaku v danom mieste určenú odberom na štyroch miestach po obvode potrubia. Tlak p_p odpovedá záznamu tlakových pulzácií na výstupe z dýzy, ktoré sú odmerané pomocou tlakomeru pripevnenom priamo na potrubí. Prietok v systéme je možné riadiť zmenou otáčok čerpadla a jeho hodnota je meraná prietokomerom umiestneným pred vstupom do dýzy. Pre riadenie tlaku za dýzou je využitý tlakový kotol, na ktorý je cez trojcestný ventil privedený tlakový vzduch a výveva. Pre

zvýšenie tlaku je do kotla vpustený tlakový vzduch a pre zníženie je možné vzduch odčerpať pomocou vývevy.



Obr. 4.2 Reálne zapojenie meracích prístrojov a testovanej dýzy. Kde: 1. Meraná dýza, 2. Prietokomer, 3. Tlakomer p_1 , 4. Tlakomer p_2 , 5. Tlakomer p_p .

Pre účely tohto merania boli vyrobené dva modeli dýz s požadovaným tvarom a rozmermi. Obidva modeli boli vyrobené obrábaním z nepriehľadného PVC polotovaru. Tento spôsob výroby je finančne a technický menej náročný, ako výroba priehľadného modelu z plexiskla. V prípade priehľadného modelu je nutné jeho povrch po obrobení ešte dostatočne vyleštiť, aby bola zaručená dobrá viditeľnosť cez steny dýzy. Nevýhodou použitých modelov je skutočnosť, že nie je možné priamo sledovať kavitáciu vo vnútri dýzy. Kavitačné bubliny sú pozorovateľné až keď sa nachádzajú v priehľadnom potrubí, nachádzajúcom sa za dýzou. Z tohto dôvodu je počiatok kavitácie a prítomnosť čiastočne vyvinutej kavitácie odhadovaná pomocou tlakových pulzácií a produkovaného zvuku.



Obr. 4.3 Výkresy modelov použitých pre experimentálne meranie.

4.2 Postup a výsledky merania

Meranie na obidvoch dýzach začína v bode s rovnakými podmienkami, prietokom 6 l/s a absolútnym tlakom za dýzou 285 kPa. V tomto stave nedochádza ku kavitácii ani v jednom z vyšetrovaných modelov. Následne je postupne znižovaný tlak za dýzou a prietok je udržiavaný na konštantnej hodnote 6 l/s. Zo znižujúcim tlakom začína v dýzach ku vzniku kavitácie a jej vývinu. V predom zvolených bodoch je zaznamenaný 30 sekundový úsek nameraných hodnôt z meracích prístrojov. Najdôležitejšími veličinami pre ďalšie vyhodnotenie sú tlakové pulzácie na výstupe a priemerné hodnoty tlakov na vstupe a výstupe z dýzy. Pre prípad konvexnej dýzy je tlak znižovaný po hranicu 70 kPa. Pretože výpočtovo vychádza konkávna dýza lepšie pre tvorbu kavitácie, tak počas jej merania je tlak znižovaný až kým nedochádza ku superkavitácii.

Každý nameraný bod je charakterizovaný pomocou hodnoty kavitačného čísla, ktorá odpovedá príslušnému stavu. Kavitačné číslo je určené pomocou rovnice:

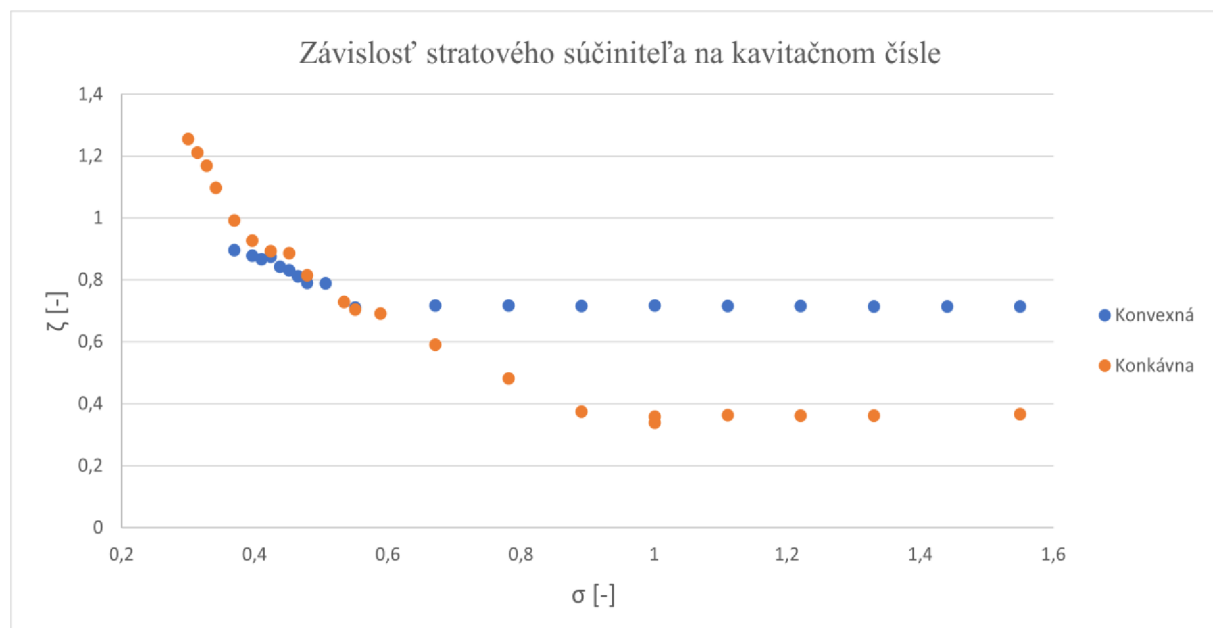
$$\sigma = \frac{p_k - p_{np}}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (4.1)$$

Hustota vody a tlak nasýtených pár je určený interpoláciou z tabuliek, podľa teploty nameranej na teplomery umiestnenom v tlakovom kotli. Rýchlosť v odpovedá rýchlosti kvapaliny v najužšom mieste dýzy, ktorá je určená z prietoku a prierezu daného miesta.

Namerané hodnoty tlakov p_1 a p_2 v jednotlivých bodoch sú spracované pre určenie tlakovej straty na vyšetrovanej dýze. Tlaková strata je v každom bode popísaná pomocou stratového súčiniteľa. Jeho hodnotu je možné určiť zo vzťahu:

$$\zeta = \frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (4.2)$$

Pri zväčšovaní intenzity kavitácie dochádza ku nárastu stratového súčiniteľa, pretože kavitácia zvyšuje tlakové straty vzniknuté na dýze. [5,24]



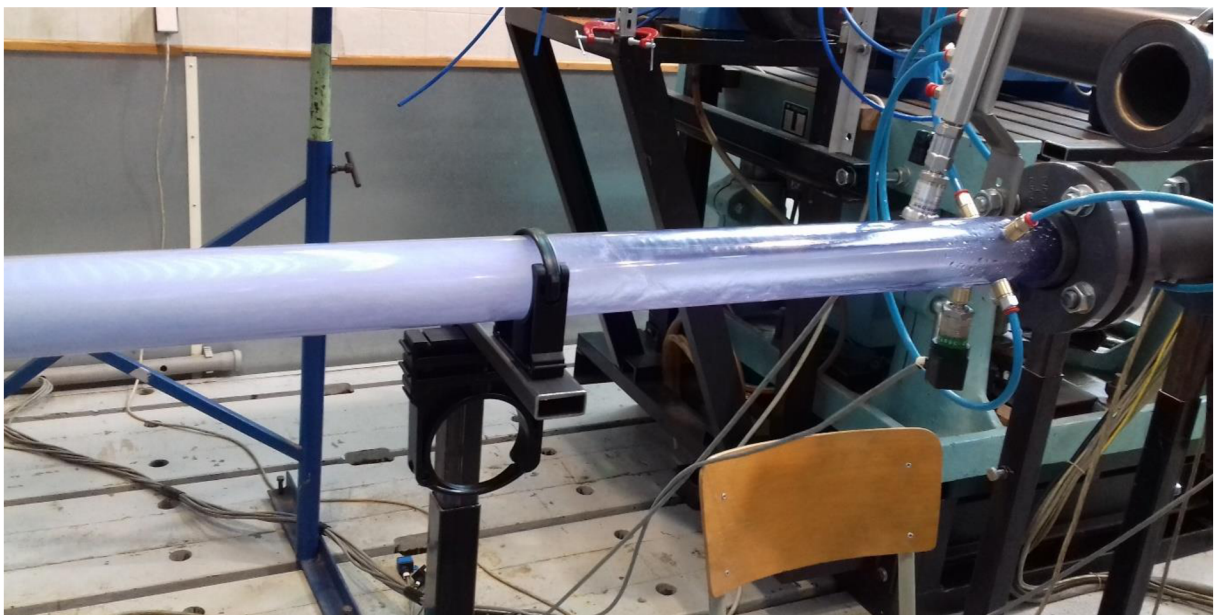
Graf 4.1 Závislosť stratového súčiniteľa na kavitačnom čísle určená z experimentálneho merania pre obidve dýzy.

V (graf 4.1) je vyobrazená závislosť stratového súčiniteľa na kavitačnom čísle pre obidve vyšetované dýzy. V obidvoch prípadoch dochádza iba ku minimálnym zmenám stratového súčiniteľa pri bezkavitačnom prúdení a prúdení s čiastočnou kavitáciou. Vznik plne vyvinutej kavitácie má okamžitý vplyv na tlakovú stratu dýzy. Stratový súčiniteľ má vyššiu hodnotu v konvexnej dýze, ale iba po $\sigma = 0,50$. Pre všetky nižšie kavitačné čísla sú tlakové straty vyššie v konkávnej dýze. Pri podmienkach, ktoré boli použité v CFD výpočtoch, má stratový súčiniteľ hodnotu $\zeta = 0,8743$ pre konvexnú dýzu a $\zeta = 0,8923$ pre dýzu konkávnu.

V konvexnej dýze došlo ku vytvoreniu plne vyvinutej kavitácie približne pri atmosférickom tlaku ($\sigma = 0,55$). V prípade konkávnej dýzy, vznik plne vyvinutej kavitácie nastal pri tlaku 185 kPa ($\sigma = 1$). Meranie v tomto bode zachytilo hraničnú situáciu, kedy opakovane dochádzalo ku prechodu z prúdenia s čiastočne vyvinutou kavitáciou do prúdenia s plne vyvinutou kavitáciou a naopak. Preto existujú v konkávnej dýze pre $\sigma = 1$ dva namerané body. Obidva sú vyhotovené pri rovnakých podmienkach, ale každý odpovedá inému kavitačnému štádiu. Pri prúdení s čiastočne vyvinutou kavitáciou mal stratový súčiniteľ hodnotu $\zeta = 0,339$ a pri prúdení s plne vyvinutou kavitáciou vzrástol na $\zeta = 0,358$.

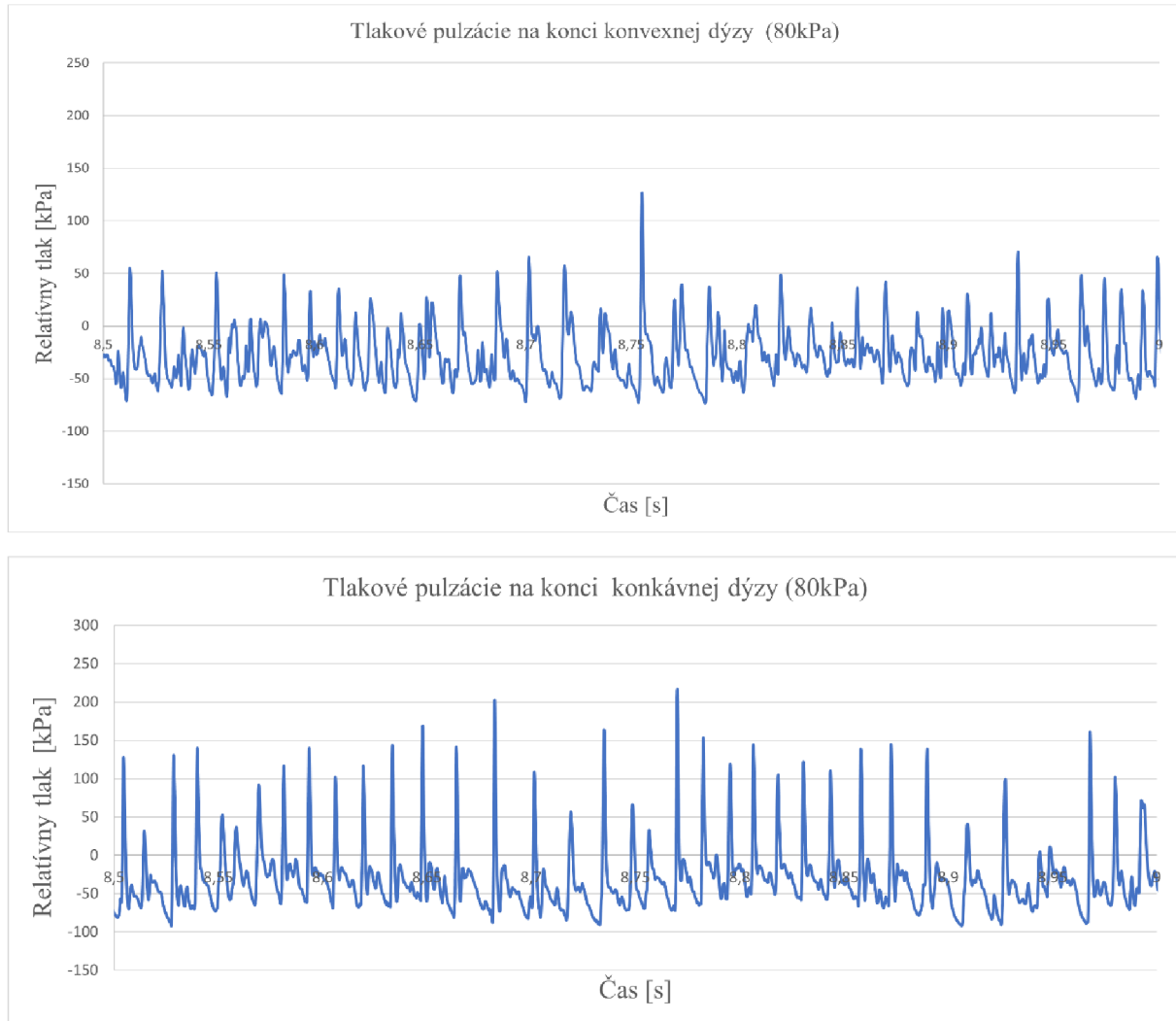
Pretože vyrobené dýzy sú nepriehľadné je problematické presne určiť, kedy dochádza ku počiatku kavitácie a ku čiastočne vyvinutej kavitácii. Stále je možné urobiť aspoň odhad na základe tlakových pulzácií a zvuku produkovaného počas prúdenia kvapaliny. Na základe týchto predpokladov bolo určené, že ku prvým známkam kavitácie v konvexnej dýze dochádza pri tlaku 265 kPa ($\sigma = 1,44$). V konkávnej dýze sa objavili prvé náznaky kavitácie pri tlaku 225 kPa ($\sigma = 1,22$). Počas merania bolo odpozorované, že ku vzniku kavitácie v konvexnej dýze dochádza pri vyššom tlaku ako v konkávnej. Ale na druhú stranu, prechod kavitácie do plne vyvinutého stavu nastáva v konvexnej dýze pri nižšom tlaku ako v konkávnej. Tlakový interval, pri ktorom dochádza v konvexnej dýze ku čiastočne vyvinutej kavitácii je výraznejšie väčší ako v prípade konkávnej dýzy.

Ku superkavitácii došlo v konkávnej dýze pri tlaku 57500 kPa ($\sigma = 0,3$). V tomto bode bolo potrubie za dýzou z veľkej časti vyplnené vzduchovou dutinou a iba v jeho strede sa nachádzal štíhly prúd kvapaliny.



Obr. 4.4 Superkavitácia vznikajúca pri prúdení cez konkávny model dýzy. V potrubí v tesnej blízkosti dýzy je viditeľný prúd kvapaliny obklopený plynnou fázou, ktorá vyplňa väčšinu vnútorného priestoru.

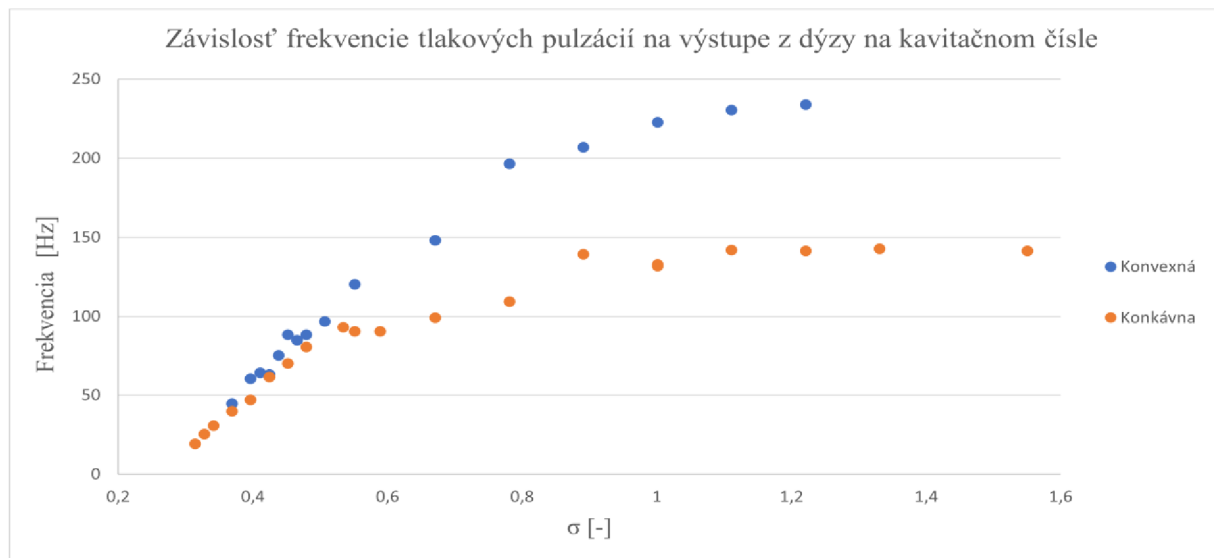
Tlakové pulzácie na výstupe z dýzy sú prevažne tvorené pulzáciami kavitačnej oblasti, ale taktiež sú s časti ovplyvnené lopátkovou frekvenciou čerpadla, ktoré vytvára prietok v okruhu. Veľkosť tlakových zmien vyvolaných prácou čerpadla je významná pri bezkavitačnom prúdení a prúdení s čiastočnou kavitáciou. Tlakové pulzácie generované plne vyvinutou kavitáciou sú omnoho výraznejšie, ako tie tvorené čerpadlom.



Graf 4.2 Porovnanie tlakových pulzácií na výstupe z dýzy medzi konkávnym a konvexným modelom. Vykreslené v bode s rovnakými podmienkami, aké boli použité vo výpočtových modeloch.

V (graf 4.2) je viditeľné, že reálne tlakové pulzácie sú omnoho nižšie ako hodnoty získané z CFD výpočtu. V simulovaných výpočtoch bola voda považovaná za nestlačiteľnú kvapalinu, čo pravdepodobne spôsobilo tento rozdiel. Výpočet taktiež nezohľadňoval pružnosť stien potrubia a dýzy. Pri porovnaní záznamu z konkávnej a konvexnej dýzy je značné, že tlakové pulzácie dosahujú vyššie hodnoty v konkávnom modeli. Amplitúda pulzácií dosahuje v konkávnej dýze hodnoty 2,87 kPa a v konvexnej hodnotu 2,53 kPa. Ide o presný opak výsledkov získaných z numerických výpočtov, kde boli tlakové pulzácie výraznejšie v konvexnej dýze.

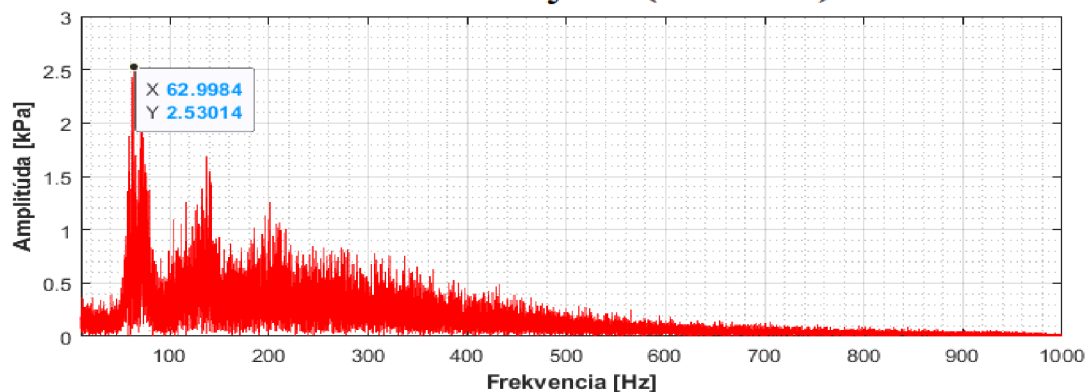
Pre vyhodnotenie frekvencie tlakových pulzácií je vo všetkých meraných bodoch použitá Fourierová transformácia. V oboch modeloch sa prejavil nárast frekvencie tlakových pulzácií s rastúcim kavitáčnym číslom. Z toho vyplýva, že so zvyšujúcou sa intenzitou kavitácie dochádza ku zníženiu frekvencie tlakových pulzácií, ktoré kavitácia produkuje.



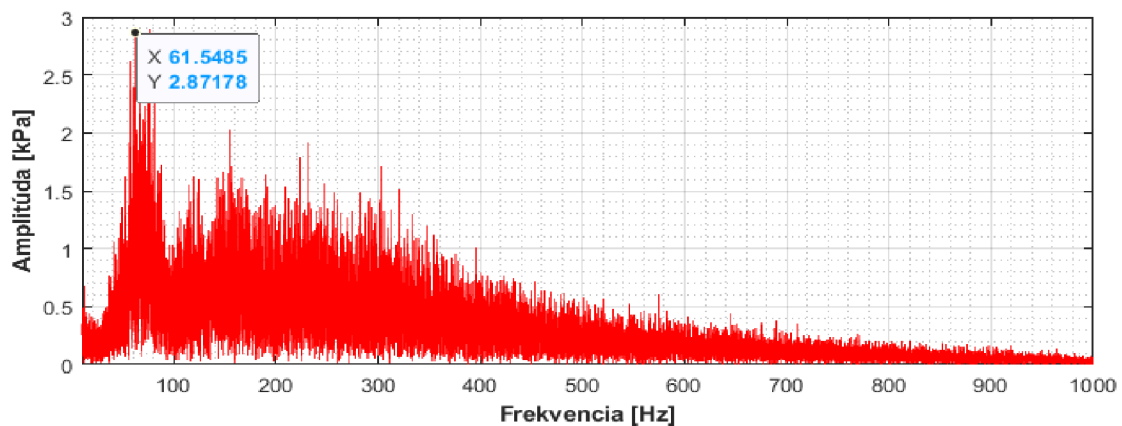
Graf 4.3 Porovnanie frekvencie tlakových pulzácií na výstupe z dýzy medzi konkávnym a konvexným modelom.

Na celom meranom intervale má frekvencia tlakových pulzácií vyššiu hodnotu v prípade konvexnej dýzy. Pri podmienkach, ktoré odpovedajú vytvoreným výpočtovým modelom majú pulzácie v konvexnej dýze frekvenciu 63 Hz a v konkávnej 61,5 Hz. Ani jedna z týchto hodnôt neodpovedá hodnotám určeným numerickým výpočtom. Príčinou je pravdepodobne stlačiteľnosť reálnej kvapaliny, ktorá nebola vo výpočte zahrnutá.

Konvexná dýza (80 kPa)



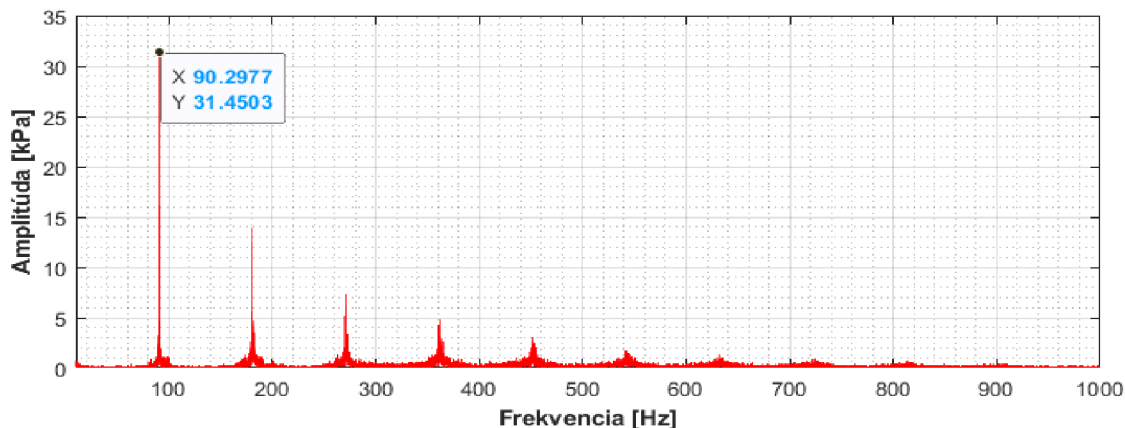
Konkávna dýza (80 kPa)



Graf 4.4 Porovnanie frekvenčne amplitúdovej charakteristiky medzi konkávnou a konvexnou dýzou. Vyobrazený je meraný bod s rovnakými podmienkami ako výpočtové simulácie.

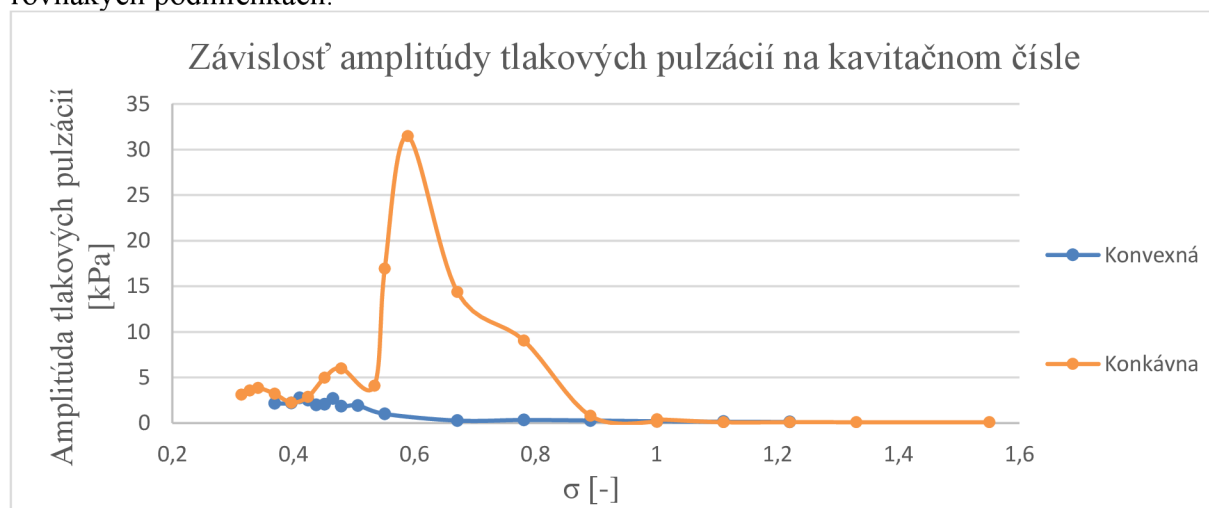
Počas merania na konkávnej dýze, približne pri tlaku 110 kPa ($\sigma = 0,59$) dosahovala frekvencia tlakových pulzácií hodnoty, ktoré sa približovali vlastnej frekvencii systému. Došlo ku rozkmitaniu potrubia a výraznému zosilneniu pulzácií, ktoré v tomto bode dosahovali amplitúdu až 31,45 kPa.

Konkávna dýza (110 kPa)



Graf 4.5 Frekvenčne amplitúdová charakteristika tlakových pulzácií v bode, kde sa najvýraznejšie prejavilo vlastné kmitanie systému.

Okrem tohto špecifického prípadu, dosahovali amplitúdy tlakových pulzácií v ostatných meraných bodoch oveľa nižšie hodnoty. Maximálna amplitúda pulzácií v konvexnej dýze mala hodnotu 2,75 kPa v bode s kavitačným číslom $\sigma = 0,41$. V konkávnej dýze bolo maximum v prípade $\sigma = 0,34$ a dosahovalo hodnoty 3,86 kPa. Pri určovaní maximálnej amplitúdy tlakových pulzácií v konkávnej dýze boli zanedbané hodnoty z bodov blízkyh vlastnej frekvencii systému. Tlakové pulzy v týchto bodoch nie sú vyvolané výhradne kavitáciou a v prípade inštalácie dýzy v odlišnom systéme, by ku nim nedochádzalo pri rovnakých podmienkach.



Graf 4.6 Závislosť veľkosti amplitúdy tlakových pulzácií na kavitačnom čísle. V zázname z konkávnej dýzy je viditeľný interval, v ktorom došlo ku približeniu ku vlastnej frekvencii systému.

5 Záver

Cieľom diplomovej práce bolo komplexné vyšetrenie vplyvu zmeny tvaru difúzoru Venturiho dýzy na generovanú hydrodynamickú kavitáciu. Tento problém bol riešený numerickými simuláciami v programe Ansys Fluent, ale aj prakticky experimentálnym meraním. V oboch prípadoch boli testované dve varianty, presnejšie model s konvexným tvarom steny difúzoru a konkávnym tvarom. Súčasťou numerických výpočtov boli navyše aj model Venturiho dýzy s klasickým tvarom, alternatívny konkávny tvar a bezdifúzorová dýza.

Na základe výsledkov z numerických výpočtov sa pre generáciu kavitácie javili najvýhodnejšie konkávne modely dýzy. Práve v nich pri simulácií dochádzalo ku vzniku kavitačnej oblasti najväčších rozmerov. V porovnaní s konvexným alebo bezdifúzorovým modelom avšak preukazovali menej výrazné tlakové pulzácie. Pulzácie kavitačnej oblasti v konkávných modeloch mali taktiež nižšie frekvencie ako pulzácie v ostatných modeloch.

Pre účely praktického experimentu boli vyrobené dve dýzy podľa modelov navrhnutých v numerických výpočtoch. Jednalo sa o Venturiho dýzy s konkávnym a konvexným tvarom steny difúzoru, pričom hlavné dimenzie a polomer zaoblenia difúzorovej steny bol v oboch modeloch totožný. Obe dýzy boli nainštalované do meracieho okruhu a bolo na nich prevedené meranie tlakových strát a pulzácií. Počas celého experimentu bol v testovacom okruhu udržiavaný konštantný prietok 6 l/s a pre jednotlivé merané body boli nastavované rozličné hodnoty tlaku za dýzou. Pričom prvý meraný bod bol v oboch prípadoch pri tlaku 285 kPa, pri ktorom nedochádzalo ku kavitácií ani v jednej z vyšetovaných dýz. Následne bol tlak za dýzou postupne znižovaný, pričom vzniknutá kavitácia a súvisiace tlakové zmeny boli zaznamenávané v rade meraných bodov.

Na základe výsledkov experimentu je možné prehlásiť, že hodnoty získané numerickými simuláciami neodpovedajú presne realite. Jedná sa predovšetkým o rozdiely v hodnotách tlakov a frekvencií pulzácií kavitačnej oblasti. Tieto rozdiely boli pravdepodobne spôsobené, pretože numerický výpočet pracuje s vodou ako s nestlačiteľnou kvapalinou. Tým pádom nezohľadňuje stlačiteľnosť reálnej kvapaliny alebo pružnosť potrubia. V numerickej situácii taktiež nie je určený obsah nečistôt a rozpustených plynov v kvapaline, ktoré môžu taktiež ovplyvniť vzniknutú kavitáciu.

Po zhodnotení pozorovania vzniknutej kavitácie v meraných dýzach sa ukázalo, že ku prvým náznakom vzniku kavitácie dochádza v konvexnej dýze pri vyšších tlakoch ako v dýze konkávnej. Na druhú stranu tlakový rozsah, pri ktorom sa vyskytuje čiastočne vyvinutá kavitácia je v konkávnej dýze výrazne kratší. Plne vyvinutá kavitácia sa v konkávnej dýze vyskytuje už pri tlaku 185 kPa ($\sigma = 1$), zatiaľ čo v konvexnej približne pri atmosférickom tlaku ($\sigma = 0,55$).

Z tlakového záznamu na vstupe a výstupe z dýzy, bol určený stratový súčiniteľ pre jednotlivé kavitačné čísla. Hodnota stratového súčiniteľa popisuje tlakovú stratu spôsobenú kavitáciou vytvorenou v dýze. Ukázalo sa, že zo zväčšujúcou sa kavitáciou rastú aj tlakové straty na dýze. Podľa nameraných hodnôt má stratový súčiniteľ vyššie hodnoty v konvexnej dýze, v prípade bezkavitačného prúdenia a prúdenia s čiastočne vyvinutou kavitáciou. Pre všetky kavitačné čísla nižšie ako približne $\sigma = 0,5$ avšak platí, že tlakové straty sú vyššie na konkávnej dýze. Príčinou je výraznejší rast stratového súčiniteľa konkávnej dýzy v oblasti prúdenia s plne vyvinutou kavitáciou a prechod do plne vyvinutej kavitácie pri vyšších tlakoch.

Frekvencia tlakových pulzácií bola vo všetkých meraných bodoch vyhodnotená pomocou Foureierovej transformácie. V oboch meraných dýzach sa prejavilo znižovanie frekvencie pulzácií s klesajúcim kavitačným číslom. V celom meranom rozsahu bola frekvencia tlakových pulzácií nižšia v konkávnej dýze. Rozdiel frekvencií medzi dvomi meranými dýzami je omnoho výraznejší pri bezkavitačnom prúdení a prúdení s čiastočne

vyvinutou kavitáciou. Tlakové pulzácie v konvexnej dýze dosahujú maximálne amplitúdy 2,75 kPa pri prúde s kavitačným číslom $\sigma = 0,41$. V konkávnej dýze je maximálna hodnota amplitúdy tlakových pulzácií 3,86 kPa pri prúde s kavitačným číslom $\sigma = 0,34$.

Po zhodnotení výsledkov z numerických výpočtov, sa model s konkávnou stenou difúzoru javil lepší pre vznik kavitácie. V experimentálnom meraní sa ukázalo, že výpočtová simulácia bola nepresná, predovšetkým v hodnotách tlakových pulzácií a ich frekvencií. Aj napriek tomu bol v konkávnej dýze docielený vznik intenzívnejšej kavitácie ako v konvexnom modeli. Konvexná dýza sa ukázala byť účinnejšia pri vyšších tlakoch, kedy je prúde v režime čiastočne vyvinutej kavitácie. V konkávnej dýze ale dochádza ku prechodu do režimu plne vyvinutej kavitácie pri vyšších tlakoch. Veľkosť vzniknutej kavitácie a tlakových strát má v konkávnej dýze výraznejší rast v závislosti na znižujúcom sa kavitačnom čísle. Pri nízkych kavitačných číslach sa taktiež znižuje rozdiel vo frekvenciách tlakových pulzácií medzi konkávnou a konvexnou dýzou. Amplitúda týchto pulzácií dosahuje vyššie hodnoty v konkávnej dýze. Z ohľadom na tieto skutočnosti, dýza s konkávnou stenou difúzoru predstavuje lepšiu variantu pre generovanie prúde s plne vyvinutou kavitáciou.

Alternatívny tvar konkávnej dýzy, ktorý výpočtovo vychádzal pre tvorbu kavitácie najlepšie, by mohol potenciálne ponúknuť ďalšie zlepšenie generovanej kavitácie. Pretože sa ukázalo, že výsledky z výpočtu nevystihujú presne realitu, bolo by nutné upravený konkávny model taktiež experimentálne preveriť.

6 Zoznam použitých zdrojov

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. Praha: Academia, 1969. 280s
- [2] State Key Laboratory of Ocean Engineering[online],[cit. 2021-12-5]. Dostupné z: <https://oe.sjtu.edu.cn/EN/list.php?id=46&t=3>
- [3] BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-509409-3.
- [4] NOSKIEVIČ J., *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1st edition. SNTL Praha, 336 s, 1989, ISBN 80-03-00206-0.
- [5] VÍTĚZ, Tomáš, Tomáš KOUTNÝ a Petr TRÁVNÍČEK. *Tabulky pro termomechaniku a mechaniku tekutin*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2016. ISBN 978-80-7509-402-5.
- [6] FRANC J.P., MICHEL J.M., *Fundamentals of cavitation*. Boston: Kluwer Academic Publishers, xxii, 300 p., 2004, ISBN 14-020-2232-8
- [7] MDPI Open Access Journals [online], [cit. 2021-12-15] Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/20/7280/htm>
- [8] BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Oldřich TARABA. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. Prvé. Praha: SNTL, 1981.
- [9] CAUPIN, Frédéric a Eric HERBERT. *Cavitation in water: a review*. Comptes Rendus Physique. 2006, 7(9-10), 1000-1017
- [10] DAILY Jesse, Jonathon PENDLEBURY, Ken LANGLEY, Randy HURD, Scott THOMSON a Tadd TRUSCOTT. *Catastrophic cracking courtesy of quiescent cavitation*, Physics of Fluids. 2014, 26 (9), 091107
- [11] MRAČKO, Patrik. *Vznik kavitace akcelerací kapaliny* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125080>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.
- [12] KOZÁK, Jiří. *Kavitace vyvolaná rotací kapaliny*. [online] Brno, 2020 [cit. 2021-12-15] Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122496>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.
- [13] HÁTAŠOVÁ, *J.Rayleigh-Plessetova rovnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 40 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. .
- [14] Massflow [online], [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <http://massflow.ir/2018/08/14/post002/>

- [15] ZAKRZEWSKA, Dominika & KRELLA, Alicja. (2019). *Cavitation Erosion Resistance Influence of Material Properties*. *Advances in Materials Science*. 19. 18-34. 10.2478/adms-2019-0019.
- [16] DINDAR E., *An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: A Review*. *Innov Ener Res*, 2016, 5: 137.
- [17] THANEKAR P., GOGATE P., *Application of Hydrodynamic Cavitation Reactors for Treatment of Wastewater Containing Organic Pollutants: Intensification Using Hybrid Approaches*, *Fluids* 3, no. 4: 98. <https://doi.org/10.3390/fluids3040098>
- [18] ČECH, J.; ŠTAHEL, P.; RÁHEL, J.; PROKEŠ, L.; RUDOLF, P.; MARŠÁLKOVÁ, E.; MARŠÁLEK, B. *Mass Production of Plasma Activated Water: Case Studies of Its Biocidal Effect on Algae and Cyanobacteria*. *Water*, 2020, roč. 12, č. 11, s. 1-18. ISSN: 2073-4441.
- [19] KUBINA, Dávid. *Dynamika kavitujičího proudění za clonou*. Brno, 2018, 93 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedúci práce: doc.Ing Pavel Rudolf, Ph.D.
- [20] TANG, Pan ; MANZANO, Juan ; Li, Hong. *Investigation on the Effect of Structural Parameters on Cavitation Characteristics for the Venturi Tube Using the CFD Method*. *Water*. 2019, 11. 2194. 10.3390/w11102194.
- [21] YAYLA, Sedat; YASEEN, Shakhwan; OLCAY, Ali Bahadır. *Numerical Investigation of Cavitation on Different Venturi Models*. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2015, 20.1-2: 22-33.
- [22] ANSYS, Inc.: *Fluent 12.0 Theory guide*, 2009.
- [23] COUTIER-DELGOSHA O. , FORTES PATELLA, Regiane , REBOUND, Jean-Luc. (2001). *Evaluation of the Turbulence Model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation*. *Journal of Fluids Engineering*. 125. 10.1115/1.1524584.
- [24] RUDOLF P., HUDEC M., GRÍGER M., ŠTEFAN D., *Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations*, *EPJ Web of Conferences* 67 02101, 2014.

7 Zoznam použitých symbolov a skratiek

Symbol	Veličina	Jednotka
p	tlak v kvapaline	Pa
p_r	referenčný tlak v mieste kvapaliny	Pa
p_A	tlak v mieste A	Pa
p_B	tlak v mieste B	Pa
p_b	tlak vo vnútri kavitačnej bubliny	Pa
p_∞	tlak v nekonečne veľkej vzdialenosti od stredu kavitačnej bubliny	Pa
p_{np}	tlak nasýtených pár	Pa
p_L	tlak v kvapalnej fáze	Pa
p_1	priemerný tlak na vstupe do dýzy	kPa
p_2	priemerný tlak na výstupe z dýzy	kPa
p_p	tlakové pulzácie na výstupe z dýzy	kPa
p_k	tlak v kotli	kPa
T	teplota	K
v	rýchlosť kvapaliny	m/s
v_A	rýchlosť kvapaliny v mieste A	m/s
v_B	rýchlosť kvapaliny v mieste B	m/s
ν	kinematická viskozita	m^2/s
ν_L	kinematická viskozita kvapalnej fázy	m^2/s
ν_t	turbulentná kinematická viskozita	m^2/s
μ_t	turbulentná dynamická viskozita	$kg/m \cdot s$
r_b	polomer kavitačnej bubliny	m
n_b	počet kavitačných bublín v jednotke objemu	-
t	čas	s
D_{in}	vstupný priemer dýzy	m
D_{out}	výstupný priemer dýzy	m
d	priemer hrdla dýzy	m
l	dĺžka hrdla dýzy	m
α	uhol konfúzoru dýzy	°
β	uhol difúzoru dýzy	°
ρ	hustota kvapaliny	kg/m^3
ρ_L	hustota kvapalnej fázy	kg/m^3
ρ_{vap}	hustota plynnej fázy	kg/m^3
g	gravitačné zrýchlenie	m/s^2
a	zrýchlenie kvapaliny	m/s^2
α_{vap}	objemový zlomok pary	-
σ	kavitačné číslo	-
ζ	stratový koeficient dýzy	-
σ_f	povrchové napätie na rozhraní kvapalnej a plynnej fázy	N/m
h	hĺbka kvapaliny	m
h_A	hĺbka kvapaliny v mieste A	m
h_B	hĺbka kvapaliny v mieste B	m
x	rozmerová súradnica	m
τ_{ij}	Reynoldsov tenzor napätia	N/m
S_{ij}	tenzor rýchlosti deformácie	s^{-1}

k	turbulentná kinetická energia	m^2/s^2
ε	miera disipácie turbulentnej kinetickej energie	m^2/s^3
δ_{ij}	Kroneckerovo delta	-
R_e	koeficient rastu kavitačných bublín	-
R_c	koeficient kolapsu kavitačných bublín	-
Skratka	Význam	
UV	ultrafialové žiarenie (ultra violet)	
UDF	používateľom definovaná funkcia (user defined function)	
CFD	počítačová dynamika kvapalín (computational fluid dynamics)	
RANS	Reynoldsovsky stredované Navier-Stokesove rovnice	