



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

OPOTŘEBENÍ MATERIÁLU KAVITAČNÍ EROZÍ

MATERIAL WEAR DUE TO CAVITATION EROSION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ LECNAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Lecnar

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

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

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

Opotřebení materiálu kavitační erozí

v anglickém jazyce:

Material wear due to cavitation erosion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitační eroze je nežádoucí jev, ke kterému často dochází při provozu hydraulických strojů. V důsledku opakovaných kolapsů kavitačních bublin nastává plastická deformace povrchových vrstev a únavové poškození. Jeho důsledkem je zhoršení kvality obtékaných povrchů a může vést i k oslabení konstrukčních částí a havarijnímu stavu. V současné době probíhá studium kavitačního opotřebení většinou pomocí experimentálního výzkumu, možnosti výpočtového modelování jsou poměrně omezené.

Cíle diplomové práce:

S využitím výpočtového modelování proudění navrhnete vhodný tvar průtočné oblasti tak, aby docházelo k co nejvyššímu kavitačnímu poškození. Vyrobené vzorky budou testovány na kavitační trati Odboru fluidního inženýrství při různých hodnotách kavitačního čísla a pro rozdílné doby působení kavitace. Ve spolupráci s UMVI FSI bude vyhodnocována míra kavitační eroze.

Seznam odborné literatury:

- [1] Noskvič, J.: Kavítace v hydraulických strojích a zařízeních, SNTL, 1990
- [2] Franc, J.P., Michel, J.M.: Fundamentals of cavitation, Springer, 2006
- [3] Knapp, R.T., Dailey, J.W., Hammitt, F.G.: Cavitation, McGraw-Hill, 1970

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je věnována opotřebení povrchu materiálu kavitační erozí. První část popisuje podstatu kavitačního děje s jeho nežádoucím projevem v podobě kavitačního opotřebení pevných těles. Jsou zde diskutovány základní modely kavitace používané při modelování pomocí CFD softwarů. Druhá část zahrnuje návrh a numerický výpočet kritických tvarů průtočných oblastí se zaměřením na nejvyšší intenzitu kavitační eroze. Poslední část je zaměřena na experimentální studii kavitačního opotřebení průtočné oblasti, zvolené na základě numerických výpočtů kritických tvarů.

KLÍČOVÁ SLOVA

kavitace, kavitační bubliny, kolaps kavitačních bublin, kavitační eroze, mechanismy kavitačního opotřebení, CFD modelování

ABSTRACT

This Master's thesis is dedicated to cavitation erosion of a material surface. First part of thesis describes basic principle of cavitation and its erosion consequences of solid objects. There are mentioned basic cavitation models used in CFD software. Second part incorporate concept design and numerical calculation of critical shape in reference to highest intensity of cavitation erosion at flow area. Last part of thesis is experimental and it is focused on cavitation erosion at flow area due to critical shapes from numerical calculation.

KEYWORDS

cavitation, cavitation bubbles, collapse of cavitation bubbles, cavitation erosion, erosion mechanisms, CFD modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LECNAR, L. *Opotřebení materiálu kavitační erozí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....
Lukáš Lecnar

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za jeho rady a odborné připomínky při vypracování této diplomové práce a expertům Ing. Pavlu Gejdošovi, Ph.D. a Ing. Lence Klakurkové, Ph.D. z ÚMVI za provedenou analýzu a poskytnutí výsledků. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

Obsah

Obsah	8
Úvod	10
1. Kavitační děj	11
1.1. Podstata kavitačního děje	12
1.2. Kavitační číslo	13
1.3. Vliv fyzikálních vlastností na kavitaci	13
1.3.1. Vliv povrchového napětí, viskozity a obsahu vzduchu	14
1.3.2. Vliv teploty kapaliny	16
2. Kavitační opotřebení	18
2.1. Mechanismy kavitačního opotřebení	19
2.1.1. Náráz divergentní kulové tlakové vlny	20
2.1.2. Náráz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny	20
2.1.3. Hromadný kolaps	21
2.1.4. Kavituující víry	22
2.1. Intenzita kavitačního opotřebení	23
2.2. Úbytek hmotnosti materiálu	25
3. Modelování kavitace	27
3.1. Vícefázový model směsi (tzv. mixture model)	27
3.2. Rayleigh-Plessetova rovnice	28
3.3. Kavitační modely	29
3.3.1. Model Schnerr-Sauer	29
3.3.2. Model Singhal et al.	30
3.3.3. Model Zwart-Gerber-Belamri	31
4. Výpočtové modelování proudění	32
4.1. Tvorba výpočetní sítě	32
4.2. Numerický výpočet	34
4.2.1. Nastavení v programu Fluent 15.0	34
4.2.2. Průběh výpočtu	35
4.3. Modelování proudění první průtočnou oblastí	36
4.3.1. Tvorba výpočetní sítě	37
4.4. Modelování proudění druhou průtočnou oblastí	39
4.4.1. Tvorba výpočetní sítě	40
4.5. Modelování proudění třetí průtočnou oblastí	42
4.5.1. Tvorba výpočetní sítě	43
4.6. Modelování proudění čtvrtou průtočnou oblastí	44

4.6.1.	Tvorba výpočetní sítě	45
4.7.	Vyhodnocení výpočtů prvního tvaru průtočné oblasti	45
4.7.1.	Průběh statického tlaku.....	46
4.7.2.	Vizualizace kavitace	46
4.8.	Vyhodnocení výpočtů druhého tvaru průtočné oblasti	47
4.8.1.	Průběh statického tlaku.....	48
4.8.1.	Vizualizace kavitace	49
4.9.	Vyhodnocení výpočtů čtvrtého tvaru průtočné oblasti	50
4.9.1.	Průběh statického tlaku.....	50
4.9.2.	Vizualizace kavitace	51
5.	Experimentální zkoušky	53
5.1.	Kavitační oblast	53
5.2.	Kavitační trať	54
5.2.1.	Použitá technika.....	55
5.3.	Průběh experimentu	56
5.4.	Zhodnocení výsledků	57
Závěr		61
Použité informační zdroje.....		62
Seznam použitých zkratk a symbolů		64
Seznam příloh		66

Úvod

Kavitace se vyskytuje při provozu téměř všech hydraulických zařízení a ovlivňuje jejich provoz i životnost. Jedním z nežádoucích projevů kavitace je kavitační eroze. V důsledku opakovatelnosti kolapsů kavitačních bublin dochází k tvorbě plastické deformace povrchů pevných těles a únavovému poškození. Takto vzniklé opotřebení může způsobit zeslabení konstrukčních prvků a vznik havarijního stavu. Z těchto důvodů je kavitace považována za nežádoucí jev. Cílem této diplomové práce je snaha alespoň z části toto tvrzení vyvrátit a dokázat, že kavitační eroze může být využita i ke kladným účelům. Již v současnosti se využívá kavitační eroze ve strojírenském průmyslu k čištění tvarově složitých součástí, odstraňování okují a dalších nečistot. Kladné využití najdeme i v dalších odvětvích pro hubení sinic ve vodě, čištění ledvinových a zubních kamenů a podobně.

Od konce 19. století, kdy bylo lidstvo poprvé seznámeno s kavitačním dějem a jeho účinky, uplynula již řada let. Myšlenka, že se hydraulické stroje budou konstruovat bez vzniku kavitace při provozu, je již přežitkem. Se současnými požadavky na účinnost strojů jsou konstruktéři nuceni připouštět kavitační provoz o bezpečné intenzitě. Běžný postup pro určení intenzity kavitačního opotřebení spočívá ve výrobě drahých prototypů, které jsou podrobeny časově náročným experimentálním zkouškám. V poslední době se ale čím dál více využívá numerických metod, které šetří čas i peníze. Díky softwarům, které umožňují namodelovat proudění hydraulickými oblastmi, jsme schopni popsat vlastnosti proudění a využít těchto poznatků při optimalizaci hydraulických zařízení. Výsledky z těchto numerických výpočtů nejsou vždy fyzikálně přesné, ale mohou být využity pro získání prvotních informací o této problematice. Možnosti modelování kavitačního proudění jsou stále poměrně omezené, proto je studium kavitačního opotřebení prováděno převážně pomocí experimentálních zkoušek.

1. Kavitační děj

Pojem kavitace vznikl z latinského slova „cavitas”, což v překladu znamená dutina. Kavitační děj byl poprvé popsán S. W. Barnabym v roce 1895, který jej popisuje jako vznik parních bublin. To je správná myšlenka, neboť v kapalině proudící kolem pevného tělesa vznikají za určitých podmínek např. tlaku či teploty velmi malé prostory vyplněné buď parní a plynnou fází, nebo každou z těchto fází zvlášť. Vznikají tedy parní a plynové bubliny. Ty mohou vzniknout i ve stojaté kapalině, při kmitání pevného tělesa. Tento jev je označován jako kavitace [2].



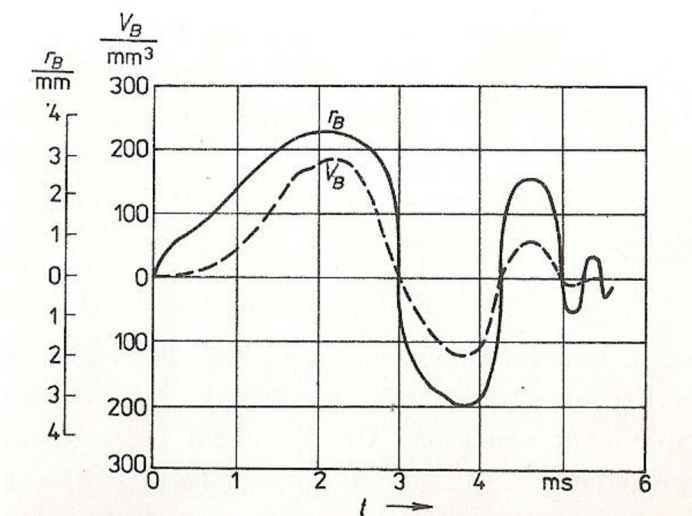
Obrázek 1: Kavitace vzniklá pohybem lopatky [14]

První problémy s kavitací resp. kavitační erozí byly objeveny již na konci 19. století při stavbě lodí, kdy docházelo ke vzniku kavitační eroze lodních šroubů. Kavitace způsobovala pokles výkonu a poměrně rychlé překročení životnosti obtékaných těles. Ani po takové době nejsme schopni zcela popsat kavitační děj od jeho počátku až po kolaps kavitačních bublin. Přitom znalost tohoto jevu je velmi důležitá při projektování, konstrukci a provozu hydraulických zařízení, ale i z hlediska teoretického pro popsání chemických a fyzikálních jevů s tímto dějem spojených. V současnosti jsou navrhovány hydraulická zařízení tak, aby přenos energie byl co největší a tím i největší účinnost stroje. Z tohoto důvodu probíhá provoz hydraulických zařízení v režimu s mírnou kavitací a se vznikem kavitačního opotřebení součástí. Tím je ovlivněna životnost i provoz zařízení. Kavitace se může objevit zejména u vodních turbín, čerpadel, lodních šroubů, torpéd, vodou chlazených spalovacích motorů, ale i v hydrodynamických ložiscích, hydrodynamických převodech, ozubených převodech, armaturách apod. [2].

1.1. Podstata kavitačního děje

Při kavitačním ději dochází k poruše souvislosti kapaliny o konstantní teplotě a vzniku malé kavitační bubliny. Je to způsobeno poklesem tlaku v dané oblasti kapaliny na hodnotu tzv. tlaku nasycených par. Velikost tlaku určuje růst i zánik kavitační bubliny. Pokud jeho hodnota zůstane stejná nebo i nadále klesá, bublina se zvětšuje. Pokud je kavitační bublina vytvořena v proudící kapalině, přesouvá se do oblasti vyššího tlaku než je tlak nasycených par, kde prudce kolabuje. V případě, že ke kolapsu bublin dojde v blízkosti obtékaného tělesa, nebo přímo na jeho povrchu, projeví se jeho opakované působení opotřebením povrchu nazývané kavitační eroze [2].

K poruchám souvislosti kapaliny dochází při překonání mezimolekulových kohezních sil, které charakterizují pevnost kapaliny. Pro vznik této nespojitosti tedy musí v některém místě dojít k odtržení molekul. Pevnost kapaliny je dána stupněm čistoty. Absolutně čistá voda má pevnost 1013 MPa. Skutečná kapalina obsahující různé mechanické částice, či příměsi v podobě nerozpuštěného plynu má pevnost dle výpočtů Zeldoviče 202 MPa. Experimentálně však byla zjištěna hodnota o mnoho nižší, než udává teoretický výpočet. Pohybuje se v řádu 10^4 až 10^6 Pa. Mechanické částice a plyny rozpuštěné v kapalině mají jen nepatrný vliv na snížení pevnosti kapaliny. Největší podíl na jejím poklesu mají nerozpuštěné plyny, které vytváří v kapalině tzv. kavitační jádra. Při určitých podmínkách kapaliny, dosáhnou tyto jádra své kritické velikosti a začnou se expanzivně zvětšovat, až jsou viditelné pouhým okem v podobě kavitačních bublin [2].

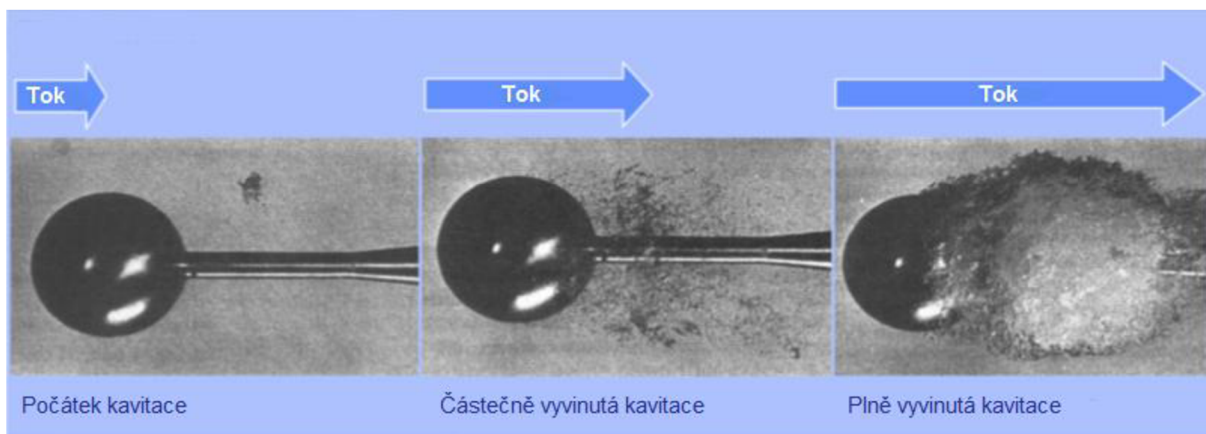


Graf 1: Životnost kavitační bubliny [2]

V grafu 1 je znázorněn vývoj kavitační bubliny v závislosti na čase. Bublina se v průběhu své životnosti třikrát zvětší a zmenší, než dojde k jejímu kolapsu. Při zvýšení tlaku na hodnotu tlaku nasycených par dochází k rychlému zmenšování bubliny, přičemž toto zmenšení proběhne za kratší dobu a po kratší dráze, než při jejím vývoji. Doba životnosti kavitační bubliny je přibližně $6 \cdot 10^{-3}$ s. Perioda cyklu a velikost bubliny se postupně zmenšují a dochází k tlumení procesu vývoje. Příčinou kmitavého zániku bubliny je zbytkový obsah vzduchu v kavitační bublině. Je to z toho důvodu, že se vzduch při stlačení chová jako pružina [2].

Pokud se kavitační bublina přemístí do oblasti vyššího tlaku, dojde k prudké kondenzaci par v ní obsažených a rychlému smrštění (implozi). Plyny částečně difundují do kapaliny.

Okolní kapalina vniká do takto uvolněného prostoru a stlačuje zbylý obsah plynu. Ve chvíli, kdy se střetnou stěny bubliny při její deformaci, vznikne tlaková vlna vyzařovaná směrem k povrchu obtékaného tělesa a k jeho narušení kavitační erozí. Vývoj kavitace vzniklé obtékáním koule proudem vody o rychlosti $c = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je znázorněn na obrázku 2. Počátek kavitace je znázorněn na obrázku vlevo, uprostřed je znázorněna částečně vyvinutá kavitace a plně vyvinutou kavitaci znázorňuje obrázek vpravo [2].



Obrázek 2: Obtékání koule kapalinou při rychlosti $c=6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [15]

1.2. Kavitační číslo

Aby bylo možné kavitaci a její vznik v hydraulických zařízeních posuzovat kvantitativně, zavedl se pojem kavitační číslo K . Při vzniku kavitace se předpokládá, že kavitační tlak je totožný s tlakem nasycených par. Ve skutečnosti je tento předpoklad pouze přibližný. Kavitační parametr je dán vztahem [2]:

$$K = \frac{2(p_1 - p_w)}{\rho c_1^2}, \quad (1.1)$$

kde:

c_1 je rychlost proudu kapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

p_1 je tlak v místě, kde proudění není ovlivněno obtékáním [Pa],

p_w je tlak nasycených par [Pa],

$\frac{1}{2} \rho c_1^2$ představuje dynamický tlak [Pa].

Ve chvíli, kdy vzniká první kavitační bublina má kavitační parametr hodnotu vyjádřenou pro počátek kavitace $K_{poč}$. Pro obtékání tělesa bez vzniku kavitace platí $K > K_{poč}$ a pro obtékání se vznikem kavitace $K < K_{poč}$. Každému stupni vývoje kavitace je přiřazena určitá hodnota kavitačního parametru K . Omezení maximálního průtoku je popsáno kritickým kavitačním parametrem K_{kr} . Kavitační parametr může být využit jako podobnostní číslo v případě kavitačního obtékání pevných těles různých tvarů (válec, koule, lopatková mříž apod.). Některé vlivy však způsobují odchylky od zákona podobnosti [2].

1.3. Vliv fyzikálních vlastností na kavitaci

Kavitace je sice způsobena poklesem tlaku, ale je také ovlivňována dalšími fyzikálními vlastnostmi. Mezi nejdůležitější vlastnosti, které nejvíce ovlivňují, jak její vznik, tak i průběh

Lze zařadit povrchové napětí, stlačitelnost vzniklé směsi, viskozitu, termodynamické vlivy a v neposlední řadě obsah plynu v kapalině [2].

1.3.1. Vliv povrchového napětí, viskozity a obsahu vzduchu

Ze vztahu 1.2 je patrné, že při zvýšení povrchového napětí σ , dochází k poklesu kavitačního tlaku. Z fyzikálního hlediska dochází při zvýšení povrchového napětí ke zpomalení růstu kavitační bubliny, ale naopak k urychlení jejího zániku. Při zvyšování počtu kavitačních bublin se současně snižuje pevnost kapaliny [2].

$$p_K = p_w + \left(p_{K0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B}, \quad (1.2)$$

kde:

p_K je tlak v kapalině obklopující bublinu [Pa],
 σ je povrchové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$],
 r_B je poloměr kulové bubliny [m].

Další důležitou vlastností je viskozita. Její vliv na kavitační jev není zcela objasněn. Teoretické poznatky poukazují na to, že růst kavitačních bublin ve viskózní kapalině je pomalejší, než v kapalině ideální. Z toho lze usuzovat, že s nižší viskozitou se zlepšují vlastnosti pro vznik kavitace. Některé experimentální pokusy však tyto poznatky vyvracejí. Výsledky z experimentálních pokusů několika autorů, kteří zkoumali vznik kavitace ve Venturiho dýze, poukazují na skutečnost, že kavitační parametr spjatý s počátkem kavitace roste s Reynoldsovým číslem, přičemž tato závislost platí pro hodnoty Reynoldsových čísel v rozsahu $1,5 \cdot 10^5 > Re < 6 \cdot 10^5$. Pro $Re < 1,5 \cdot 10^5$ se zvyšuje kavitační parametr v dýze s klesajícím Re . Závislost má tedy minimum při $Re < 1,5 \cdot 10^5$. Při obtékání válcového tělesa se kavitační parametr počátku kavitace zvyšuje s rostoucím Re [2].

Tyto rozporuplné názory mohou být důsledkem například jednoho z následujících vlivů. Při zvýšení viskozity kapaliny a zachování hodnoty Re se nuceně zvýší rychlost. Tím se sníží doba setrvání některých kavitačních jader v oblasti nízkého tlaku na hodnotu nedostatečnou pro jejich expanzi. Zvýšením viskozity se ale naopak zvýší tlaková ztráta ve zužující se části dýzy a tím dojde ke zhoršení kavitačních vlastností dýzy (snížení tlaku v kavitační oblasti) [2].

Významný vliv na průběh kavitace má obsah nerozpuštěného vzduchu v kapalině. Ten je posuzován opět v souvislosti se vztahem 1.2. S přítomností větších kavitačních jader se kavitační tlak zvětšuje. Expanzivní růst bubliny může tedy nastat i při $p_{kr} > p_w$. Kavítace tak vzniká snadněji. S větším obsahem vzduchu v kapalině roste kavitační parametr pro počátek kavitace K_{poc} . Pokud se v okolí bubliny mění tlak pomalu, může dojít ke značnému růstu bubliny. Tento růst je způsoben difúzí plynu z okolní kapaliny do bubliny. Podmínka difúze se vyjadřuje vztahem:

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} > 1, \quad (1.3)$$

kde:

α je poměr objemu vzduchu k objemu kapaliny [-],
 α_n je poměr objemu vzduchu rozpuštěného v kapalině při nasyceném stavu k objemu kapaliny [-].

K difúzi tedy dochází v kapalině přesycené vzduchem [2].

Volný nerozpuštěný vzduch tvoří v kapalině dvoufázovou směs, která se chová jako stlačitelné prostředí. Vytvořená směs je stlačitelnější než jakákoliv složka směsi. V důsledku větší stlačitelnosti se snižuje rychlost zvuku $a_s = \sqrt{dp/d\rho}$. Už i malé množství nerozpuštěné plynné složky v kapalině způsobí rapidní pokles rychlosti zvuku [2].

Minimální rychlost zvuku pro případ směsi vody a páry je dán přibližným vztahem:

$$a_{s \min} \cong \frac{r\rho_p}{\rho_K\sqrt{Tc_K}}, \quad (1.4)$$

kde:

r je poloměr [m],

c_K je měrná tepelná kapacita kapaliny [Pa],

ρ_p je hustota plynné složky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

ρ_K je hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

$\frac{dc}{dt}$ je zrychlení proudu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

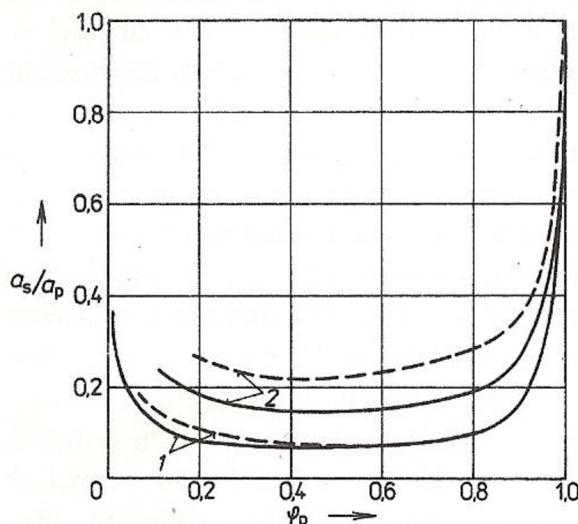
Pro směs vody a vzduchu přibližným vztahem:

$$a_{s \min} \cong 2a_p\sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_K}}, \quad (1.5)$$

kde:

a_p je rychlost zvuku v plynné složce [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Minimálních hodnot je dosaženo při poměru objemů $\varphi_p = V_p/(V_K + V_p) = 0,5$, kde V_p je objem plynné složky a V_K je objem kapaliny [2].



Graf 2: Poměrná rychlost zvuku směsi v závislosti na poměrném obsahu plynu ve vodě (1: voda-vzduch; 2: voda-pára) [2]

V grafu 2 je vyobrazena závislost poměrné rychlosti zvuku ve směsi na objemovém poměru obsahu plynu. Označení a_s představuje rychlost zvuku ve směsi, označení a_p rychlost zvuku v plynné složce. Čárkovanou čarou jsou vykresleny experimentální hodnoty a plnou čarou hodnoty teoretické [2].

1.3.2. Vliv teploty kapaliny

Bylo experimentálně prokázáno, že vlivem termodynamických účinků kapaliny na kavitaci se kavitační vlastnosti zhoršují s vyšší teplotou [2].

Za kavitační tlak se považuje tlak sytých par p_w při určité teplotě kapaliny v okolí kavitací postižené oblasti. Při kavitaci dochází k vypařování, proto je nutné do kavitační oblasti dodat teplo, aby se mohl tento děj uskutečnit. Teplo se přivádí právě z okolí kavitační oblasti. To znamená, že mezi kavitační oblastí a kapalinou, která bezprostředně obklopuje tuto oblast, musí vzniknout teplotní spád ΔT . Teplota v obklopující kapalině bude tedy vyšší, než teplota uvnitř oblasti. Tím dojde ke snížení tlaku sytých par, resp. kavitačního tlaku p_{kav} uvnitř oblasti v porovnání s p_w v okolí o hodnotu $\Delta p = p_w - p_{kav}$ [2].

Pro vyjádření termodynamického vlivu na kavitaci bylo zavedeno termodynamické kritérium, občas označováno jako index kavitace [2]:

$$B = \frac{V_w}{V_K} = \frac{v_w}{v_K} \cdot x, \quad (1.6)$$

kde:

x je poměr hmotnosti páry a kapaliny [-],
 V_w je objem páry [m^3].

Tabulka 1: Snížení teploty a tlaku v kavitační oblasti při $B=10$ [2]

t (°C)	21	40	82	100	121	149
ΔT (K)	0,1	0,3	1,74	3,17	6,07	12,62
Δp (Pa)	16,3	112	3600	11130	39200	145369

Z tabulky 1 je patrné, že se zvyšující se teplotou vody dochází k rychlému nárůstu rozdílů tlaků i teplot, přičemž termodynamický vliv v chladné vodě je zanedbatelně malý. Při stejně vyvinuté kavitaci a vyšší teplotě vody se tlak v okolí kavitační oblasti sníží pod hodnotu příslušného napětí par p_w o tlakový rozdíl Δp . Velikost hodnoty Δp tedy popisuje zlepšení kavitačních vlastností. Pro studenou vodu je tedy použit předpoklad $p_w = p_{kav}$, kdežto pro horkou vodu tento předpoklad neplatí a je dáno $p_w > p_{kav}$ [2].

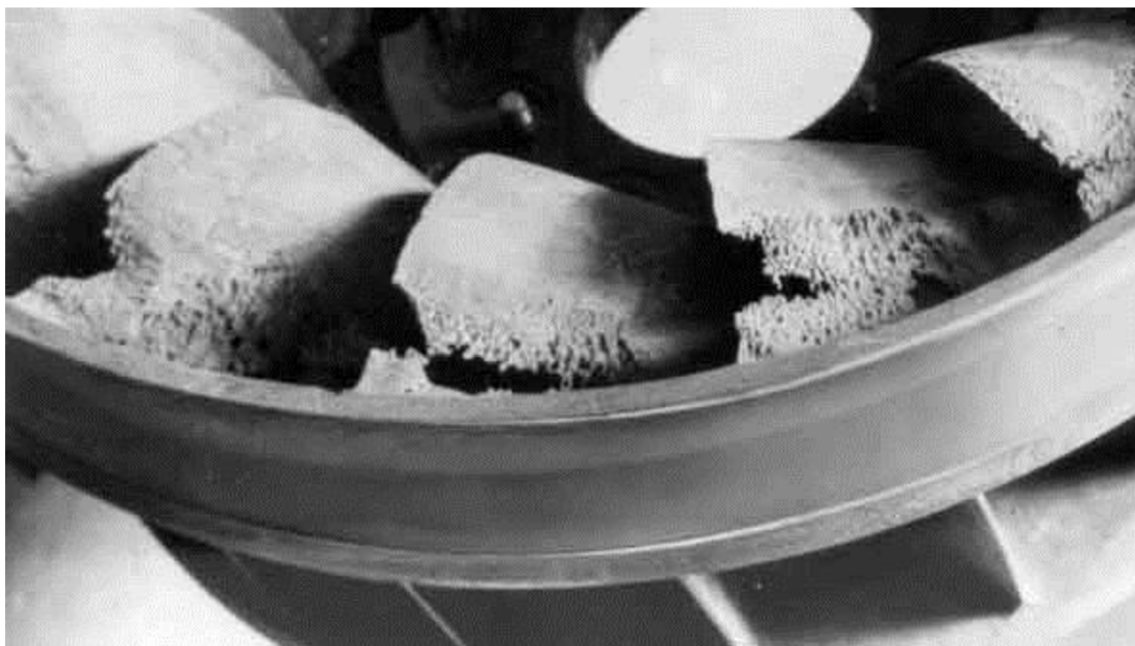
Existují i další studie, jak teoretické, tak i experimentální, které popisují vliv teploty na kavitační proces daleko přesněji. Autoři Holl, Weir a Billet popisují teplotní rozdíl následujícím vztahem:

$$\Delta T = \frac{c_w \cdot Pe \cdot r \cdot v_K}{c_A \cdot Nu \cdot c_K \cdot v_w}. \quad (1.7)$$

Předpokládá se, že Pecletovo číslo je možné určit z volného proudu, zatímco Nusseltovo číslo a součinitelé c_A a c_w charakterizují kavitační proudění a jejich určení se provádí empiricky [2].

2. Kavitační opotřebení

Jedním z následků působení kavitace je degradace povrchů pevných těles, které jsou v přímém kontaktu s kapalinou. Tento důsledek se také označuje jako kavitační eroze [1]. Jedná se o proces, při kterém dochází ke kolapsu kavitačních bublin. Pokud k tomuto kolapsu dojde v dostatečně malé vzdálenosti od povrchu pevného tělesa, dojde ke vzniku lokalizovaného a přechodného napětí na obtékaném povrchu v důsledku otřesů o vysoké amplitudě. Vysoká opakovatelnost tohoto procesu, kdy zaniká velké množství kavitačních bublin, má za následek vznik lokální plastické deformace povrchových vrstev materiálu a následné únavové poškození [5]. Iz tohoto důvodu se kavitace zpravidla označuje za nežádoucí jev, který nepříznivě ovlivňuje provoz příslušných zařízení a je pro ně velmi nebezpečný. Jedná se nejen o různé typy vodních turbín, lodních šroubů či čerpadel, kde se může kavitační opotřebení projevit už jen nevhodnými podmínkami provozu, ale také o armatury, potrubí, různá regulační, uzavírací a měřící zařízení apod. [1].



Obrázek 3: Kavitační opotřebení lopatek Francisovy turbíny [16]

Kavitační opotřebení se může projevit odlišnou velikostí, tvarem a na různých místech povrchu pevného tělesa [1]. Na rozdíl od eroze vzniklé proudem velkých částic, která se projeví poškrábáním povrchu, má kavitační opotřebení krystalický a zubatý vzhled únavové poruchy [5]. Změnou kavitačních podmínek může dojít k přesunu nebo změně tvaru kavitačního opotřebení. V důsledku těchto intenzivních jevů konstruktéři v minulosti navrhovali hydraulické stroje, tak aby kavitace vůbec nevznikala. To ovšem značně omezovalo samotný návrh např. z hlediska efektivního využití vlastností konstrukčních materiálů apod. Současné konstrukční materiály jsou už odolnější, a proto se při návrhu hydraulických zařízení připouští působení kavitačního jevu o dovolené intenzitě, která se posuzuje především z hlediska ekonomického [1].

Kavitace ale může být i užitečná a jejich účinků se dá využít ke konání práce. Využívá se v některých aplikacích k technologickým účelům, jako je např. čištění součástí složitých

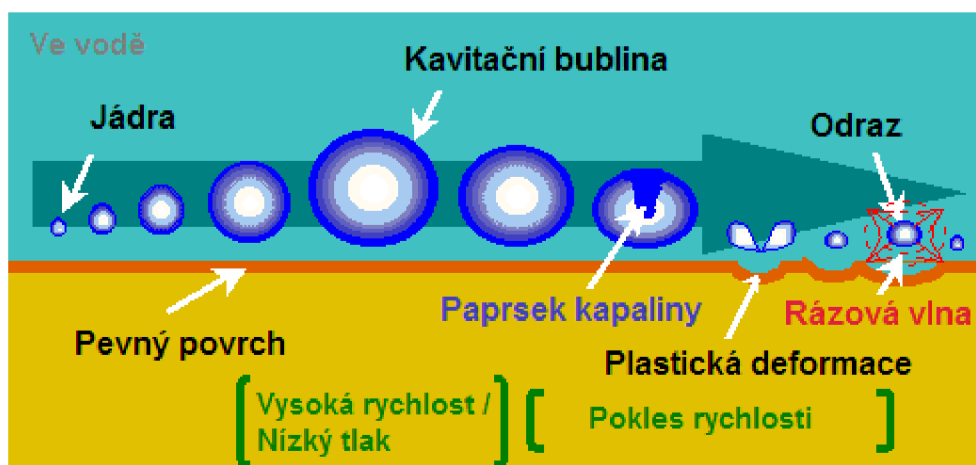
tvarů prostřednictvím akustické kavitace, odstraňování okují a nečistot z povrchů pevných těles v hutnických provozech, vytváření různých roztoků, emulzí či suspenzí apod. V těchto aplikacích se projevuje naopak snaha o co největší intenzitu kavitace resp. kavitační eroze. Kapalina, která se využívá k těmto účelům, je převážně voda. Je to z toho důvodu, že voda je nejdostupnější kapalinou ze všech. Kavitační eroze nevzniká jen ve vodě, ale i v jiných kapalinách a opotřebení kavitační erozí lze pozorovat prakticky u všech typů materiálů pevných těles, tvrdých i měkkých, křehkých i pružných, inertních i chemicky aktivních, cementu, plastických hmot, skla a jiných nekovových pevných materiálů [1].

2.1. Mechanismy kavitačního opotřebení

Se zvyšováním rychloběžnosti hydraulických strojů a tím i negativních důsledků kavitačního jevu se zájem o kavitační opotřebení rychle zvyšoval. Teoretické studie Rayleigha vysvětlovaly kavitační opotřebení jako důsledek čistě mechanického působení. Později se objevila řada dalších teorií, které popisovaly jako hlavní příčinu působení chemických a elektrických dějů. Tím, že byla snaha popsat kavitační opotřebení pouze jediným faktorem, docházelo k řadě omylů a protichůdných závěrů [1].

V prvních teoriích byl mechanismus kavitační eroze popsán jako otěr, vyvolaný rychle proudící kapalinou podél povrchu pevného tělesa prostřednictvím pevných částic obsažených v kapalině. Do určité míry je to správná myšlenka, neboť kapalina, která vůbec neobsahuje pevné částice, neexistuje. Tyto drobné částice skutečně způsobují určité opotřebení při obtékání povrchu kapalinou [1].

Při kavitační erozi dochází ke koncentraci mechanické energie na velice malou část povrchu pevného tělesa, která je doprovázena zánikem parních bublin. V důsledku této koncentrace energie dochází k vysokým napětím, které často překročí dovolené meze materiálu, mezi které patří mez pevnosti, kluzu či únavy. Reakce materiálu z hlediska mechaniky kontinua, metalurgie a mechaniky tuhých těles na kavitační „bombardování“ od kolapsů mnoha parních bublin je hlavním faktorem kavitační eroze [3].



Obrázek 4: Mechanismy kavitačního opotřebení [17]

Teorie, která přisuzuje hlavní podíl při kavitační erozi výhradně mechanickému působení kapaliny, není jednotná ve vysvětlení mechanismu. Je to z toho důvodu, že existují dva různé druhy mechanismu popisující toto působení. První mechanismus kavitační eroze je definován jako náraz divergentní tlakové vlny vyvolané kolabující bublinou. Druhý mechanismus vzniká při kolapsu nesymetrickém a je popsán jako náraz paprsku kapaliny na

pevnou stěnu vysokou rychlostí. Při vyšších hodnotách kavitačního čísla převažuje mechanismus paprsku kapaliny a při hodnotách nízkých tlaková vlna. Rozhraní mezi kapalinou a kolabující bublinou je velmi nestabilní. I malá změna původně kulového tvaru kolabující bubliny může mít za následek vznik paprsku kapaliny. Kavitační bubliny, které kolabují v blízkosti nebo přímo na povrchu pevného tělesa, popřípadě v kapalině obsahující lokální tlakové gradienty, jsou náchylnější na vznik paprsku kapaliny více, než kolabující bubliny v kapalině bez tlakových gradientů [1].

2.1.1. Náraz divergentní kulové tlakové vlny

Pokud dojde k symetrickému kolapsu bubliny v blízkosti povrchu pevného tělesa, dojde ke vzniku tlakové vlny, která o vysoké intenzitě způsobí rozrušení povrchu [1]. Je prokázáno, že závěr symetrického kolapsu je doprovázen vysokými hodnotami tlaku a teploty uvnitř kavitační bubliny. Tlaková vlna působí v okolí středu bubliny řádově jednu mikrosekundu. V závislosti na poloměru kolabující bubliny se snižuje amplituda vlny, přibližně s $1/r$. Fujikawa a Akamatsu provedli měření pro určení velikosti tlaku. V okamžiku, kdy tlaková vlna narazila na povrch snímače, byl naměřen tlak řádově 100 MPa [3].

2.1.2. Náraz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny

Jedni z prvních, kdo zpozoroval nesymetrický tvar kolapsu bubliny, byli Suvarov a Kornfeld. Při tomto kolapsu dojde k promáčknutí bubliny okolní kapalinou, která proudí vysokou rychlostí dovnitř bubliny a v podobě tenkého paprsku narazí do povrchu pevného tělesa [1]. Velmi vysoká rychlost nárazu paprsku kapaliny do druhé strany bubliny, způsobí vznik rázové vlny a vysoce lokalizované rázové zatížení povrchu [5]. Pokud je kavitační bublina zpočátku v kontaktu s povrchem, bude mít paprsek kapaliny průměr přibližně o velikosti 10 % původního průměru bubliny. V tomto případě je rychlost paprsku kapaliny dostačující k rozrušení obtékaného povrchu. Pokud ale dojde k nesymetrickému kolapsu dál od povrchu, účinek paprsku bude snížen [10]. Hodnota rychlosti paprsku kapaliny v okamžiku těsně před nárazem je odhadována řádově $V_j = 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nárůst tlaku způsobený nárazem paprsku kapaliny je přibližně určen Žukovského vztahem [3]:

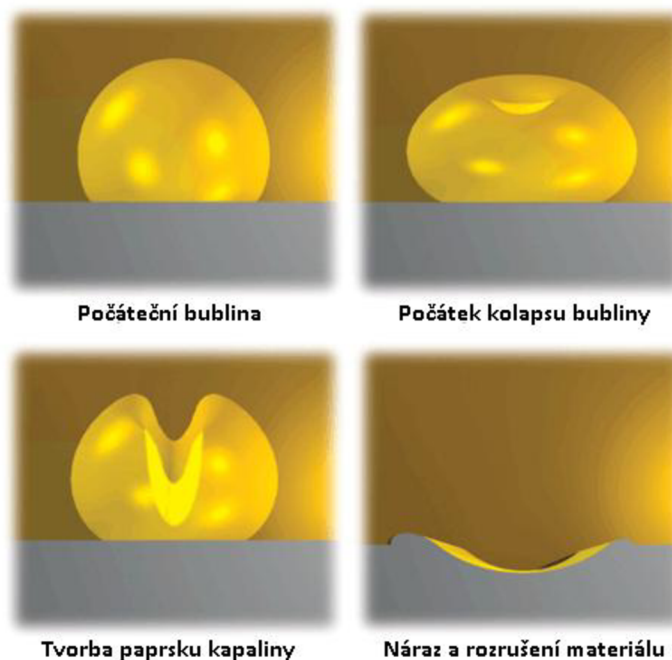
$$\Delta p = \rho a V_j, \quad (3.8)$$

kde:

a je rychlost zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Hodnota nárůstu tlaku pro vodu je přibližně $\Delta p = 150 \text{ MPa}$. V porovnání s tlakovou vlnou prvního mechanismu je tedy řádově stejná. Doba působení tlakového pulzu je závislá na průměru paprsku d_p a je určena vztahem [3]:

$$t = \frac{d_p}{2a}. \quad (3.10)$$



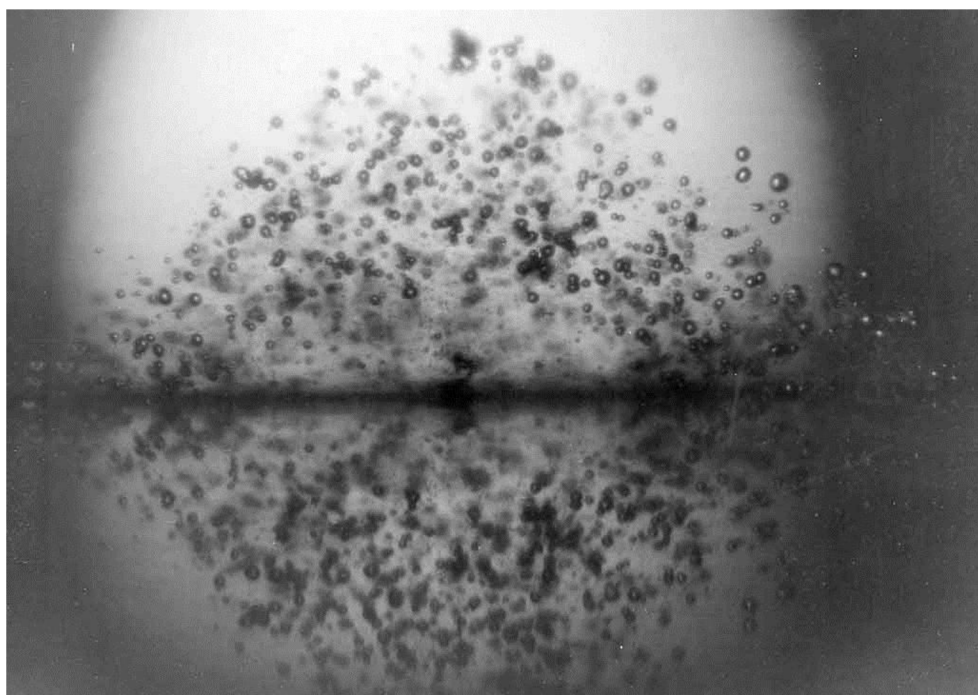
Obrázek 5: Vývoj paprsku kapaliny [18]

Paprsek kapaliny, vzniklý při kolapsu bubliny o počátečním průměru 1 mm, má průměr přibližně 0,1 mm. Doba působení tlakového pulzu této bubliny je velice krátká, tj. zhruba 0,03 μ s [3].

Oba mechanismy kavitační eroze, tj. náraz rychle se pohybujícího paprsku kapaliny a náraz divergentní kulové tlakové vlny vyvolávají vysokotlaké pulsy o hodnotě řádově odpovídající mezi kluzu běžně používaných kovů. Doba působení tlakových pulsů obou mechanismů je velmi krátká, tedy i energie kapalného stavu do stavu pevného se předává velice dobře a vyžaduje jen minimální dobu. Toto časové období je však závislé na velikosti kolabující bubliny a to tak, že se zvětšujícím se počátečním průměrem bubliny se doba působení prodlužuje [3].

2.1.3. Hromadný kolaps

Hromadný kolaps není čistě mechanismus kavitační eroze, ale na kavitační opotřebení má značný vliv. Jeho účinky se projevují při kolapsu celého mračka bublin, kdy kolaps jedné bubliny iniciuje kolaps bublin okolních. Hromadný kolaps je viditelný při oscilaci vzorku v kapalině například ve vibračních zařízeních, kde se vytváří velké množství bublin, které následně kolabují blízko oscilujícího vzorku. Další případ hromadného kolapsu můžeme pozorovat při nesymetrickém kolapsu jediné bubliny. V tomto případě paprsek kapaliny prorazí bublinu a dojde k vytvoření parního prstence, který je často velmi nestabilní a rozpadá se na několik menších bublin. Ty následně projdou hromadným kolapsem [3].



Obrázek 6: Oblak kavitačních bublin [19]

Mezi typické vlastnosti hromadného kolapsu patří kaskádový efekt zhroucení. Kolaps a odraz jedné bubliny ovlivňuje bubliny sousední. Vybuzená tlaková vlna zvyšuje rychlost rozpadu okolních bublin, tedy i amplitudu vlastní tlakové vlny [3]. Hromadný kolaps začíná na okraji mračka bublin v závislosti na hydrostatickém tlaku v okolní kapalině. Zhroucení vnějších bublin vytváří pole o velkém tlaku kolem zbývající části mračka. Dochází k vyzařování energie směrem dovnitř mračka, který způsobí kolaps bublin okolních [11]. Periodický rozpad při kolapsu mračka bublin zkoumal Brennen, Reisman a Wang. V závislosti na vlastnostech mračka bylo prokázáno, že vzniklá tlaková vlna, která směřuje dovnitř mračka, nabývá na své síle v blízkosti středu a tím zvyšuje pravděpodobnost vzniku eroze [3].

Existuje i teorie, která popisuje hromadný kolaps jako synchronní zhroucení celého mračka bublin za vzniku jedné jediné rázové vlny o velké intenzitě. Toto tvrzení je velice sporné, neboť i zlomek malého množství bublin, u kterých nedojde ke kolapsu, způsobí velký pokles intenzity vzniklé rázové vlny. Tato teorie byla vyvrácena i při experimentech Bruntona v roce 1979, který dokázal, že ke vzniku jedné jediné intenzivní vlny při hromadném kolapsu nedochází [11].

2.1.4. Kavituující víry

Kavituující víry vznikají při smykových tocích, např. prouděním z trysky ponořené v kapalině, nebo také na zadní straně kavitační bubliny, kde může dojít k uvolnění vírové struktury. Tento jev má největší vliv na vznik kavitační eroze v hydraulických strojích [3].

Bylo provedeno několik testů příslušných zařízení, které byly opakovaně vystaveny působení axiálního kolapsu kavituujících vírů. Tyto víry byly vytvářeny pomocí speciálního vírového generátoru. V tomto zařízení se může generovat axiální zhroucení o rychlosti vyšší než $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ tak, aby hodnota napětí řádově odpovídala napětí vzniklému při působení obou mechanismů kavitační eroze, tj. paprsku kapalinou či nárazu tlakové vlny. Kavituující víry mají

vysoce erozivní potenciál, který je dán především vznikem mračna bublin při konci axiálního zhroucení, kde může dojít ke kaskádovému efektu, ale také poměrně dlouhou dobou působení zatížení, které se řádově pohybuje v desítkách mikrosekund [3].

Tabulka 2: Přehled mechanických zatížení mechanismů kavitačního opotřebení [3]

Mechanismy kavitačního opotřebení	Mechanické působení	Tlakové zatížení (MPa)	Doba trvání (μ s)
Symetrický kolaps bubliny	Tlaková vlna	100	1
Paprsek kapaliny (pro bublinu o průměru 1 mm)	Náraz paprsku	150	0,03
Hromadný kolaps	Tlaková vlna	$\gg 100$	$\gg 1$
Kavitační víry	Náraz paprsku	> 150	> 10

2.1. Intenzita kavitačního opotřebení

Velikost poklesu tlaku pod hodnotu tlaku nasycených par určuje množství kavitačních bublin a velikost kavitační oblasti. Čím větší pokles tlaku je, tím rozlehlejší je tato oblast a větší počet kavitačních bublin. Intenzita kavitačního opotřebení ale není závislá jen na poklesu tlaku. Nemůžeme říci, že čím nižší tlak v proudící kapalině bude, tím větší bude intenzita kavitačního opotřebení. Skutečnost je totiž podstatně složitější [1].

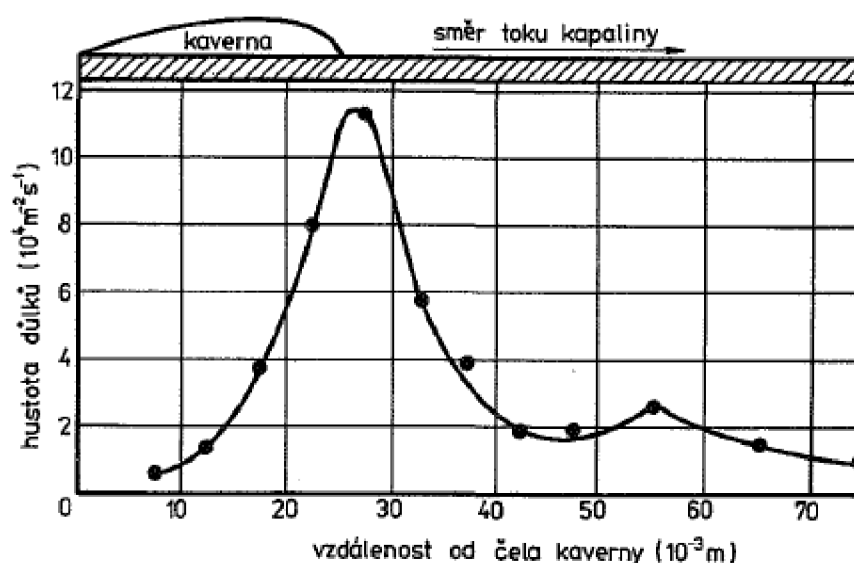
Jak už bylo popsáno, kavitační opotřebení je způsobeno působením dvou mechanismů, tj. nárazem divergentní kulové tlakové vlny a nárazem rychle se pohybujícího paprsku kapaliny. Intenzita kavitačního opotřebení závisí na intenzitě těchto mechanismů, tj. na energii tlakové vlny při symetrickém kolapsu a rychlosti nárazu paprsku kapaliny při kolapsu nesymetrickém. Tyto veličiny závisí na tlaku v okolí kolabující bubliny, čím větší tlak v okolí bude, tím větší budou hodnoty těchto veličin. Zvýšení tlaku ale naopak způsobuje snížení množství kavitačních bublin a velikosti kavitační oblasti. Podle těchto poznatků tedy bude intenzita kavitačního opotřebení největší při hodnotě tlaku v proudící kapalině, kdy vliv veličin popisujících intenzitu mechanismů kavitační eroze a vliv počtu kolabujících bublin na kavitační erozi bude co největší [1].

Oblast kavitačního opotřebení povrchu se objevuje v zadní části kavitační oblasti, ve směru proudění kapaliny. Toto tvrzení bylo experimentálně prokázáno. Velkou zásluhu na objasnění kavitační eroze má Knapp. Ten prováděl experimentální pokusy založené na obtékání rotačního tělesa kapalinou. Pro vyhodnocení svých experimentů využíval snímků z vysokorychlostních kamer. Díky nim byl schopen podrobně popsat a vyobrazit rozvoj kavitačního jevu z hlediska časového i prostorového [1].

Po vyhodnocení snímků, přišel Knapp na skutečnost, že na povrchu obtékaného tělesa se opakovaně vytváří tzv. kaverny, které po čase kolabují. Kaverna je kavitační bublina relativně velkých rozměrů, vzniklá v blízkosti povrchu obtékaného tělesa. Ze snímků je také patrné, že rozhraní mezi kavernou a kapalinou je průhledné. To je způsobeno jejich periodickým tvořením. Před kavernou dochází k tvorbě malých bublinek, které se pohybují

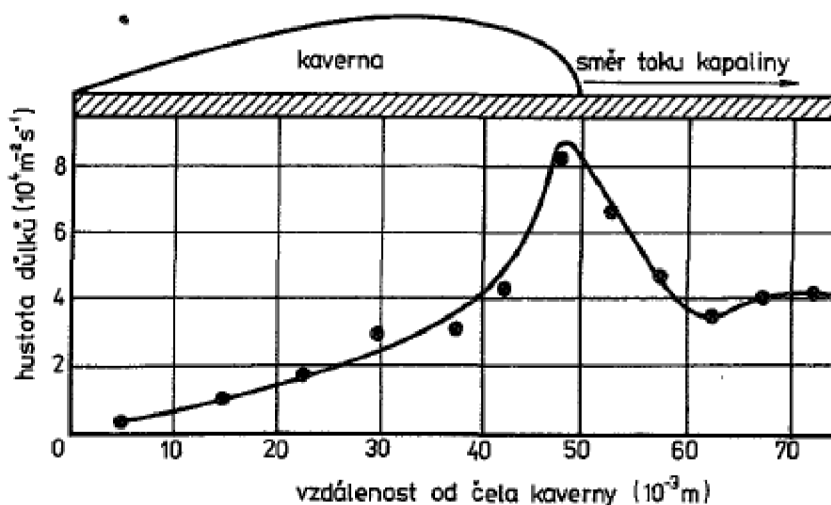
podél rozhraní k zadní části kaverny, kde kolabují. Tyto malé bublinky dosáhnou za velmi krátký časový úsek téměř maximální velikosti. Po dosažení této velikosti se jejich růst značně zpomalí a své maximální velikosti dosáhnou za dobu několikrát delší [1].

V grafu 3 a 4 je znázorněna závislost hustoty důlků na vzdálenosti od čela kaverny dvou rozdílných velikostí kaveren. Jak je vidět, největší hustota důlků se nachází při konci kaverny ve směru proudu kapaliny, tedy i intenzita kavitační eroze je v tomto místě největší. Toto místo znázorňuje první extrém grafu. V obou grafech existuje ještě jeden extrém, který se nachází ve směru proudu kapaliny. Z porovnání závislostí obou kaveren je patrné, že hustota důlků na konci delší kaverny je o něco menší. Z toho vyplývá, že prodloužením kaverny se sníží maximální hustota důlků při konci kaverny, naopak ale vzroste hustota důlků za zadní částí kaverny [1].



Graf 3: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 25,4 mm [1]

Prodloužení kaverny bylo docíleno snižováním tlaku před prostorem pracovního tunelu. Jednotlivá měření probíhala za konstantní rychlosti. Při obou velikostech kaverny, se na jejím rozhraní s kapalinou pohybovalo přibližně stejné množství kavitačních bublinek, přičemž nárůst důlků na povrchu tělesa za sekundu nebyl závislý na délce kaverny. Z toho vyplývá, že prodloužení kaverny pouze snižováním tlaku nemá vliv na velikost intenzity kavitačního opotřebení. Množství bublin, které se za jednotku času vytvoří na rozhraní kaverny s kapalinou, je závislé především na vlastnostech kavitačních jader a rychlosti proudící kapaliny [1].



Graf 4: Rozdělení důlků podél povrchu hliníkového vzorku obtékaného kapalinou pro kavernu délky 50,8 mm [1]

Po přezkoumání vzorku se zjistilo, že důlků o větší velikosti je vzhledem k oblasti rozrušení více ve směru proudu kapaliny než v protisměru. Z porovnání rozrušení povrchu vzorků pro případ obou velikostí kaveren se zjistilo, že více větších důlků vzniklo při působení kaverny větší. Objem kavitační bubliny roste při pohybu podél rozhraní kaverny, pokud tedy má kaverna rozhraní delší, kavitační bublina má více času na růst a proto dojde ke kolapsu více větších bublin. Z toho důvodu je intenzita větší pro případ delší kaverny [1].

Po provedení tohoto experimentu byl zaveden pojem intenzita kavitačního opotřebení I [$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]. Ta je dána frekvencí vytváření důlků na povrchu tělesa o jednotkové velikosti. Druhý extrém v grafech 3 a 4 naznačuje, že při kolapsu dojde k rozpadnutí bublin na bubliny malé, které následně kolabují dál po proudu. Pokud dojde ke zvětšení kaverny do velikosti, která bude přesahovat obtékaný povrch, dojde k tzv. superkavitačnímu proudění. Opotřebení, vzniklé i při značně vyvinuté kavitaci tohoto typu, je zanedbatelně malé [1].

2.2. Úbytek hmotnosti materiálu

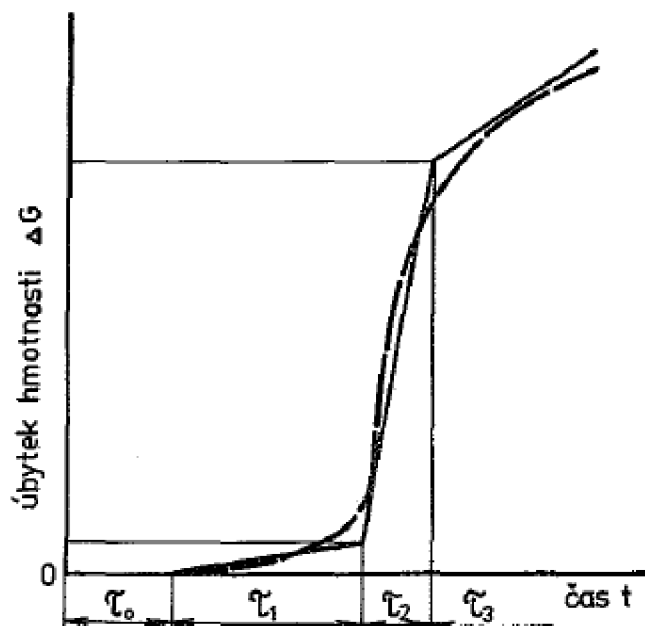
V grafu 5 je vyobrazena závislost úbytku materiálu pevného tělesa ΔG na době působení kavitace t . Tato závislost nám dává prvotní informace o materiálu, resp. chování materiálu při kavitační erozi. Křivka se rozděluje do několika časových intervalů [1].

Zpočátku kavitace nedochází ke znatelnému úbytku hmotnosti u většiny materiálů. Je to z toho důvodu, že vzniklá mechanická energie se převážně přemění na vznik plastické deformace povrchové vrstvy. Tento časový interval se označuje jako tzv. inkubační doba τ_0 . Dále následuje časový interval τ_1 , při kterém dochází k výraznému nárůstu rychlosti úbytku hmotnosti materiálu $d(\Delta G)/dt$ v závislosti na čase. Tyto první dva časové intervaly charakterizují odolnost materiálu vůči kavitační erozi. Čím pomalejší bude nárůst rychlosti úbytku materiálu v časovém intervalu τ_1 a čím delší bude inkubační doba τ_0 , tím odolnější je materiál vůči kavitačnímu opotřebení [1].

Ve třetím časovém intervalu τ_2 dosáhne rychlost úbytku hmotnosti materiálu své maximální hodnoty a nadále zůstává téměř konstantní. V okamžiku, kdy je opotřebení tělesa velmi rozsáhlé a hmotnost úbytku materiálu markantní, dostává se křivka do posledního

časového intervalu τ_3 , kde dochází k poklesu rychlosti úbytku materiálu v závislosti na čase [1].

Délka inkubační doby, resp. úplný časový průběh kavitačního opotřebení závisí nejen na vlastnostech degradovaného materiálu, ale i na obsahu plynné složky v kapalině, teplotě a tlaku kapaliny a rychlosti proudění kapaliny [1].



Graf 5: Závislost úbytku hmotnosti ΔG na čase t při kavitačním rozrušení [1]

3. Modelování kavitace

Pokud klesne tlak v kapalině o konstantní teplotě pod určitou hodnotu, začnou v kapalině vznikat bublinky vyplněné sytou parou. Při výpočtu proudění v programu Fluent s uvažováním možnosti vzniku kavitace se tedy využívá vícefázového modelu proudění. Fluent tedy řeší kromě rovnic vycházejících z použitého modelu turbulence i transportní rovnice popisující transformaci kapaliny na páru. Tato transformace je popsána kavitačními modely. Ve Fluentu jsou implementovány tři kavitační modely popisující růst parní bubliny v kapalině. Všechny tři modely vycházejí z Rayleigh-Plessetovy rovnice. Pro možnost výběru kavitačního modelu se nejdříve musí zvolit vícefázový model [4].

3.1. Vícefázový model směsi (tzv. mixture model)

Jedná se o zjednodušený vícefázový model. Může být aplikován pro případ vícefázového proudění, kdy se fáze pohybují rozdílnou rychlostí, ale v krátkém prostorovém měřítku jsou v rovnovážném stavu. Mezi fázemi je vytvořena velmi silná vazba. Tento model se dá použít také pro případ homogenního vícefázového proudění fází, které mají rychlost stejnou. Vazba mezi fázemi je v tomto případě také velmi silná. Mixture model může být využit i k modelování proudění neneutonských kapalin [4].

Při řešení model řeší hned několik rovnic. Jedná se o rovnici kontinuity a hybnostní rovnici směsi, rovnici objemového zlomku sekundárních fází a rovnici pro relativní rychlosti. Mixture model umožňuje řešení proudění n fází kapalných nebo v podobě částic. Umožňuje také řešení prolínání fází. Fáze se pohybují rozdílnou rychlostí, přičemž se využívá koncepce slip rychlostí. Typickými případy použití jsou cyklóny, proudění bublin s malým objemovým zlomkem či sedimentace. Rovnice kontinuity směsi je vyjádřena vztahem [4]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m v_{m,j}}{\partial x_j} = 0, \quad 3.1$$

kde:

$v_{m,j}$ jsou zprůměrované složky rychlosti podle hmotnosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]:

$$v_{m,j} = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{k,j}}{\rho_m}, \quad 3.2$$

ρ_m je hustota směsi [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k, \quad 3.3$$

kde:

α_k je objemový podíl fáze k [-].

Rovnice vyjadřující zákon zachování hybnosti pro směs je dána součtem rovnic zachování hybnosti jednotlivých fází [9]:

$$\frac{\partial (\rho_m v_{m,i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m v_{m,i} v_{m,j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_m \left(\frac{\partial v_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{m,j}}{\partial x_i} \right) - \mu \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial v_{m,l}}{\partial x_l} \right) + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k,i} v_{dr,k,j}, \quad 3.4$$

kde:

f_i jsou složky vnějších hmotnostních sil [N],
 $v_{dr,k,i}$ je složka unášivé rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]:

$$v_{dr,k,i} = v_{k,i} - v_{m,i}, \quad 3.5$$

μ_m je dynamická viskozita směsi [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k. \quad 3.6$$

Relativní (slip) rychlost je definována jako rozdíl rychlosti sekundární fáze p a primární fáze q [9]:

$$v_{p,q,i} = v_{p,i} - v_{q,i}, \quad 3.7$$

Jestliže hmotnostní zlomek fáze k je definován vztahem:

$$Y_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m}, \quad 3.8$$

pak vztah mezi slip rychlostí a rychlostí unášivou je vyjádřen [9]:

$$v_{dr,p,i} = v_{p,q,i} - \sum_{k=1}^n Y_k v_{k,q,i}. \quad 3.9$$

Rovnice pro určení objemového vzorku sekundární fáze je definována vztahem [9]:

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p v_{m,j}) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p v_{dr,p,j}) + \sum_{k=1}^n (Q_{m,qp} - Q_{m,pq}). \quad 3.10$$

3.2. Rayleigh-Plessetova rovnice

Ve všech kapalinách jsou obsaženy parní nebo plynové bubliny také označované jako jádra, ze kterých následně dochází ke vzniku kavitace. Růst a kolaps bublin je důležitým faktorem při kavitačním jevu. Pro popsání kavitačního jádra se uvažuje, že jádro je bublina kulového tvaru o poloměru $R_B(t)$ v nekonečně rozlehlé oblasti kapaliny. Tlak v kapalině je známá veličina a označuje se $p_\infty(t)$. Předpokládá se konstantní teplota kapaliny $T_\infty(t)$, stejně jako fyzikální vlastnosti kapaliny [4].

Dynamiku bubliny je možné popsat Rayleigh-Plessetovou rovnicí. Obecný tvar Rayleigh-Plessetovy rovnice, vyjadřující velikost bubliny a tlak závislý na čase, je odvozen z rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice ve tvaru [4]:

$$\frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho_k} = R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_k}{R_B} \frac{dR_B}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_k R_B}, \quad 3.11$$

kde:

$p_\infty(t)$ je tlak v okolí bubliny [Pa],
 $p_B(t)$ je tlak uvnitř bubliny [Pa],
 σ je povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
 ν_k je kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$],

ρ_k je hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Poloměr bubliny $R_B(t)$ se dá vyjádřit z této rovnice za předpokladu, že známe tlak kapaliny $p_\infty(t)$. Tlak uvnitř bubliny vychází z polytropického zákona pro ideální plyn [7]:

$$p_{B(t)} = p_{va} + p_g \left(\frac{R_0}{R_B}\right)^{3n}, \quad 3.12$$

kde:

p_g je parciální tlak uvnitř kavitačního jádra [Pa],

p_{va} je tlak nasycených par [Pa],

n je polytropický exponent [-].

Pro odhad velikosti bublin za rovnovážného stavu bylo zavedeno zjednodušení Rayleigh-Plessetovy rovnice zanedbáním viskózního členu a členu povrchového napětí. Rovnice má pak tvar [4]:

$$\frac{p_{B(t)} - p_{\infty(t)}}{\rho_k} = R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt}\right)^2. \quad 3.13$$

Zjednodušení, uvedené v rovnici 3.13, je stále příliš složité k použití do vícefázového proudění, proto se v programu Fluent využívá aproximované diferenciální rovnice prvního řádu ve tvaru [4]:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{B(t)} - p_{\infty(t)}}{\rho_k}}. \quad 3.14$$

3.3. Kavitační modely

Ve Fluentu jsou implementovány tři různé kavitační modely a z toho dva jsou uživatelsky přístupné. Při mých výpočtech byl použit vícefázový model směsi (tzv. mixture model) a kavitační model Schnerr-Sauer.

3.3.1. Model Schnerr-Sauer

Toto je standardní kavitační model. Může být použit jak pro vícefázový Mixture model, tak pro Eulerovský vícefázový model. Schnerr-Sauer využívá k popisu dynamiky bubliny zjednodušenou Rayleigh-Plessetovu rovnici. Ve Fluentu je při použití tohoto kavitačního modelu implementována transportní rovnice parní fáze pro vznik kavitace v následujícím tvaru [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{va} \rho_{va}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_{va} \rho_{va} \bar{v}_j) = R, \quad 3.15$$

kde:

R je hmotnostní zdrojový člen:

$$R = \frac{\rho_{va} \rho_k}{\rho} \left(\frac{\partial \alpha_{va}}{\partial t} + \frac{\partial (v_j \alpha_{va})}{\partial x_j} \right), \quad 3.16$$

α_{va} je objemový zlomek parní fáze závislý na počtu kavitačních jader n_B v objemu kapaliny [-]:

$$\alpha_{va} = \frac{n_B \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_B \frac{4}{3} \pi R_B^3}. \quad 3.17$$

Po dosazení rovnice 3.17 do rovnice 3.16 získáme vztah [6]:

$$R = \frac{\rho_{va} \rho_k}{\rho} \alpha_{va} (1 - \alpha_{va}) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{va} - p}{\rho_k}}. \quad 3.18$$

Při výpočtu hmotnostního zdrojového členu v rovnici 3.18 je uvažován vznik kavitace (vypařování). Dostane-li se ale kavitační bublina do oblasti vyššího tlaku, dojde k jejímu kolapsu (kondenzaci). Pro případ kolapsu je zdrojový člen dán vztahem [6]:

$$R = \frac{\rho_{va} \rho_k}{\rho} \alpha_{va} (1 - \alpha_{va}) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_{va}}{\rho_l}}. \quad 3.19$$

Jediný parametr, který musí být určen, je počet kavitačních bublin v kapalině. Za předpokladu, že žádné bubliny nevznikají ani nezanikají, by hustota bublin měla být konstantní. Počáteční podmínky (objemový zlomek a rovnovážný poloměr bubliny) by tedy měli být dostačující pro určení hustoty kavitačních bublin z rovnic 3.17 a 3.18 [9].

3.3.2. Model Singhal et al.

Model Singhal et al. je plně popsáný kavitační model, který se používá pro působení nekondenzovatelných plynů. Hmotnostní zlomek nekondenzovatelných plynů se předpokládá konstantní. Tento model je kompatibilní pouze s vícefázovým modelem Mixture. Je schopný popsat různé druhy vícefázového proudění, účinky prokluzu rychlostí mezi kapalnou a plynnou fází, stlačitelnost a tepelné účinky obou fází. Transportní rovnice parní fáze pro vznik kavitace je totožná s transportní rovnicí modelu Schnerr-Sauer [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{va} \rho_{va}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_{va} \rho_{va} \bar{v}_j) = R, \quad 3.20$$

Objemový zlomek parní fáze α_{va} závislý na počtu kavitačních jader n_B v objemu kapaliny je dán vztahem [9]:

$$\alpha_{va} = n_B \cdot \frac{4}{3} \pi R_B^3. \quad 3.21$$

Hustota směsi ρ v závislosti na objemovém zlomku parní fáze α_{va} je dána následujícím vztahem [9]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -(\rho_k - \rho_{va}) \frac{D\alpha}{Dt}. \quad 3.22$$

Po dosazení rovnice 3.21 do rovnice 3.22 získáme vztah [9]:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -(\rho_k - \rho_{va}) (n_B \frac{4}{3} \pi)^{\frac{1}{3}} (3\alpha_{va})^{\frac{2}{3}} \frac{DR_B}{Dt}. \quad 3.23$$

Hmotnostní zdrojový člen R je vyjádřen rovnicí:

$$R = (n4\pi)^{\frac{1}{3}}(3\alpha_{va})^{\frac{2}{3}} \frac{\rho_{va}\rho_k}{\rho} \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{p_{va}-p}{\rho_k} \right)}, \quad 3.24$$

Všechny veličiny, kromě počtu parních bublin, jsou buď známé konstanty, nebo závislé proměnné [9].

3.3.3. Model Zwart-Gerber-Belamri

Za předpokladu, že všechny bubliny v systému mají stejnou velikost, kavitační model Zwart-Gerber-Belamri udává celkovou rychlost mezifázového hmotnostního přenosu na jednotkový objem v závislosti na hustotě výskytu kavitačních bublin n_B a rychlosti přeměny jediné bubliny [9]:

$$R = n_B \cdot (4\pi R_B^3 \rho_{va} \frac{DR_B}{Dt}). \quad 3.25$$

Substitucí hustoty výskytu kavitačních bublin z rovnice 3.25 do rovnice 3.21, získáme vztah pro přenos čisté hmoty [9]:

$$R = \frac{3\alpha_{va}\rho_{va}}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{p_{va}-p}{\rho_k} \right)}. \quad 3.26$$

4. Výpočtové modelování proudění

V současnosti se už čím dál tím více využívá modelování proudění v CFD. Znalost vlastností proudění je pro vývojáře a konstruktéry hydraulických zařízení velmi důležitá. Přesto, že fyzikální výsledky z výpočtů v CFD nejsou vždy úplně přesné, dokáží nám poskytnout prvotní informace o vlastnostech proudění. Programy CFD jsou založeny na řešení diferenciálních rovnic na předem definované výpočetní síti. Proto je výpočet kavitačního proudění o tolik náročnější, než výpočet proudění bez uvážení kavitačního jevu.

Kavitační bublina vzniká v proudící kapalině v oblasti nižšího tlaku, než je hodnota tlaku nasycených par. Bublina dále roste a pohybuje se směrem do oblasti vyššího tlaku, kde dochází k jejímu kolapsu [2]. Z těchto poznatků bylo vycházeno při návrhu tvarů průtočných oblastí. Pro výpočet byly navrženy čtyři tvary, u kterých se předpokládala vysoká intenzita kavitačního opotřebení.

Numerický výpočet kavitačního režimu proudění byl proveden v programu Ansys Fluent 15.0. Fluent využívá k řešení základních rovnic zákonů zachování metodu konečných objemů. Princip této metody spočívá v určení polohy těžiště jednotlivých buněk a následné řešení časově středované Navier-Stokesovy rovnice (RANS). Rovnice RANS je odvozena z obecné Navier-Stokesovy rovnice dosazením okamžitých hodnot rychlostí a tlaků, které se skládají z flukтуаční a časově středované složky [4]. Výpočet probíhá na předem definované výpočetní síti. Výpočetní síť jednotlivých tvarů byly vytvořeny v programu Gambit 2.4.6. Poté byly vyexportovány z Gambitu a importovány pro výpočet do Fluentu, kde došlo k samotnému výpočtu i vyhodnocení.

4.1. Tvorba výpočetní sítě

Charakteristickým rozměrem výpočetní domény je průměr průtočné oblasti D_p . Tento průměr odpovídá skutečnému průměru potrubí v kavitační trati a má hodnotu 53 mm. Velikost domény byla zvolena tak, aby dostatečně pokryla vyšetřovanou oblast a zamezila ovlivnění výsledků okrajovými podmínkami a okolními jevy. Z těchto důvodů byla vstupní i výstupní část domény byla prodloužena o určitou délku.

Vytvořená síť musela být dostatečně hustá v oblasti mezní vrstvy povrchů, aby došlo k jejímu správnému pokrytí a popsání. Mezní vrstva je velmi důležitá oblast výpočtu, neboť zde dochází k velkým změnám rychlosti (největší gradient rychlosti). Dostatečné pokrytí mezní vrstvy určuje bezrozměrná vzdálenost od povrchu y^+ , která je dána vztahem [8]:

$$y^+ = \frac{\mu_\tau y}{\nu}, \quad 4.1$$

kde:

μ_τ je třecí rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]:

$$\mu_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad 4.2$$

Tabulka 3: Přehled bezrozměrných vzdáleností y^+ jednotlivých výpočtů

Průtočné oblasti	Vstupní průtok Q ($l \cdot s^{-1}$)	Výstupní tlak (kPa)	Bezrozměrná vzdálenost y^+ (-)
První tvar	7	380	176
	10	280	294
	13	180	241
Druhý tvar	7	380	180
	8	380	203
	10	380	249
	13	380	306
Čtvrtý tvar	3,3	50	326
	3,3	180	576

Abychom mohli považovat síť za dostatečně hustou, musí mít tato vzdálenost hodnotu $y^+ < 5$. Při řešení prostorové úlohy dosáhneme takto nízké hodnoty y^+ pouze při velkém počtu buněk. Pro snížení časové náročnosti jsou ve Fluentu implementovány stěnové funkce, které umožňují zvýšení hodnoty y^+ přibližně o dva řády. Při svých výpočtech jsem využil stěnovou funkci s názvem Non-Equilibrium Wall Functions. Při použití této funkce by teoreticky neměla bezrozměrná vzdálenost přesáhnout hodnotu 100, kde se nachází konec logaritmické části mezní vrstvy. V praxi bylo ale odzkoušeno, že pro získání výsledků srovnatelných s výsledky experimentálními, může mít bezrozměrná vzdálenost hodnotu $y^+ < 300$. Hodnota y^+ se mění v závislosti na velikosti vstupní okrajové podmínky, tedy průtoku. Proto byla síť postupně upravována v závislosti na změně průtoku. Maximální hodnoty y^+ jednotlivých výpočtů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 4: Přehled vlastností prvků jednotlivých sítí

Průtočné oblasti	Počet prvků	Equisize Skew
První tvar	1216700	0,5
Druhý tvar	533160	0,52
Třetí tvar	3632400	0,63
Čtvrtý tvar	2468400	0,47

Jednotlivé objemy byly tvarovány tak, aby vytvořená síť byla složena pouze z hexa prvků (šestistěnné prvky). Tento typ sítě je z hlediska výpočetní náročnosti nejjednodušší a z časového hlediska výpočtu nejrychlejší. Přináší nám také nejvyšší numerickou přesnost. Počet prvků byl volen tak, aby výpočet nebyl příliš časově náročný, ale zároveň aby byla síť dostatečně kvalitní. Kdyby nebyla síť dostatečně kvalitní, mohlo by při výpočtu dojít k divergenci. Počet prvků jednotlivých tvarů průtočných oblastí je uveden v tabulce 4.

4.2. Numerický výpočet

Vytvořené sítě byly importovány do Fluentu, kde byl proveden samotný výpočet. Jedná se o výpočet vícefázového kavitačního proudění.

4.2.1. Nastavení v programu Fluent 15.0

Okrajové podmínky:

Numerický výpočet byl proveden pro několik hodnot průtoků. Jelikož je vstupní okrajová podmínka rychlostní, musel se průtok přepočítat na vstupní rychlost pomocí vztahu:

$$v = \frac{Q}{S}. \quad 4.3$$

Na výstupu byl předepsán absolutní tlak, jehož hodnota mohla být také přenastavena.

Hydraulický průměr je charakterizován jako největší možná velikost víru, který by mohl v doméně vzniknout, proto byla u vstupní i výstupní okrajové podmínky zvolena hodnota 53 mm (průměr potrubí). Intenzita turbulence byla volena na vstupu 5 % a na výstupu 10 %.

Médium:

Proudící kapalinou při jednofázovém výpočtu byla voda o hustotě $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ a dynamické viskozitě $\mu = 0,001003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Při výpočtu vícefázového kavitačního proudění byla do výpočtu zahrnuta i druhá parní fáze o hustotě $\rho = 0,5542 \text{ kg/m}^3$ a dynamické viskozitě $\mu = 1,34 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Model turbulence:

Pro nastavení modelu turbulence byl zvolen model realizable k- ϵ zkombinovaný s nerovnovážnými stěnovými funkcemi (Non-Equilibrium Wall Functions). Tento turbulentní model využívá pro řešení proudění Boussinesqovu hypotézu a pro určení turbulentní viskozity dvěma transportními rovnicemi. Používá se v případech složitějšího proudění (např. odtržení mezní vrstvy) a pro proudění s vysokým Reynoldsovým číslem. Jeho výhodou je poměrně rychlý výpočet a v porovnání např. s modelem RSM (Reynolds-Stress model) dobrá konvergence. Mezi jeho nevýhody patří skutečnost, že Boussinesqova hypotéza předpokládá flukтуаční složku rychlosti ve všech směrech stejnou (izotropní turbulence) [8].

Modelování kavitace:

Kavitační proudění je proudění vícefázové, proto byl použit vícefázový model směsi tzv. mixture model. Jak již bylo uvedeno první fáze, která v doméně proudí, je voda přeměňující se použitím kavitačního modelu na druhou fázi a to vodní páru. Kavitační modely implementované ve Fluentu jsou založeny na Rayleigh-Plessetově rovnici. Při mých výpočtech byl zvolen kavitační model Schnerr-Sauer. Přednastavená hodnota tlaku nasycených par u tohoto modelu je 3540 Pa. Jedná se o standardní kavitační model. Účinky prokluzu rychlostí mezi kapalnou a plynnou fází byly zanedbány.

Prostorová diskretizace:

Gradient	Least Squares Cell Based
Tlak	PRESTO!
Hybnost	QUICK
Objemový zlomek	QUICK
Turbulentní kinetická energie	Second Order Upwind
Disipace turbulentní kinetické energie	Second Order Upwind

Relaxační parametry:

Relaxační parametry slouží ke zlepšení stability výpočtu. Numerickým řešením nelineárních diferenciálních rovnic dochází při výpočtu ke skokovým změnám řešených veličin. Zavedením relaxačních parametrů dojde k redukci těchto skokových změn v každé iteraci a tím ke zlepšení konvergence [8].

Tabulka 5: Nastavení relaxačních parametrů ve Fluentu

Řešené veličiny	Původní hodnoty	Nové hodnoty
Tlak	0,3	0,3
Hustota	1	0,5
Objemové síly	1	0,5
Hybnost	0,7	0,7
Hmotnost výparu	1	0,1
Objemový zlomek	0,5	0,05
Turbulentní kinetická energie	0,8	0,8
Disipace turbulentní kinetické energie	0,8	0,8
Turbulentní viskozita	1	1

4.2.2. Průběh výpočtu

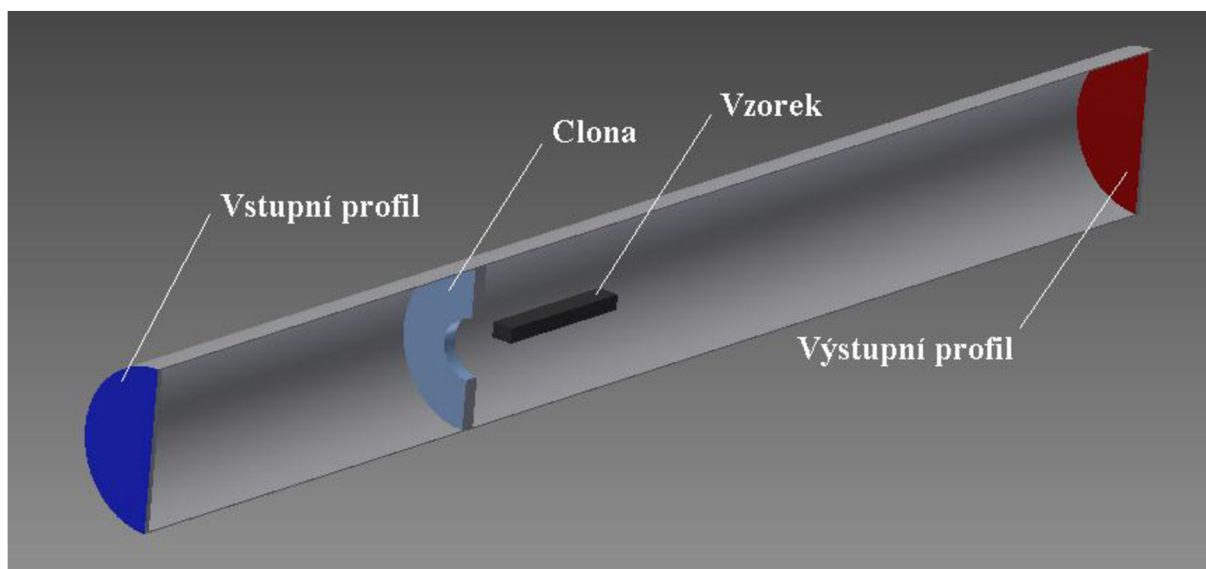
Pro vylepšení konvergence úlohy probíhal výpočet ve třech fázích. Nejprve byl proveden stacionární výpočet jednofázového proudění vody průtočnou oblastí. Schémata prostorové diskretizace byla nastavena na přesnost prvního řádu. V druhé fázi výpočtu byla vylepšena diskretizační schémata na přesnost druhého a třetího řádu. V poslední a časově nejnáročnější fázi byl proveden výpočet nestacionárního dvoufázového proudění se vznikem parní fáze při kavitaci. Přesnost diskretizačních schémat byla řádově shodná a časový krok byl zvolen $1 \cdot 10^{-4}$ s. Pro zaručení konvergence úlohy musely být sníženy relaxační parametry některých veličin. Mezi fázemi výpočtu se přepínalo v době, kdy klesly reziduály výpočtu přibližně pod hodnotu řádově 10^{-4} .

Výpočet kavitacího proudění je o mnoho náročnější než proudění bez uvažování kavitace. Ani pokles reziduálů pod určitou hodnotu nezaručí fyzikální správnost výsledků. Dostatečné propočítání úlohy bylo posuzováno podle množství vzniklé parní fáze. Pro tento

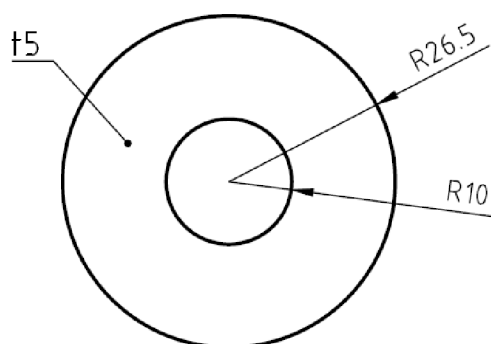
účel byla vytvořena v doméně rovina, na které bylo toto množství sledováno. Ve chvíli, kdy již nedocházelo ke změně množství parní fáze, byla úloha považována za správně vyřešenou. Další faktor, který bylo potřeba sledovat, byla bezrozměrná vzdálenost y^+ . Pro pozorování tohoto faktoru byl vytvořen pozorovací modul, který vykresloval maximální hodnotu y^+ v závislosti na čase proudění. Hodnota y^+ byla zjištěna ve chvíli, kdy došlo k ustálení průběhu grafu. Pokud byla větší, než povolená maximální hodnota $y_{\max}^+=300$, musela být síť zjemněna.

4.3. Modelování proudění první průtočnou oblastí

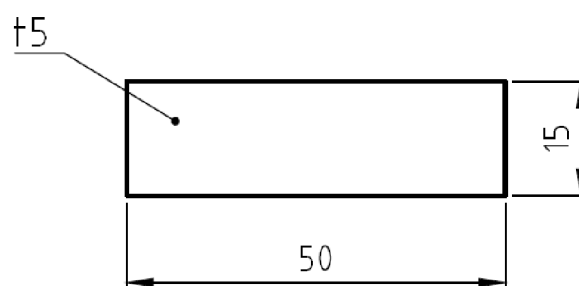
Na obrázku 7 je zobrazen podélný řez první průtočnou oblastí, která je složena ze dvou prvků. Jedná se o klasický tvar clony (Obrázek 9) a vzorek ve tvaru kvádr (Obrázek 8). K počátku kavitace dochází v oblasti nízkého tlaku vyvolaného vloženou clonou s předpokládaným místem kolapsu bublin na povrchu vzorku umístěného ve vzdálenosti 15 mm po směru proudu. Schéma průtočné oblasti je zobrazen na obrázku 10.



Obrázek 7: Řez první průtočnou oblastí



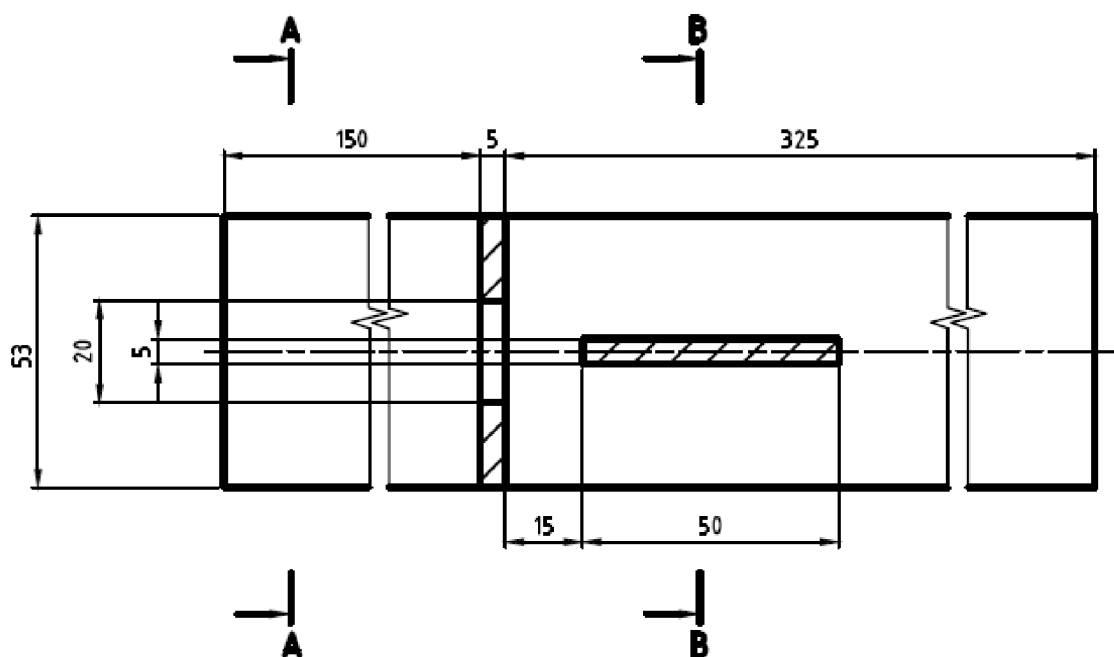
Obrázek 9: Rozměry clony



Obrázek 8: Rozměry vzorku

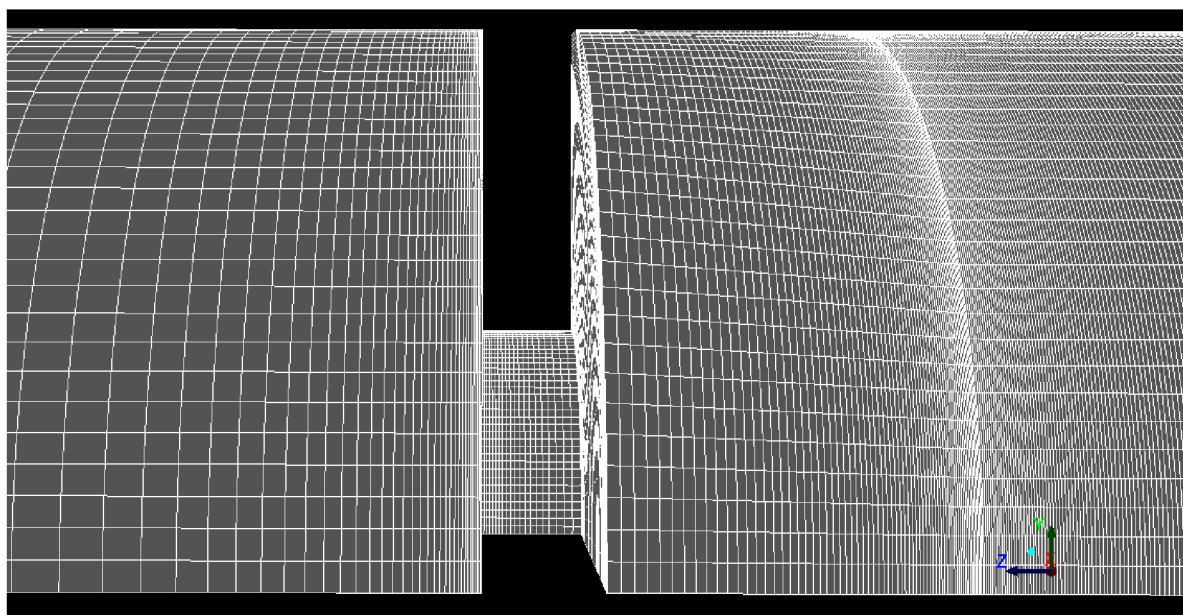
4.3.1. Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť byla vytvářena v Gambitu. Nejprve byl namodelován objem kapaliny průtočné oblasti se vzorkem, poté objem průtočné oblasti clony odsazený ve vzdálenosti 15 mm od vzorku. Následně byly tyto dva úseky propojeny objemy. Před clonou byla průtočná oblast prodloužena o $3 \cdot D_p \cong 150 \text{ mm}$ a za vzorkem o $5 \cdot D_p \cong 260 \text{ mm}$, tedy o dostatečnou délku, aby nedošlo k ovlivnění výpočtu okrajovými podmínkami. Objem kapaliny nebyl modelován jako celek, ale byl rozdělen do několika dílčích objemů z důvodu zkvalitnění sítě. Po namodelování všech objemů kapaliny se vytvořila výpočetní síť. Vytvořená výpočetní síť je vyobrazena na obrázku 11.



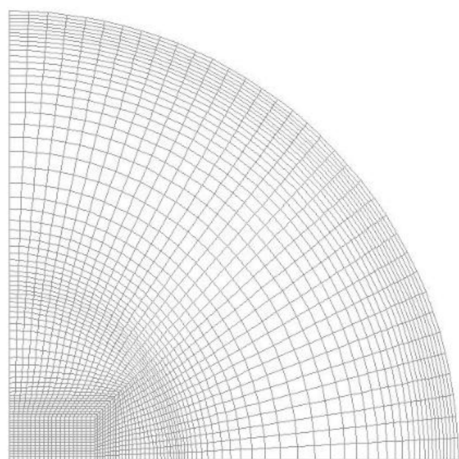
Obrázek 10: Schéma první průtočné oblasti

Aby byla dostatečně pokryta oblast, kde předpokládáme vznik a kolaps kavitace, buňky na jednotlivých hranách byly zhušťovány směrem k cloně a vzorku. Dále musela být dostatečně pokryta mezní vrstva, z toho důvodu byla síť huštěna směrem k pevným stěnám (potrubí, clona a vzorek). Vytvořená výpočetní síť je složena z 1216700 hexa buněk.

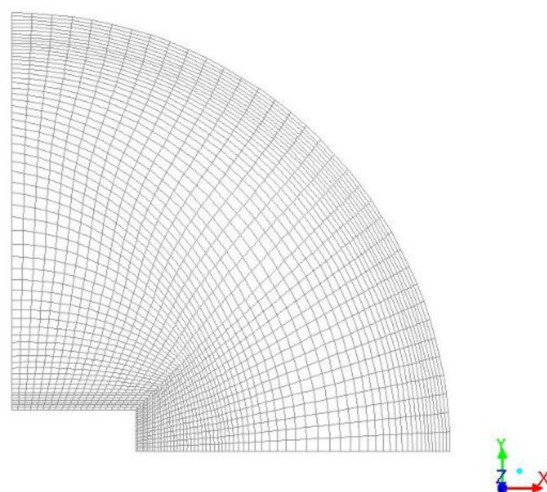


Obrázek 11: Vytvořená výpočetní síť

Kvalita sítě byla posuzována na základě největšího zkosení hran (Equisize Skew). Toto kritérium může nabývat hodnot v intervalu $< 0,1 >$. Ideální nezdeformovaný prvek představuje hodnota 0 a maximální deformace prvku je vyjádřena hodnotou 1. Equisize Skew této sítě mělo hodnotu 0,5, proto může být síť považována za relativně kvalitní.



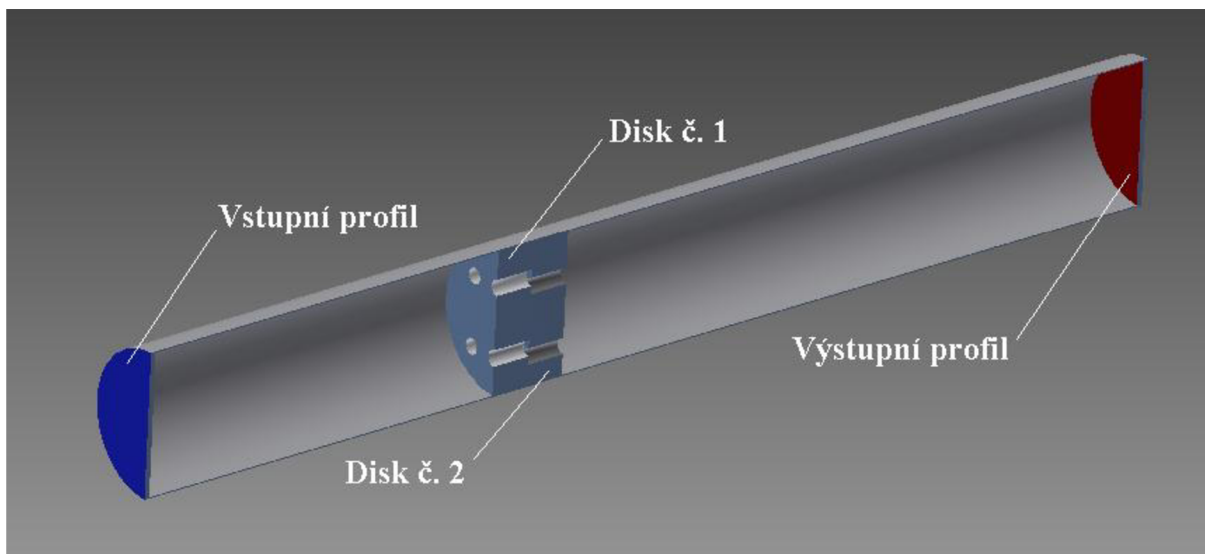
Obrázek 12: Síť v řezu A-A



Obrázek 13: Síť v řezu B-B

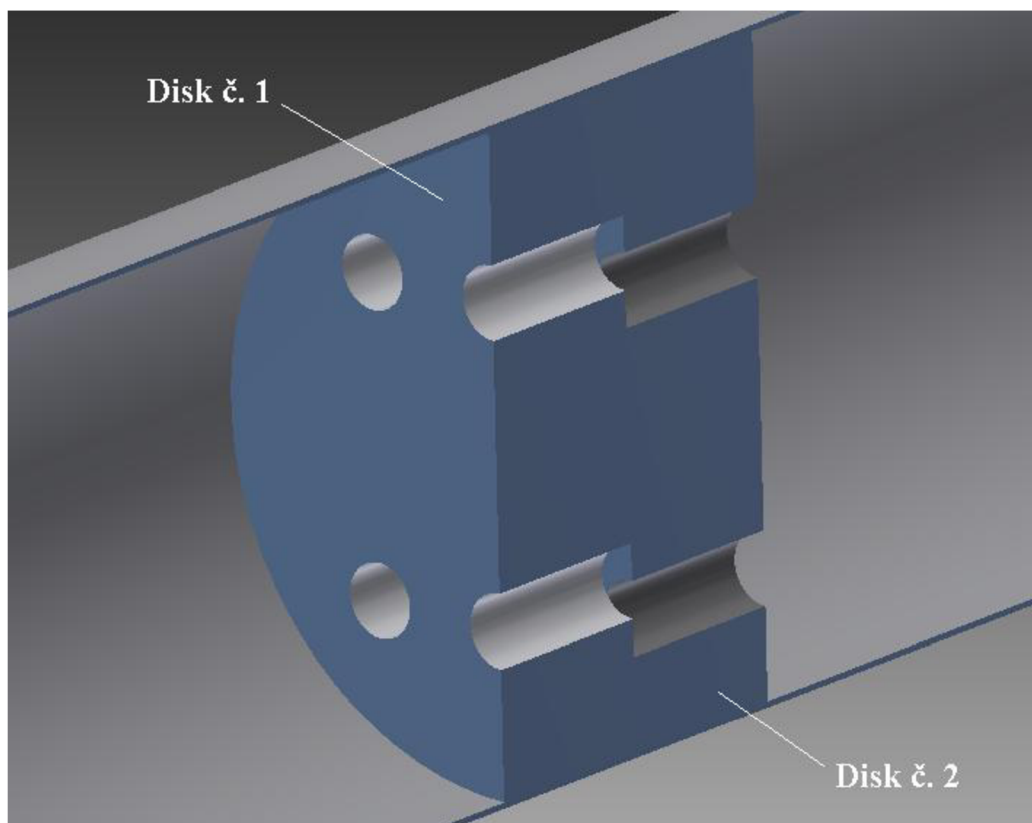
Nakonec byly předepsány okrajové podmínky. Na vstupní profil byla předepsána rychlostní okrajová podmínka (VELOCITY_INLET) a na profil výstupní tlaková okrajová podmínka (PRESSURE_OUTLET). Jedná se o úlohu, která splňuje všechny podmínky symetrie, tudíž mohla být řešena jako symetrická. Na hranicích symetrie byla předepsána symetrická podmínka (SYMMETRY). Na stěnách potrubí a vzorku není definována žádná podmínka, pouze se využívá přednastaveného okrajového typu WALL, který se řídí podmínkou ulpívání $v = 0$.

4.4. Modelování proudění druhou průtočnou oblastí



Obrázek 14: Řez druhou průtočnou oblastí

Při návrhu druhého tvaru průtočné oblasti, byla vytvořena alternativní verze vzorku, který byl již experimentálně odzkoušen. Jedná se o disk s množstvím otvorů. Oproti původní verzi je ale tvořen dvěma podobnými disky, které jsou sestaveny tak, aby došlo k přesazení otvorů na obou discích. Podélný řez druhou průtočnou oblastí je zobrazen na obrázku 14.

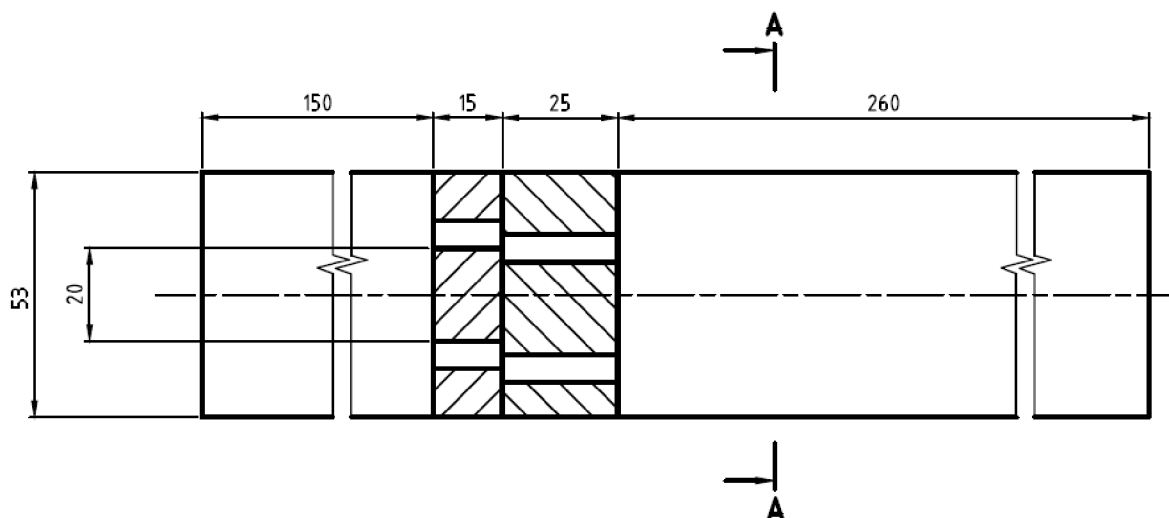


Obrázek 15: Detailní pohled přesazení otvorů

Počátek kavitace byl předpokládán v místě přesazení otvorů, tedy v oblasti nízkého tlaku a následný kolaps kavitačních bublin v otvorech disku umístěného za oblastí přesazení otvorů ve směru proudu.

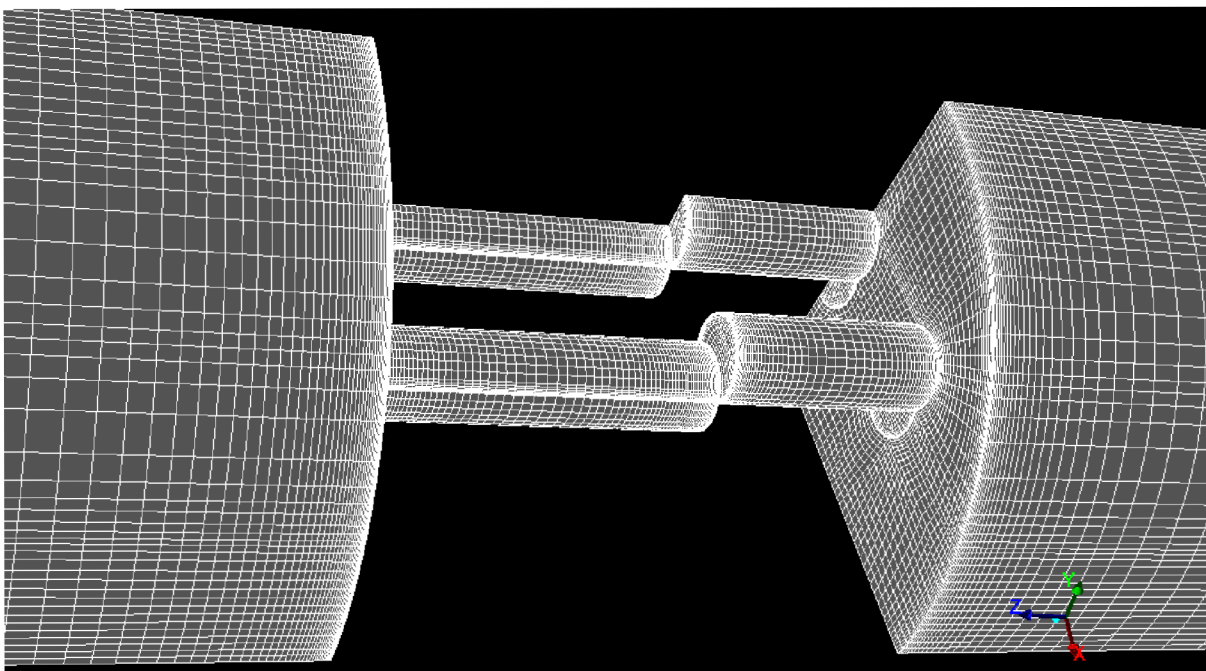
4.4.1. Tvorba výpočetní sítě

Stejně jako u prvního tvaru byla výpočetní síť vytvářena v programu Gambit. Pro zjednodušení výpočtu byl redukován počet otvorů na 6. Při vytváření sítě bylo nejtěžší namodelovat přesazení otvorů, tak aby síť byla kvalitní a zároveň byla dostatečně popsána mezní vrstva. Při tvorbě byl postup následující. Nejprve byly vytvořeny plochy v jedné rovině a na nich vytvořena 2D síť. Tvar jednotlivých ploch byl postupně upravován na základě vyobrazení sítě a zhodnocení její kvality. Namodelování objemů bylo provedeno vytažením těchto ploch, v každé části průtočné oblasti o specifickou délku. Část prvního disku o 15 mm, část disku druhého o 25 mm, vstupní část o rozměr $3 \cdot D_p \cong 150 \text{ mm}$ a výstupní část o rozměr $5 \cdot D_p \cong 260 \text{ mm}$. Objem kapaliny tedy není namodelován jako celek, ale je rozdělen do více dílčích objemů pro zkvalitnění sítě. Vytvořená výpočetní síť je vyobrazena na obrázku 17.



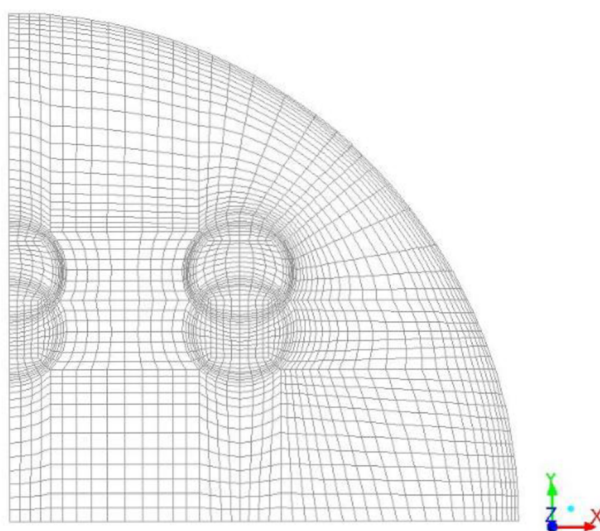
Obrázek 16: Schéma druhé průtočné oblasti

Aby byla dostatečně pokryta oblast přesazení otvorů disků, kde byl předpokládán vznik a kolaps kavitace, buňky na jednotlivých hranách byly huštěny směrem k oběma diskům a v otvorech disků byly huštěny směrem k místu přesazení jednotlivých děr. Dále musela být dostatečně pokryta oblast mezní vrstvy. Z toho důvodu byla síť zhuštěna směrem k pevným stěnám (potrubí, disky s otvory). Vytvořená výpočetní síť je složena z 533160 hexa buněk. Kvalita sítě byla posuzována na základě největšího zkosení hran (Equisize Skew). Equisize Skew této sítě mělo hodnotu 0,52, proto může být síť považována za relativně kvalitní.



Obrázek 17: Vytvořená výpočetní síť

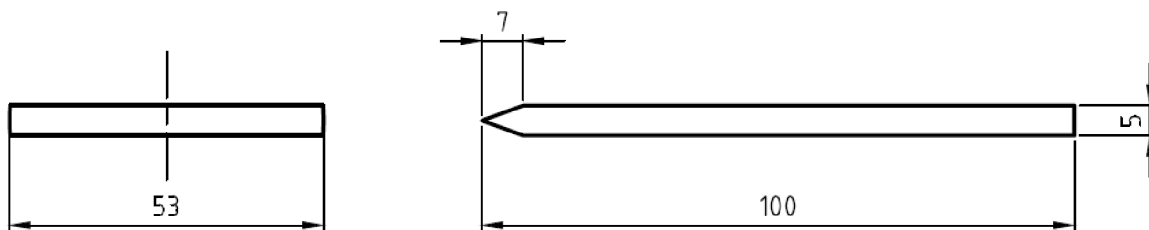
Nakonec byly předepsány okrajové podmínky. Na vstupní profil byla předepsána rychlostní okrajová podmínka (VELOCITY_INLET) a na profil výstupní tlaková okrajová podmínka (PRESSURE_OUTLET). Na hranicích symetrie byla předepsána podmínka symetrie (SYMMETRY). Na stěnách potrubí a discích s otvory není definována žádná podmínka, pouze je využito přednastaveného okrajového typu WALL, který se řídí podmínkou ulpívání $v = 0$.



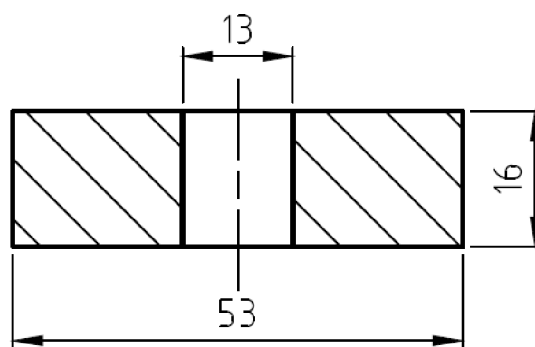
Obrázek 18: Síť v řezu A-A

4.5. Modelování proudění třetí průtočnou oblastí

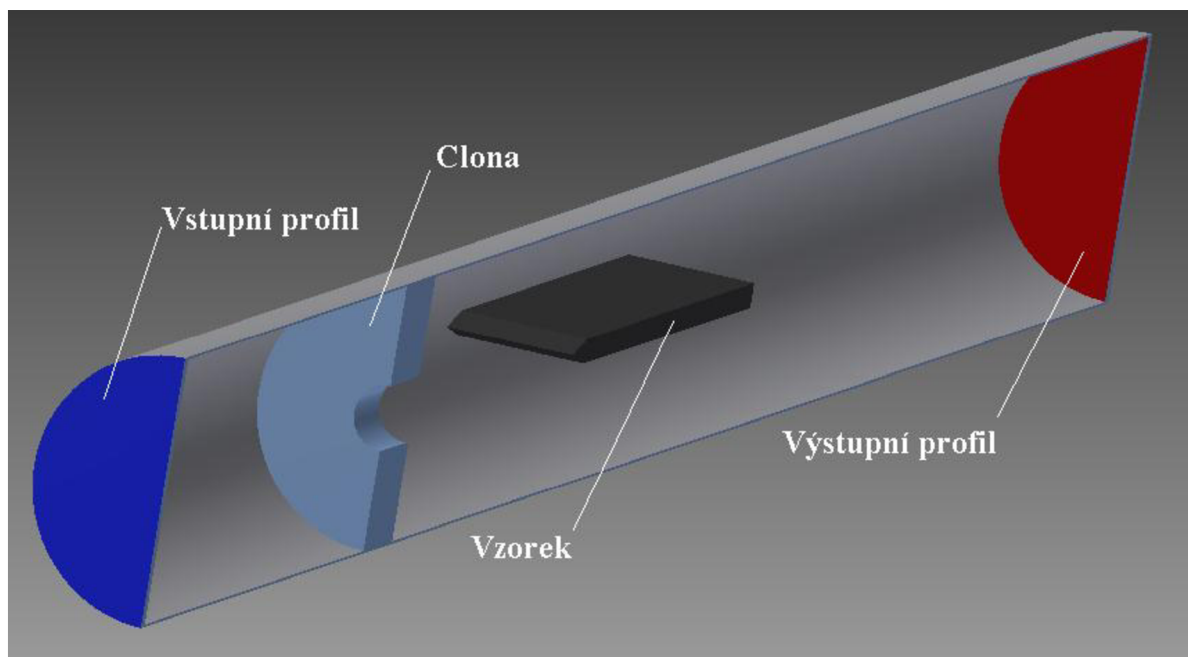
Na obrázku 21 je zobrazen podélný řez třetí průtočnou oblastí. Jedná se o modifikaci prvního tvaru průtočné oblasti. Vzorek tvaru kvádra byl nahrazen vzorkem ve tvaru lopatky s náběžnou hranou. Byly změněny i rozměry dýzy, které jsou znázorněny na obrázcích níže.



Obrázek 19: Rozměry vzorku



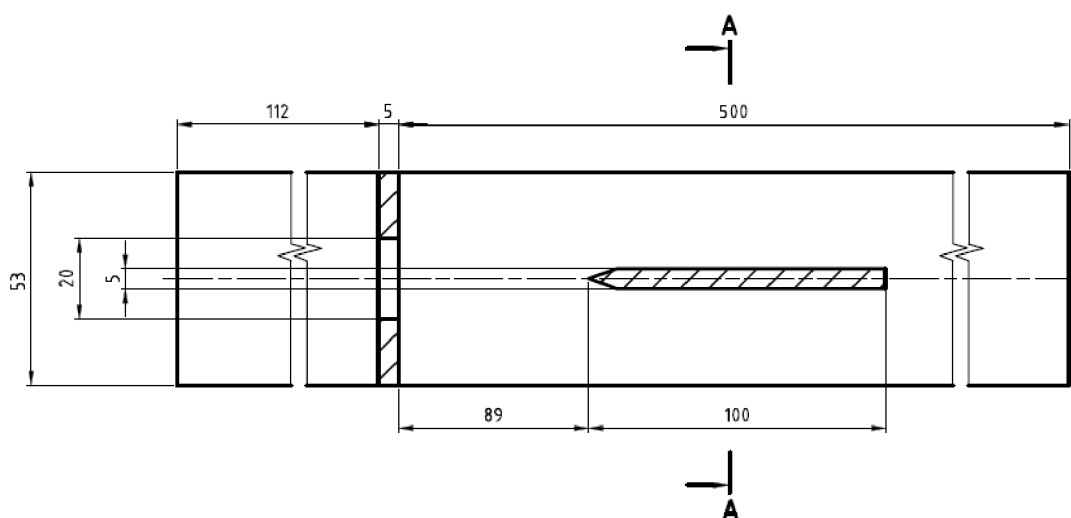
Obrázek 20: Rozměry clony



Obrázek 21: Řez třetí průtočnou oblastí

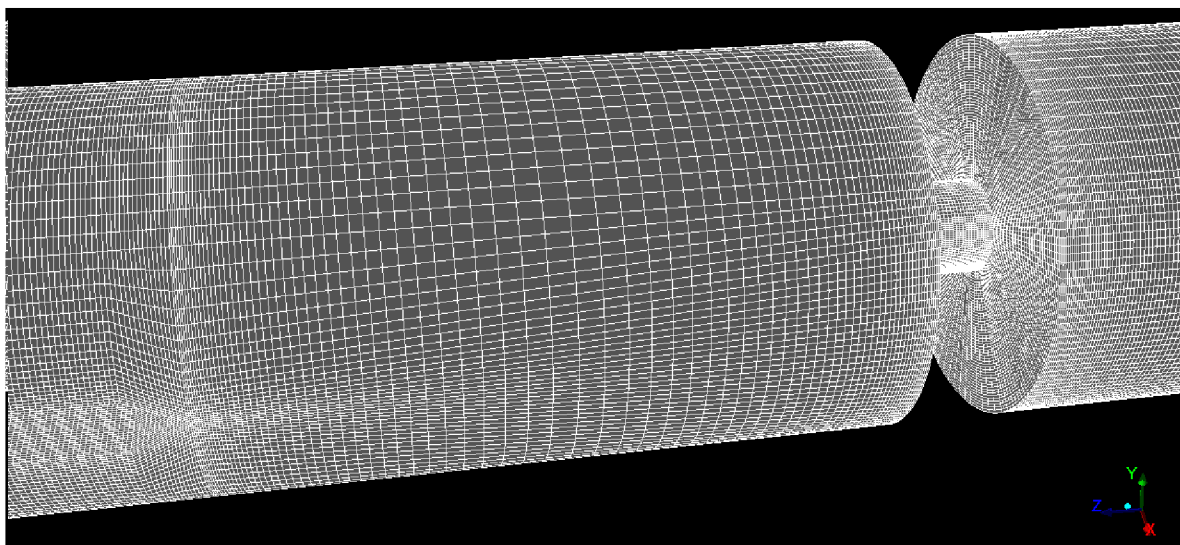
4.5.1. Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť byla vytvořena v programu Gambit. Úloha byla řešena ve 3D. Nejprve byl namodelován objem kapaliny průtočné oblasti se vzorkem, poté objem průtočné oblasti clony. Vzorek byl od clony odsazen ve vzdálenosti 89 mm. Před clonou byla prodložena průtočná oblast o $2,1 \cdot D_p \cong 112 \text{ mm}$ a za vzorkem o $5,9 \cdot D_p \cong 311 \text{ mm}$, tedy o dostatečnou délku, aby nedošlo k ovlivnění výpočtu okrajovými podmínkami. Objem kapaliny nebyl modelován jako celek, ale byl rozdělen do několika dílčích objemů pro zkvalitnění sítě. Po namodelování všech objemů kapaliny byla vytvořena výpočetní síť. Vytvořená výpočetní síť je vyobrazena na obrázku 23.



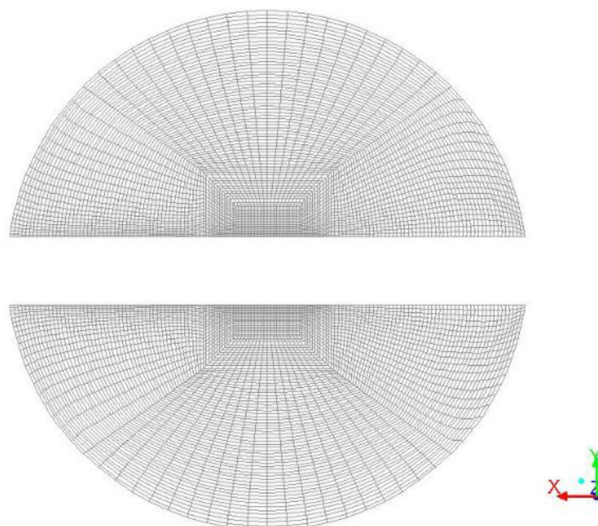
Obrázek 22: Schéma třetí průtočné oblasti

Aby byla dostatečně pokryta oblast předpokládaného vzniku a kolapsu kavitace, buňky na jednotlivých hranách byly zhušťovány směrem k místu clony a náběžné hrany vzorku. Pro dostatečné pokrytí mezni vrstvy byla síť zhušťována směrem k pevným stěnám (potrubí, clona a vzorek). Vytvořená výpočetní síť je složena z 3632400 hexa buněk.



Obrázek 23: Vytvořená výpočetní síť

Kvalita sítě byla posuzována na základě největšího zkosení hran (Equisize Skew). Equisize Skew této sítě mělo hodnotu 0,63. Této hodnoty dosahovalo jen několik buněk, proto mohla být síť použita pro výpočet.

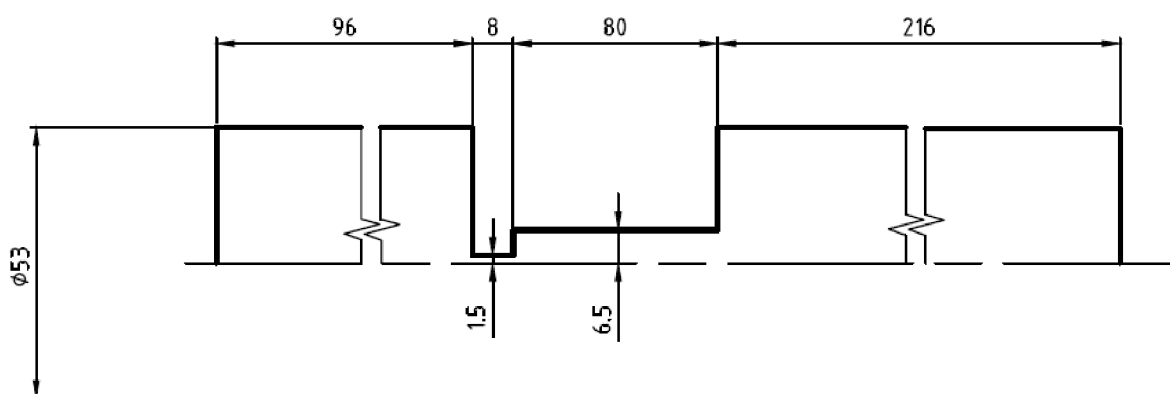


Obrázek 24: Síť v řezu A-A

Nakonec byly předepsány okrajové podmínky. Na vstupní profil byla předepsána rychlostní okrajová podmínka (VELOCITY_INLET) a na profil výstupní tlaková okrajová podmínka (PRESSURE_OUTLET). Na hranicích symetrie byla předepsána symetrická podmínka (SYMMETRY). Na stěnách nebyla definována žádná podmínka, pouze bylo využito přednastaveného okrajového typu WALL.

4.6. Modelování proudění čtvrtou průtočnou oblastí

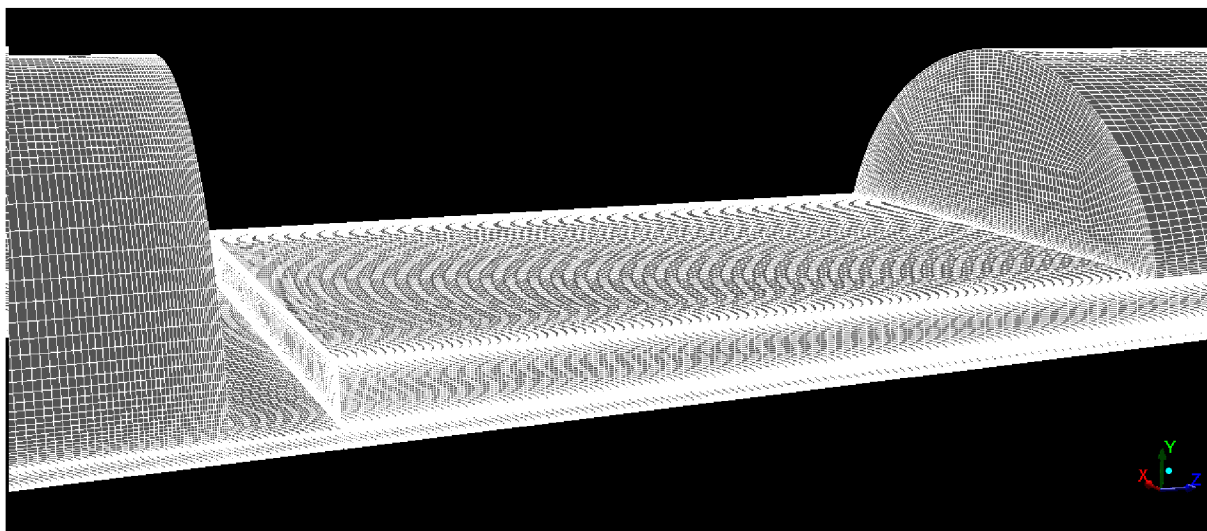
Čtvrtý tvar průtočné oblasti byl tvořen dvěma štěrbinami o různé velikosti. K počátku kavitace dochází v oblasti užší štěrbině s předpokládaným kolapsem v oblasti druhé štěrbině. Schéma průtočné oblasti je zobrazeno na obrázku 25.



Obrázek 25: Schéma čtvrté průtočné oblasti

4.6.1. Tvorba výpočetní sítě

Výpočetní síť byla vytvářena v programu Gambit. Úloha byla řešena ve 3D jako poloviční symetrie. Nejprve byly namodelovány objemy štěrbin. Před užší štěrbinou byla prodloužena průtočná oblast o $1,8 \cdot D_p \cong 96 \text{ mm}$ a za větší štěrbinou o $4 \cdot D_p \cong 216 \text{ mm}$, tedy o dostatečnou délku, aby nedošlo k ovlivnění výpočtu okrajovými podmínkami. Objem kapaliny nebyl modelován jako celek, ale byl rozdělen do několika dílčích objemů pro zkvalitnění sítě. Po namodelování všech objemů kapaliny byla vytvořena výpočetní síť. Vytvořená výpočetní síť je vyobrazena na obrázku 26.



Obrázek 26: Vytvořená výpočetní síť

Aby byla dostatečně pokryta oblast, kde byl předpokládán vznik a kolaps kavitace, buňky na jednotlivých hranách byly huštěny směrem k oběma štěrbinám. Mezní vrstva nebyla dostatečně pokryta ve všech místech pevných povrchů, jelikož se špatně pokryté místo nachází v oblasti, která nebyla místem zkoumání, mohou být výsledky považovány za správné. Vytvořená výpočetní síť byla složena z 2468400 hexa buněk. Kvalita sítě byla posuzována na základě největšího zkosení hran (Equisize Skew). Equisize Skew této sítě mělo hodnotu 0,47, proto byla síť považována za relativně kvalitní.

Nakonec byly předepsány okrajové podmínky. Na vstupní profil byla předepsána rychlostní okrajová podmínka (VELOCITY_INLET) a na profil výstupní tlaková okrajová podmínka (PRESSURE_OUTLET). Na hranicích symetrie byla předepsána podmínka symetrie (SYMMETRY). Na stěnách potrubí a vzorku nebyla definována žádná podmínka, pouze bylo využito přednastaveného okrajového typu WALL.

4.7. Vyhodnocení výpočtů prvního tvaru průtočné oblasti

Numerický výpočet prvního tvaru průtočné oblasti, která byla složena ze vzorku a clony, byl proveden pro nestacionární kavitační proudění. Hlavním úkolem provedených výpočtů bylo určit vznik kavitace, velikost kavitační oblasti a místo kolapsu kavitačních bublin a následně je porovnat se zavedenými předpoklady.

U tohoto tvaru se předpokládalo, že k počátku kavitace dochází v oblasti nízkého tlaku vyvolaného vloženou clonou s následným kolapsem kavitačních bublin na povrchu vzorku. Vzhledem k velikosti úlohy a počtu buněk výpočetní sítě, mohl být proveden pouze omezený počet výpočtů. Hlavním důvodem bylo dosažení správné hodnoty y^+ , které mohlo být

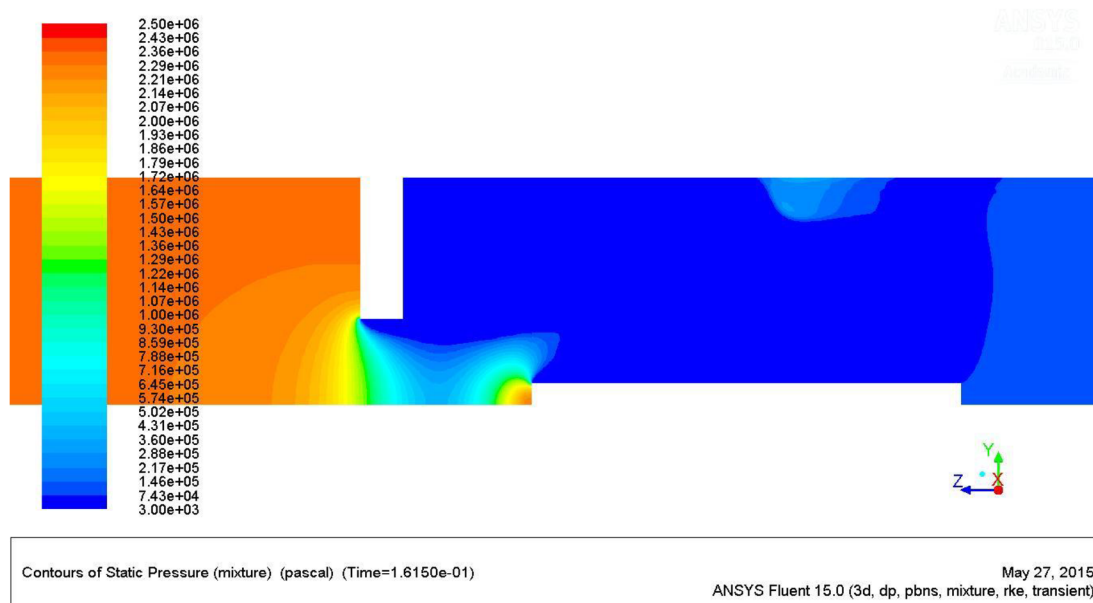
vyhodnoceno až po dosažení konvergence výpočtu, který probíhal vždy několik dní. Pokud byla hodnota y^+ příliš vysoká, musela být opravena síť a úloha znovu propočítána. Přehled hodnot y^+ jednotlivých výpočtů je uveden v tabulce 3. Numerický výpočet byl proveden pro tři typy nastavení okrajových podmínek. Přehled těchto nastavení je znázorněn v tabulce 6.

Tabulka 6: Přehled nastavení jednotlivých výpočtů

Q (l/s)	Výstupní tlak (Pa)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	p_{va} (Pa)
7	380000	998,2	0,001003	3540
10	280000	998,2	0,001003	3540
13	180000	998,2	0,001003	3540

4.7.1. Průběh statického tlaku

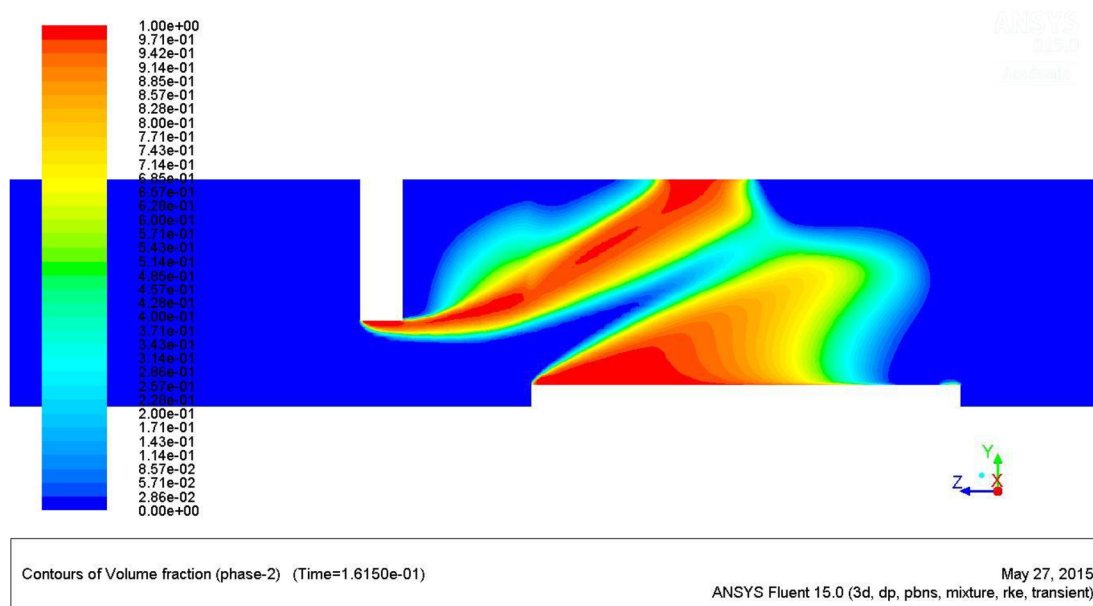
Vznik kavitace je podmíněn poklesem statického tlaku na přednastavenou hodnotu p_{va} v kavitačním modelu. Průběh statického tlaku výpočtů pro okrajové podmínky $Q = 13$ l/s a $p_v = 180$ kPa je znázorněn na následujícím obrázku. Rozložení statického tlaku ostatních výpočtů jsou uvedeny v příloze P1. Vizualizace byla provedena na ploše symetrické podmínky.



Obrázek 27: Rozložení statického tlaku pro $Q = 13$ l/s a $p_v = 180$ kPa

4.7.2. Vizualizace kavitace

Na obrázku 28 je zobrazen průběh kavitačního proudění při třetím nastavení okrajových podmínek. Červená barva představuje 100 % vzniklé parní fáze a modrá barva 100 % fáze kapalně. Zánik kavitace se předpokládá v oblasti zeleného zbarvení škály.



Obrázek 28: Množství parní fáze při $Q = 13$ l/s a $p_v = 380$ kPa

Z důvodu příliš vysokého minimálního tlaku při okrajových podmínkách $Q = 7$ l/s a $p_v = 380$ kPa nedošlo vůbec ke vzniku kavitace. Při změně okrajových podmínek na $Q = 10$ l/s a $p_v = 280$ kPa se kavitace již objevila v oblasti vložené clony. Vzniklá kavitační oblast je ale příliš malá, aby k jejímu kolapsu mohlo dojít na povrchu vzorku. Ke vzniku kavitace došlo na vstupní hraně clony a ke kolapsu stále ještě v oblasti clony. Při poslední a výrazné změně okrajových podmínek na $Q = 13$ l/s a $p_v = 180$ kPa došlo ke vzniku velké kavitační oblasti. Kavitace vznikla prostřednictvím vložené clony a k jejímu kolapsu došlo správně na povrchu vzorku.

4.8. Vyhodnocení výpočtů druhého tvaru průtočné oblasti

Numerický výpočet druhého tvaru průtočné oblasti, která byla složena ze dvou podobných disků s navzájem přesazenými otvory, byl proveden pro kavitační proudění.

Tabulka 7: Přehled nastavení jednotlivých výpočtů

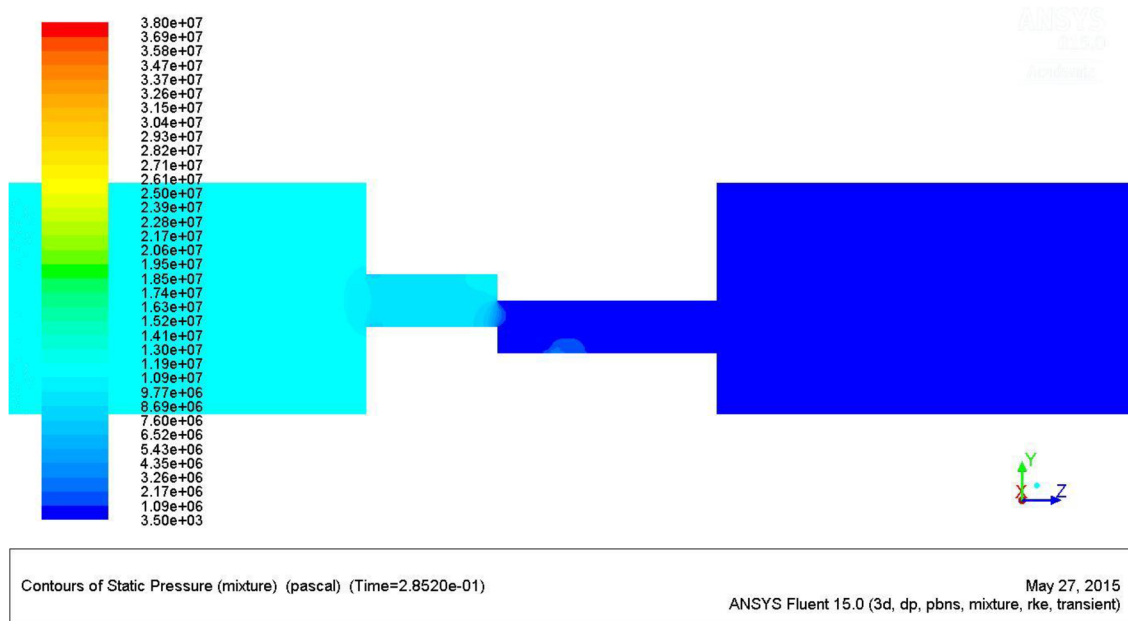
Q (l/s)	Výstupní tlak (Pa)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_{va} (Pa)
7	380000	998,2	0,001003	3540
8	380000	998,2	0,001003	3540
10	380000	998,2	0,001003	3540
13	380000	998,2	0,001003	3540

U tohoto tvaru byl předpoklad, že k počátku kavitace dochází v oblasti nízkého tlaku vyvolaného přesazením otvorů obou disků, s následným kolapsem kavitačních bublin v místě otvorů disku umístěného za oblastí přesazení otvorů ve směru proudu. Počet buněk této oblasti byl oproti prvnímu tvaru asi poloviční, takže výpočet nebyl tak časově náročný.

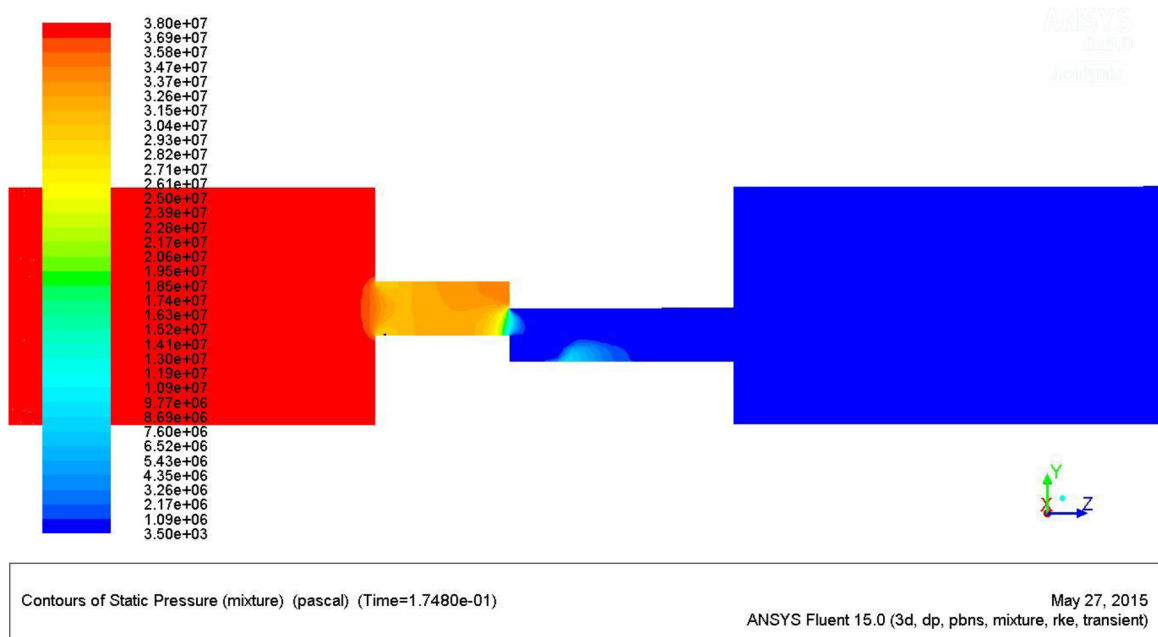
Přehled hodnot y^+ jednotlivých výpočtů je uveden v tabulce 3. Přehled nastavení výpočtů je znázorněn v tabulce 7.

4.8.1. Průběh statického tlaku

Průběh statického tlaku jednotlivých výpočtů je znázorněn na následujících obrázcích. Vizualizace byla provedena na ploše symetrické podmínky.



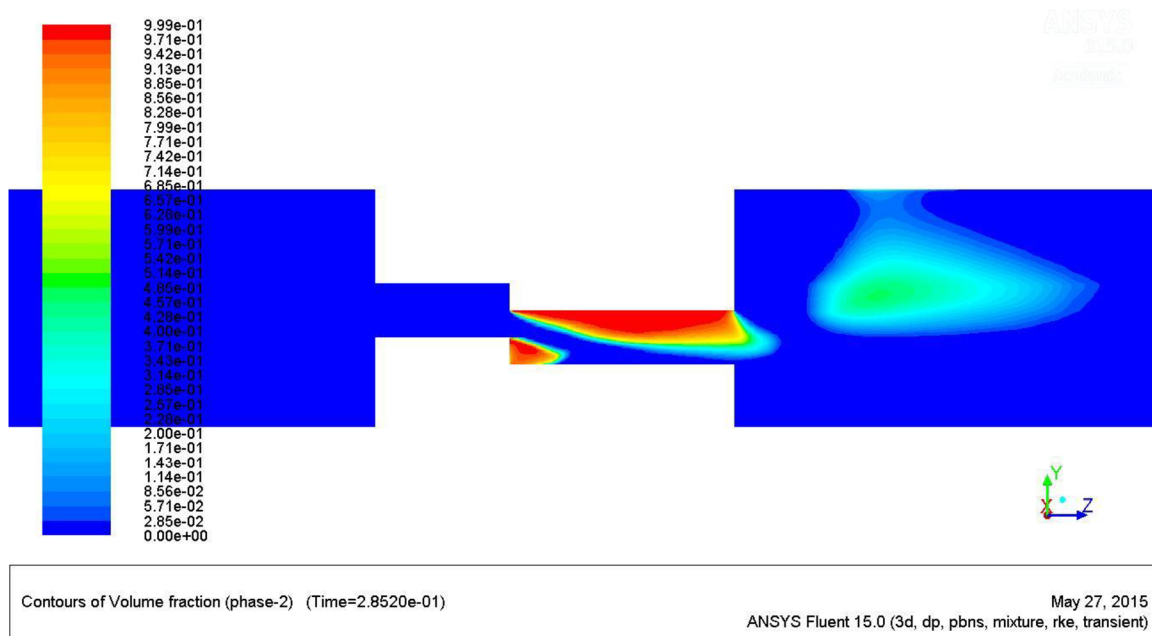
Obrázek 29: Rozložení statického tlaku pro $Q = 7 \text{ l/s}$ a $p_v = 380 \text{ kPa}$



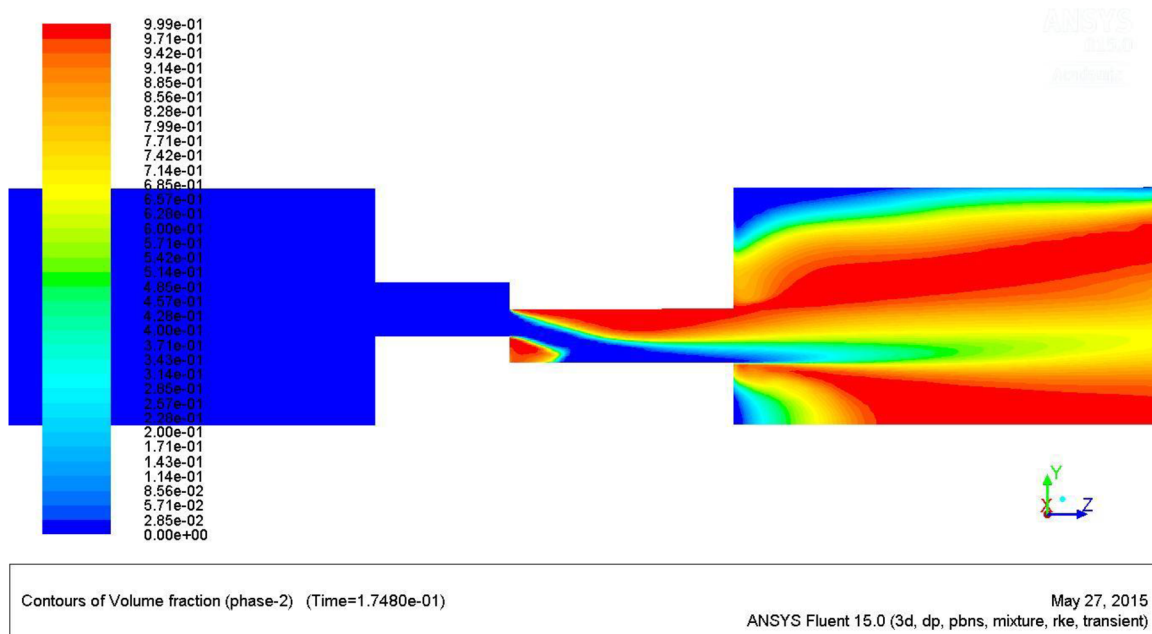
Obrázek 30: Rozložení statického tlaku pro $Q = 13 \text{ l/s}$ a $p_v = 380 \text{ kPa}$

4.8.1. Vizualizace kavitace

Na následujících obrázcích je zobrazen průběh kavitačního proudění. Červená barva představuje 100 % vzniklé parní fáze a modrá barva 100 % fáze kapalné. Zánik kavitace se předpokládá v oblasti zeleného zbarvení škály.



Obrázek 31: Množství parní fáze při $Q = 7 \text{ l/s}$ a $p_v = 380 \text{ kPa}$



Obrázek 32: Množství parní fáze při $Q = 13 \text{ l/s}$ a $p_v = 380 \text{ kPa}$

Pro všechny okrajové podmínky výpočtů došlo ke vzniku kavitace v předpokládaném místě přesazení otvorů obou disků. Oblast kavitace vzniklá ve spodní části otvorů byla pouze nepatrná. K jejímu kolapsu ale docházelo na předpokládaném místě a to v otvorech druhého

disku. Oblast kavitace vzniklá v horní části otvorů byla výrazně větší a zasahovala až do odtokového potrubí. Se zvyšujícím se průtokem kapaliny byla tato oblast více strhávána proudem a kolabovala v odtokovém potrubí dál po proudu.

4.9. Vyhodnocení výpočtů čtvrtého tvaru průtočné oblasti

Numerický výpočet průtočné oblasti, která byla složena ze dvou úzkých štěrbin rozdílné velikosti, byl proveden pro nestacionární vícefázové kavitační proudění. U tohoto výpočtu byla snížena hodnota intenzity turbulence výstupního profilu na 5 %.

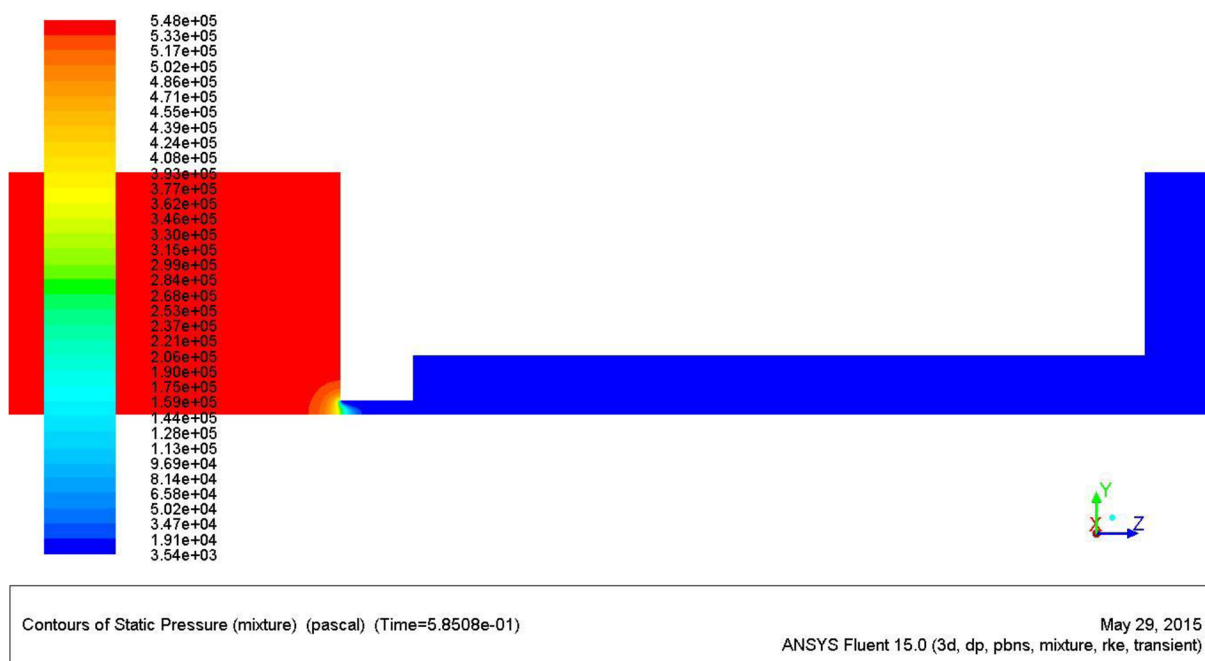
Tabulka 8: Přehled nastavení jednotlivých výpočtů

Q (l/s)	Výstupní tlak (Pa)	ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	P_{va} (Pa)
3,3	50000	998,2	0,001003	3540
3,3	180000	998,2	0,001003	3540

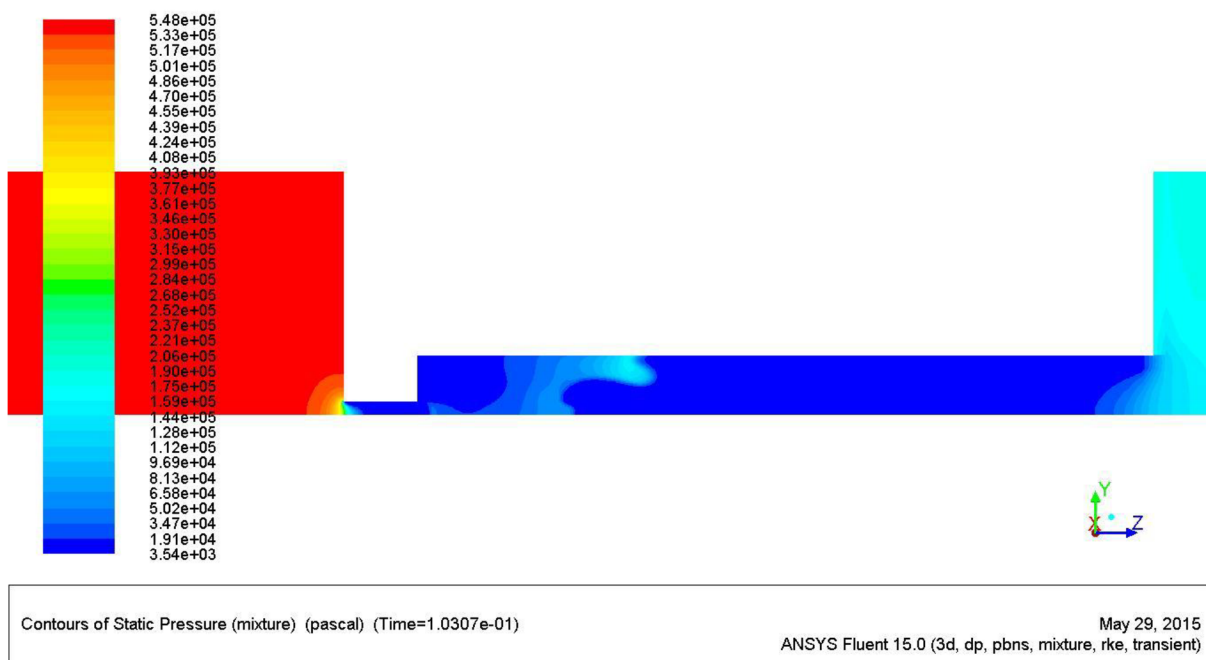
U tohoto tvaru byl předpokládán vznik kavitace v oblasti malé štěrbiny s následným kolapsem v oblasti štěrbin větší. Vzhledem k velikosti úlohy byl proveden omezený počet výpočtů. Přehled nastavení je uveden v tabulce 8. Při výpočtech tohoto tvaru nebyla dostatečně pokryta mezní vrstva u některých oblastí povrchu. Jelikož se jedná o oblasti, které nebyly přímo předmětem zkoumání, mohou být výsledky považovány za správné. Přehled hodnot y^+ jednotlivých výpočtů je uveden v tabulce 3.

4.9.1. Průběh statického tlaku

Průběh statického tlaku jednotlivých výpočtů je znázorněn na následujících obrázcích. Vizualizace byla provedena v rovině YZ.



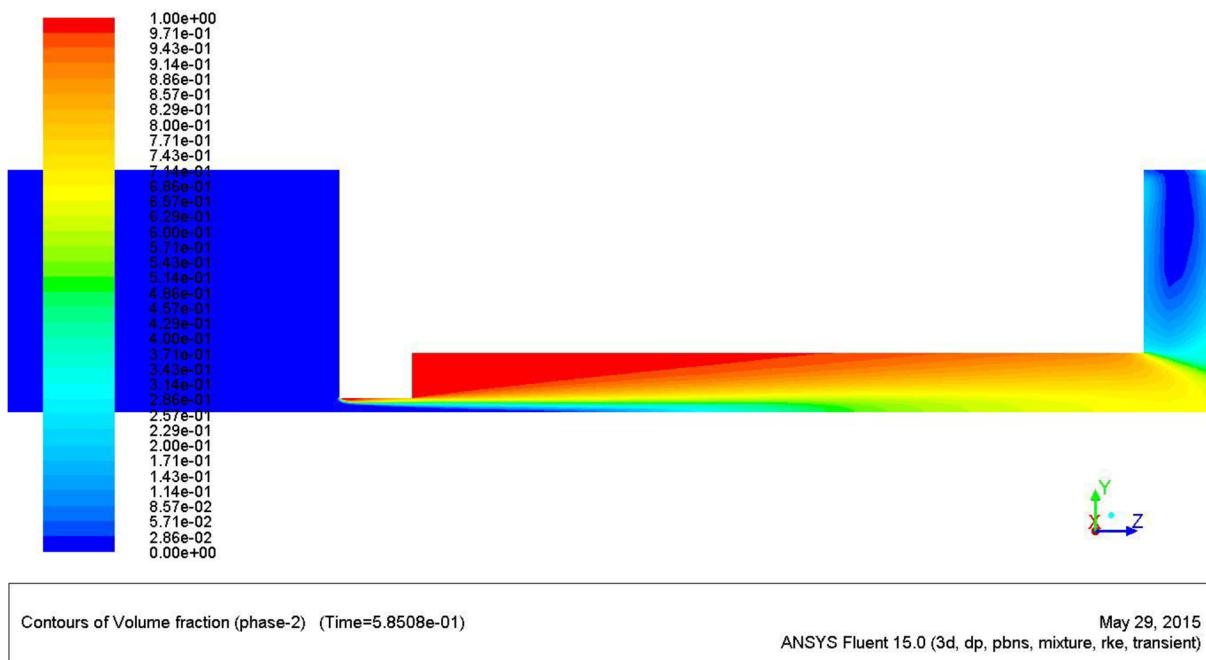
Obrázek 33: Rozložení statického tlaku pro $Q = 3,3$ l/s a $p_v = 50$ kPa



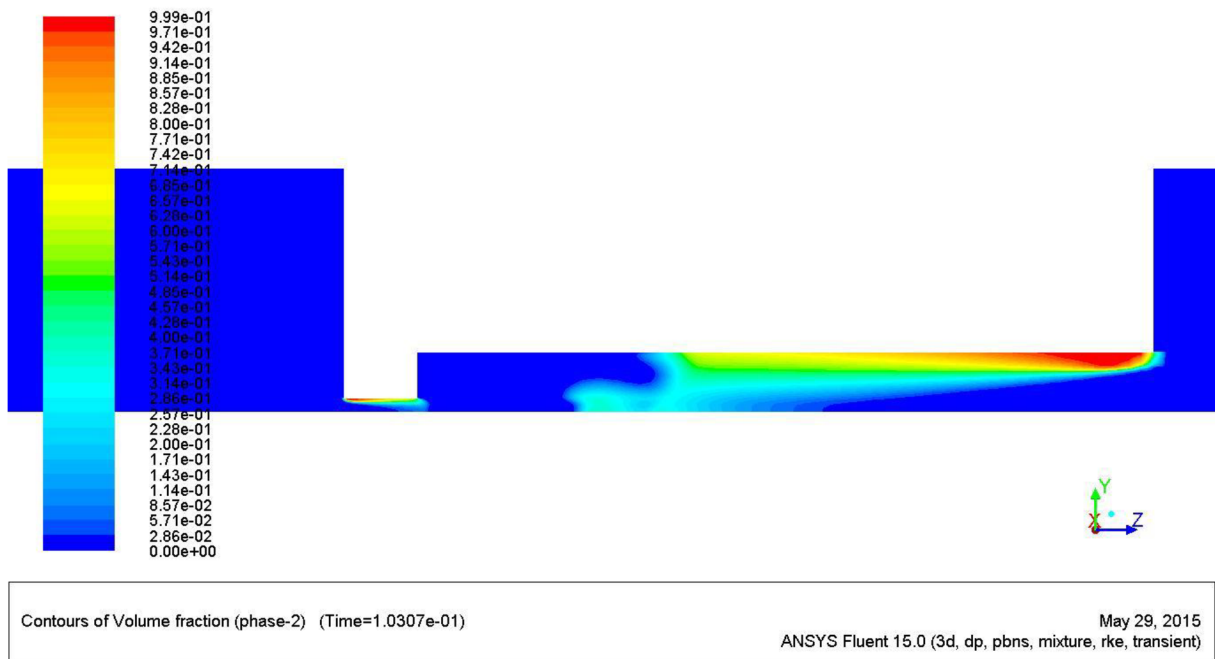
Obrázek 34: Rozložení statického tlaku pro $Q = 3,3 \text{ l/s}$ a $p_v = 180 \text{ kPa}$

4.9.2. Vizualizace kavitace

Na následujících obrázcích je zobrazen průběh kavitačního proudění. Červená barva představuje 100 % vzniklé parní fáze a modrá barva 100 % fáze kapalné. Zánik kavitace se předpokládá v oblasti zeleného zbarvení škály.



Obrázek 35: Množství parní fáze při $Q = 3,3 \text{ l/s}$ a $p_v = 50 \text{ kPa}$



Obrázek 36: Množství parní fáze při $Q = 3,3 \text{ l/s}$ a $p_v = 180 \text{ kPa}$

Pro obě nastavení okrajových podmínek vznikla kavitace na předpokládaném místě v oblasti užší štěrbin. Při výstupním tlaku $p_v = 50 \text{ kPa}$ vznikla mnohem větší kavitací oblast než při tlaku $p_v = 180 \text{ kPa}$. K jejímu kolapsu dochází na spodní straně větší štěrbin.

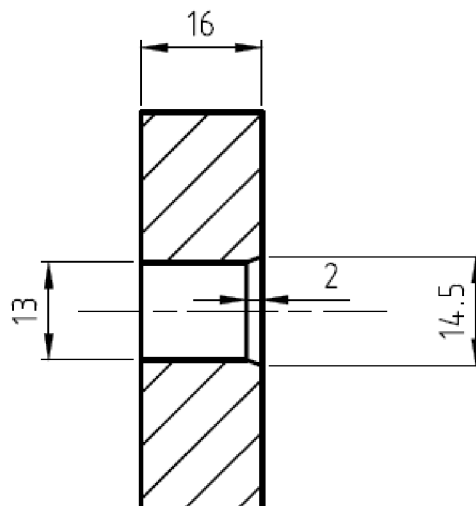
5. Experimentální zkoušky

5.1. Kavitační oblast

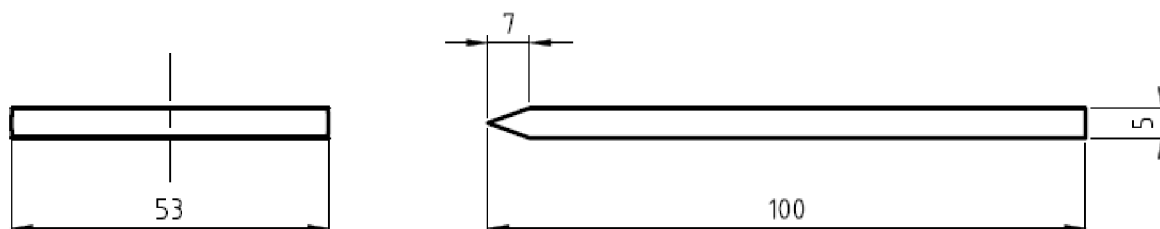
Pro experimentální studii byl zvolen třetí tvar průtočné oblasti. Vložená clona byla vyrobena s rozměry uvedenými na obrázku 38. Vzorek, který byl rozrušován kavitační erozí, byl ve tvaru lopatky s náběžnou hranou (Obrázek 39). Vzorek byl umístěn ve vzdálenosti 88,8 mm od clony.



Obrázek 37: Použitá clona, zdroj: autor



Obrázek 38: Rozměry clony



Obrázek 39: Rozměry vzorku

Pro získání rychlých výsledků nebyla zkoumána kavitační eroze přímo na navrženém vzorku, ale na tenké vrstvě potravinářského alobalu, kterou byl potažen povrch vzorku. Alobal byl připevněn na povrch vzorku pomocí oboustranné lepicí pásky značky Tesa o tloušťce 1 mm. Nanosení alobalu muselo být provedeno precizně, aby nevznikl žádný hrbolek, který by mohl ovlivnit měření. Způsob lepení je znázorněn na obrázcích níže.

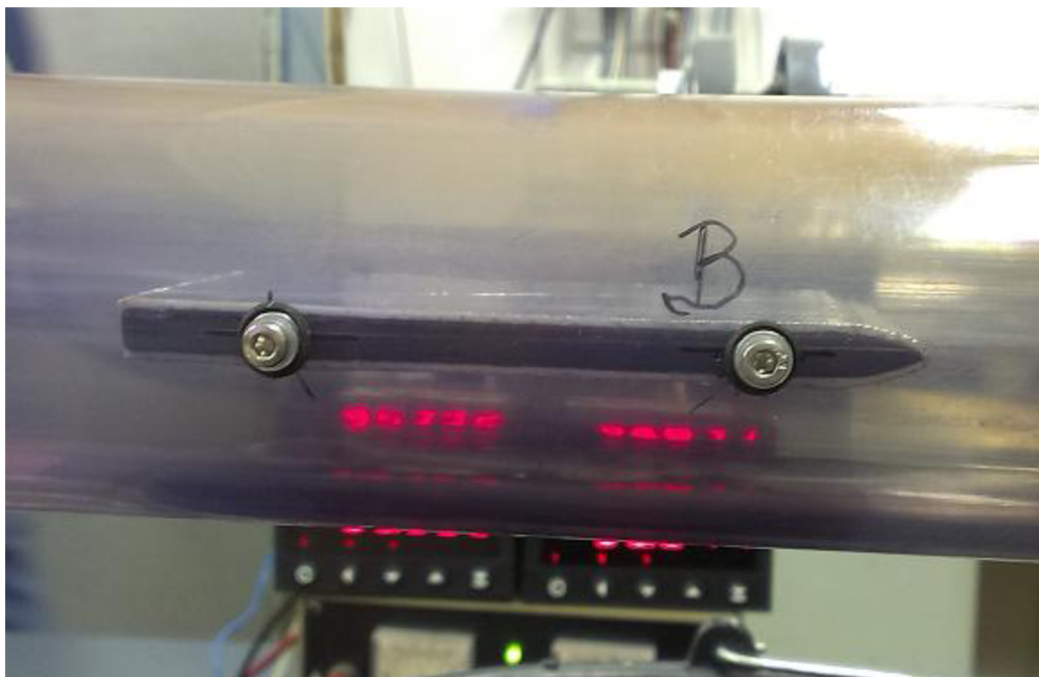


Obrázek 40: Nanesená lepicí páska na vzorku,
zdroj: autor



Obrázek 41: Povrch pokrytý alobalem, *zdroj: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.*

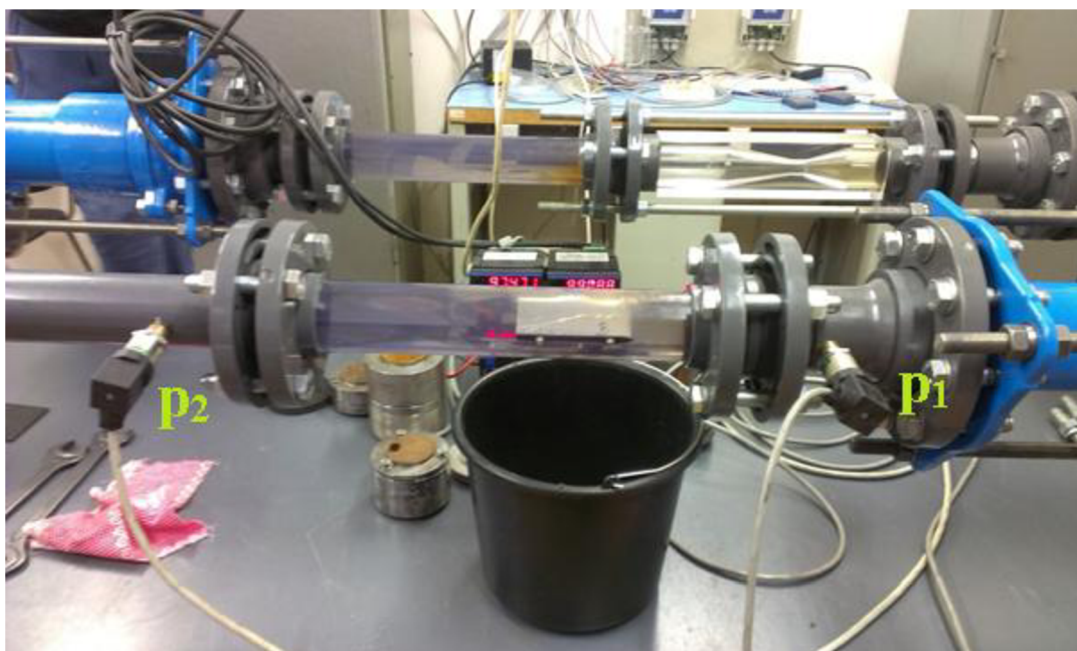
Vzorek se do průtočné oblasti uchytil přišroubováním k průhledné plastové trubce. Způsob uchycení je zobrazen na obrázku 42.



Obrázek 42: Uchycení vzorku v kavitační trati, *zdroj: autor*

5.2. Kavitační trať

Pro experimentální studii byla postavena kavitační trať, která se nachází v laboratoři hydraulických strojů Odboru fluidního inženýrství v Brně. Pro určení tlakové ztráty byly na kavitační trati umístěny dva tlakové snímače p_1 a p_2 , které zajišťovaly získání hodnoty absolutního statického tlaku. Tlakový snímač p_1 byl umístěn těsně před clonou a snímač p_2 za průtočnou oblastí. Poloha snímačů je znázorněna na obrázku 43.



Obrázek 43: Poloha tlakových snímačů, zdroj: autor

V obvodu kavitační tratě byla umístěna nádrž s vodou, škrtkovací ventily, odstředivé čerpadlo, část s magnetem, kompenzační část a vyrobená průtočná oblast. Kavitační trať je znázorněna na obrázku 44.



Obrázek 44: Kavitační trať, zdroj: autor

5.2.1. Použitá technika

Voda z nádrže byla čerpána pomocí odstředivého čerpadla DPVSF 45-40 značky DP Pumps, které zajišťovalo i regulaci průtoku.

Tabulka 9: Technické parametry odstředivého čerpadla DPVSF 45-40

Odstředivé čerpadlo DPVSF 45-40	
Maximální výkon	15 kW
Maximální průtok	45 m ³ ·h ⁻¹
Frekvence	50 Hz

Průtok byl měřen magneticko-indukčním průtokoměrem MQI 99 DN50 značky ELA. Indukční snímač byl řízen pomocí řídicí jednotky.

Tabulka 10: Technické parametry řídicí jednotky [11]

Řídicí jednotka	
Přesnost měření	0,3 % z měřené hodnoty v rozsahu 10–100 % Q _{max}
Analogový výstup	galvanicky oddělený 4–20 mA
Teplota prostředí	–20 °C až 50 °C

Tabulka 11: Technické parametry indukčního snímače průtoku [11]

Indukční snímač průtoku	
Princip řízení	pulsní DC
Maximální teplota média	90 °C
Standardní tlakové zatížení	1,6 MPa

Získání absolutních hodnot statického tlaku p_1 a p_2 zajišťoval tlakový snímač DMP 331 značky BD SENSORS s.r.o.

Tabulka 12: Technické parametry tlakového snímače DMP 331 [12]

Tlakový snímač DMP 331	
Měřicí rozsah	0–2,5 bar
Proudový výstup	0–20 mA

5.3. Průběh experimentu

Po uchycení průtočné oblasti v hydraulické trati, byla trať nejdříve zavodněna a odvzdušněna. Voda byla čerpána do kavitační trati pomocí odstředivého čerpadla a frekvenčním měničem byla regulována hodnota průtoku. Frekvenční měnič je přímo spojen s elektrickým motorem čerpadla. Měření hydraulických podmínek zajišťovali tlakové snímače

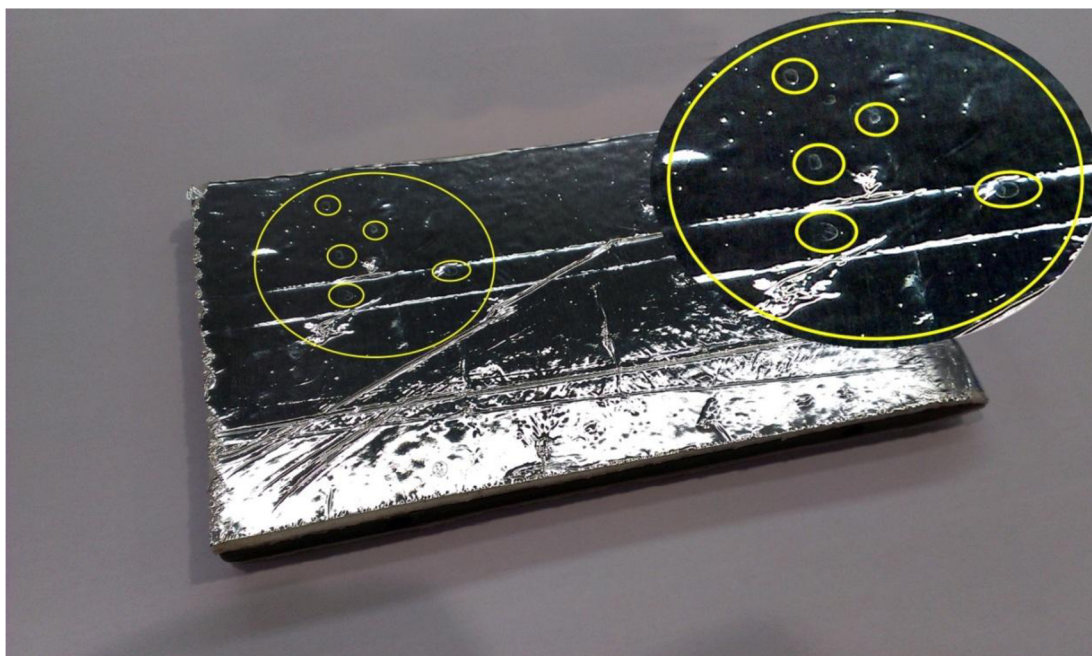
a magneticko-indukční průtokoměr. Škrťací ventily byly plně otevřeny. Za kompenzačním členem byla umístěna průtočná oblast s clonou a vzorkem. Po nastavení frekvence měniče proběhla experimentální zkouška, která trvala řádově několik sekund. Už po tak krátké době se objevily viditelné známky kavitační eroze v podobě vzniklých důlků. Po té byla trať odvodněna a kavitační oblast rozebrána, aby mohlo dojít k vyhodnocení kavitační eroze vzorku. Tento postup byl opakován pro další hodnoty frekvence a dobu působení. Přehled jednotlivých zkoušek je znázorněn v tabulce 12.

Tabulka 13: Přehled jednotlivých zkoušek

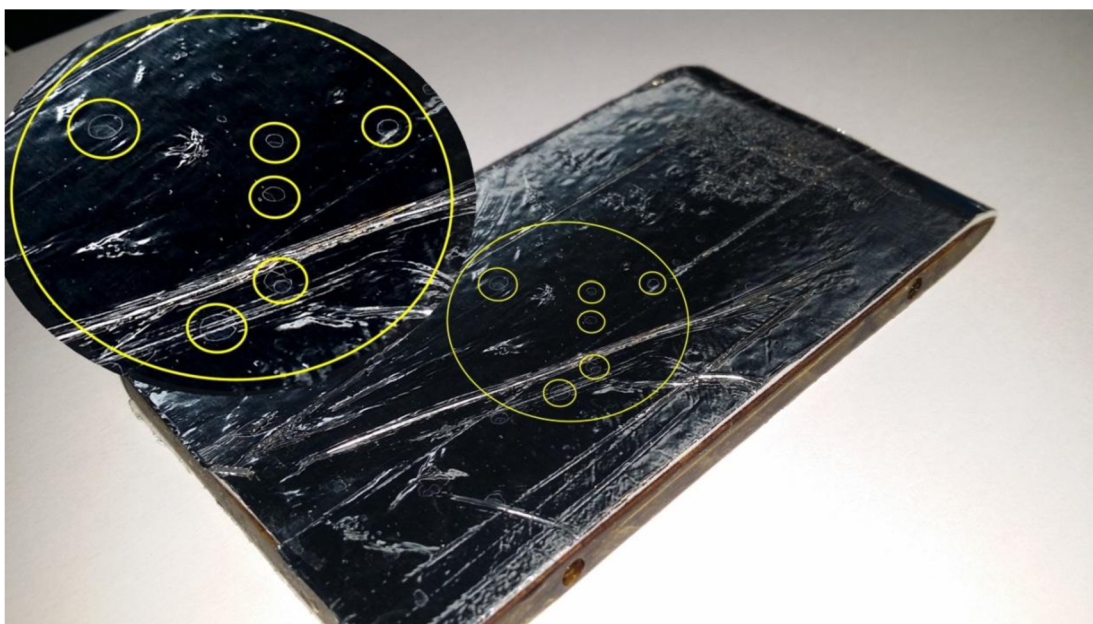
Tlak p_1 (kPa)	Tlak p_2 (kPa)	Frekvence čerpadla (Hz)	Průtok (l/s)	Doba působení (s)
682	98	40	3,08	15
837	101,8	45	3,45	15
682	68,8	40	3,12	30

5.4. Zhodnocení výsledků

Na následujících obrázcích je zobrazena kavitační eroze vzniklá na alobalu pro různé hodnoty průtoku a doby trvání. Obrázek 45 znázorňuje vzniklé důlky na spodní straně vzorku při průtoku $Q = 3,08$ l/s. Na obrázku 46 jsou zobrazeny vzniklé důlky na vrchní straně vzorku při průtoku $Q = 3,12$ l/s.

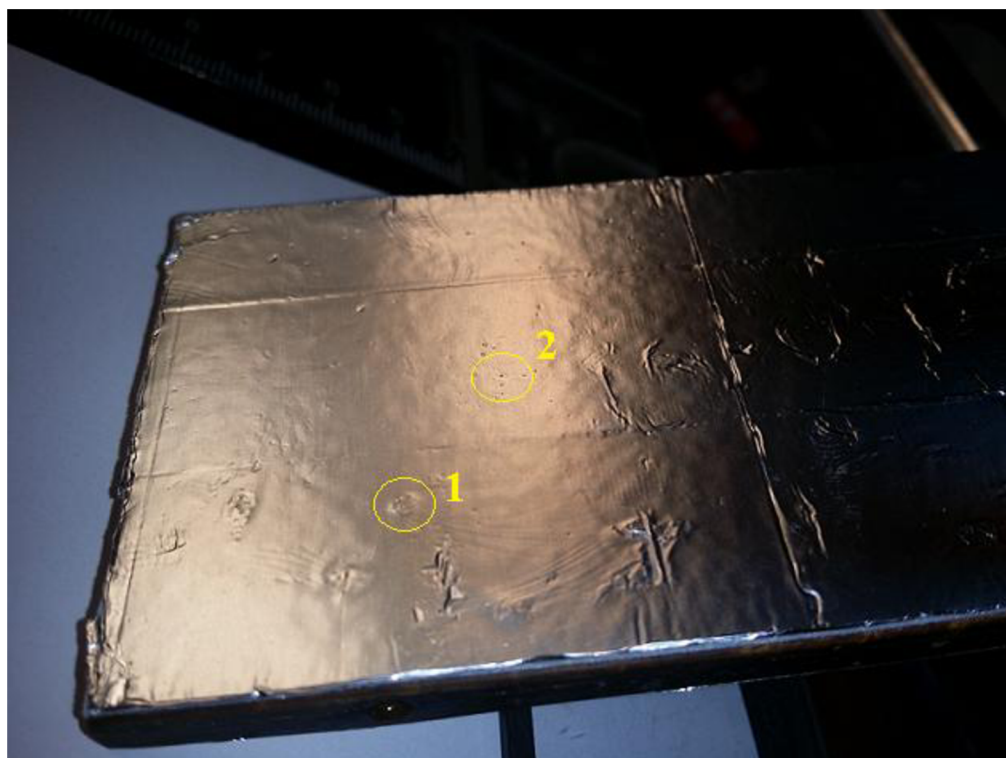


Obrázek 45: Vzorek vystavený kavitaci při průtoku $Q = 3,08$ l/s, zdroj: autor



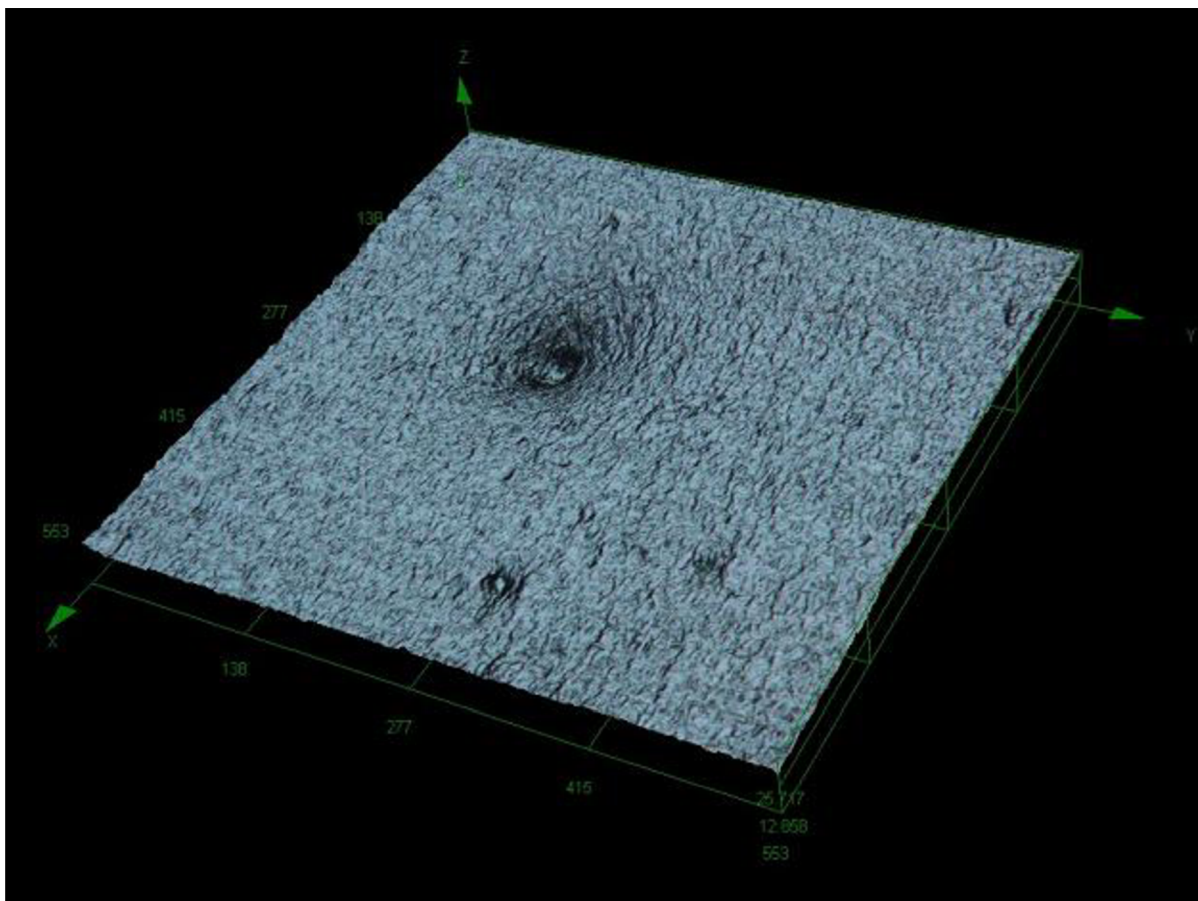
Obrázek 46: Vzorek vystavený kavitaci při průtoku $Q = 3,12 \text{ l/s}$,
zdroj: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Vzorek, který byl vystaven kavitaci nejdéle při průtoku $Q = 3,12 \text{ l/s}$, byl poskytnut pro provedení expertízy na ÚMVI. Expertíza byla provedena nasvícením vzorku a zvětšením jednotlivých kavitacních důlků pod digitálním mikroskopem Olympus DSX510. Konkrétní oblasti podrobené expertíze jsou vyznačeny na obrázku 47.

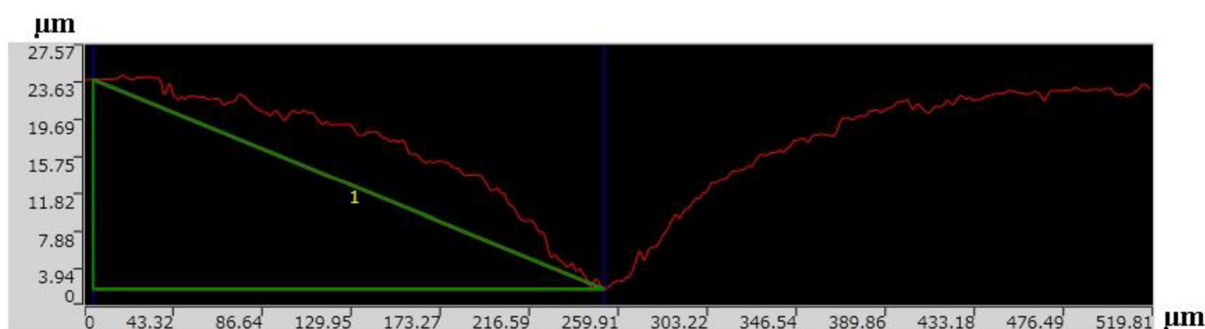


Obrázek 47: Označení oblastí podrobených expertíze,
zdroj: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Při vyhodnocení v oblasti 1 se nepodařilo nastavit dostatečně dobrou expozici, která ani při tisícinásobném zvětšení neumožnila analýzu kavitačního důlku. Zvětšený detail důlku je umístěn v příloze P1. V oblasti 2 byly vyhodnoceny dva důlky. 500x zvětšený 3D detail prvního důlku je znázorněn na obrázku 48. Po provedení analýzy byl vykreslen graf 6, který znázorňuje hloubku důlku. Největší hloubka má rozměr přibližně 21 μm .

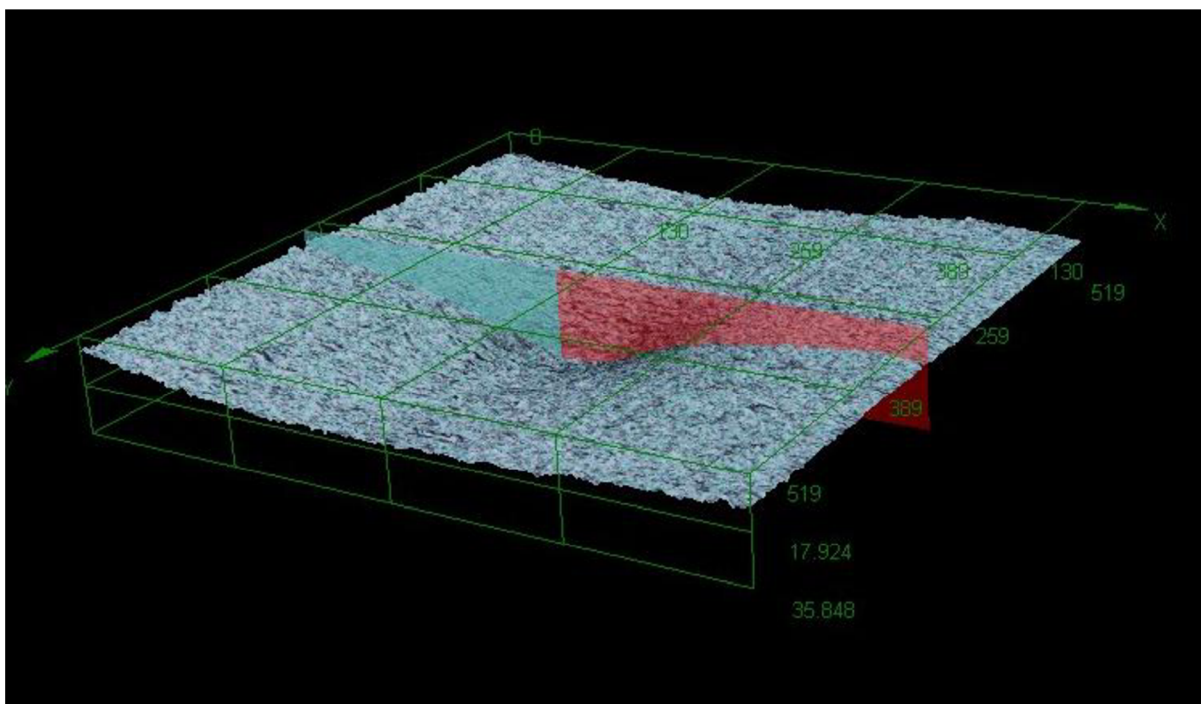


Obrázek 48: 500x zvětšený 3D detail prvního důlku, zdroj: ÚMVI

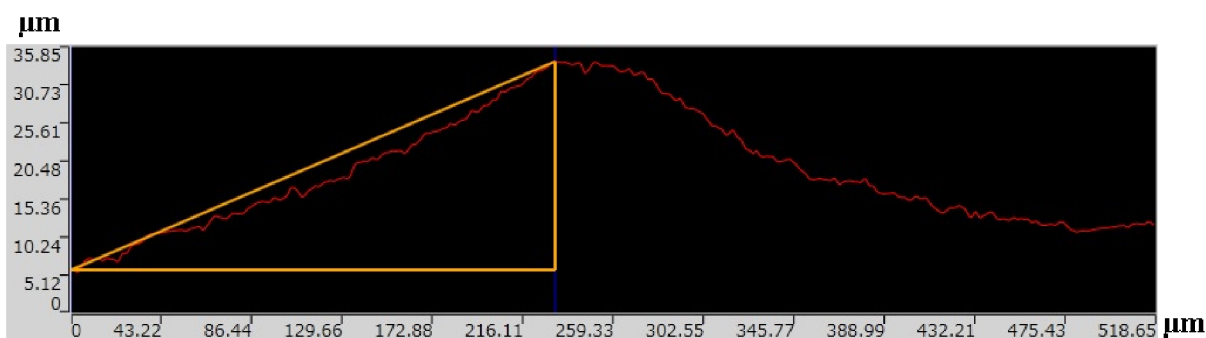


Graf 6: Hloubka prvního důlku, zdroj: ÚMVI

1000x zvětšený 3D detail druhého důlku je znázorněn na obrázku 49. Po provedení analýzy byl vykreslen graf 7, který znázorňuje hloubku důlku. Největší hloubka má rozměr přibližně 28 μm .



Obrázek 49: 1000x zvětšený 3D detail druhého důlku, zdroj: ÚMVI



Graf 7: Hloubka druhého důlku, zdroj: ÚMVI

Závěr

V úvodní části diplomové práce byl popsán vznik kavitace s jejím nejhorším projevem v podobě kavitačního opotřebení pevných těles tedy kavitační erozí. Kavitační modelování bylo popsáno v následující kapitole. Při numerickém modelování kavitačního proudění bylo využito kavitačních modelů založených na Rayleigh-Plessetově rovnici.

Hlavní část je věnována návrhu vhodného tvaru průtočné oblasti s co největší intenzitou vzniklé kavitační eroze. Na základě poznatků z hydromechaniky, kdy víme, že ke vzniku kavitace dochází v oblasti poklesu tlaku pod hodnotu tlaku nasycených par s následným kolapsem v oblasti vyššího tlaku, byly navrženy čtyři tvary průtočných oblastí. První tvar byl složen ze dvou částí. Do průtočné oblasti byla vložena klasická clona, kde byl předpokládán vznik kavitace a vzorek v podobě jednoduchého plechu tvaru kvádrů, na jehož povrchu byl předpoklad zániku kavitačních bublin. V druhé průtočné oblasti byly vloženy dva podobné disky s množstvím otvorů, které byly v těsném kontaktu. Otvory obou disků byly vzájemně přesazeny, aby došlo ke vzniku otvorů tvaru lidského oka. Vznik kavitace byl předpokládán v místě přesazení otvorů s následným kolapsem v otvorech disku umístěného dál ve směru proudu kapaliny. Třetí tvar je modifikací první průtočné oblasti. Vzorek tvaru kvádrů byl nahrazen vzorkem ve tvaru lopatky s náběžnou hranou. Byly změněny i rozměry dýzy. Do čtvrté průtočné oblasti byly navrženy dvě úzké štěrbin. Vznik kavitace byl předpokládán v oblasti užší štěrbin s následným kolapsem na stěnách štěrbin větší.

Návrh průtočných oblastí probíhal s využitím výpočtového modelování kavitačního proudění. Pro výpočet byly obdrženy základní okrajové podmínky na základě experimentů v té době již sestavené kavitační trati. Okrajové podmínky mohly být v určitém rozsahu upravovány. Pro první tvar průtočné oblasti proběhly tři výpočty. Kavitační oblast dostatečně velká, aby mohla ovlivnit vzorek erozí, byla pozorována pouze při nastavení $Q = 13 \text{ l/s}$ a $p_v = 180 \text{ kPa}$. Ke kolapsu docházelo na povrchu vzorku. Pro druhou průtočnou oblast proběhly čtyři výpočty. Při všech došlo ke vzniku kavitace na předpokládaném místě přesazení otvorů. V dolní části otvorů vznikla malá kavitační oblast, která kolabovala uvnitř otvorů podle předpokladu. Oblast kavitace, vzniklá v horní části, byla výrazně větší, ale k jejímu kolapsu docházelo až v oblasti odtokového potrubí. U výpočtů třetího tvaru průtočné oblasti došlo k divergenci úlohy a z důvodu časové náročnosti se nepodařilo modifikovat výpočet pro jeho správné provedení. Pro čtvrtý tvar průtočné oblasti proběhly dva výpočty. Při obou došlo ke vzniku kavitace v oblasti malé štěrbin. Pro $Q = 3,3 \text{ l/s}$ a $p_v = 50 \text{ kPa}$ vznikla velká kavitační oblast a k jejímu kolapsu docházelo podél povrchu větší štěrbin. Pro $Q = 3,3 \text{ l/s}$ a $p_v = 180 \text{ kPa}$ vznikla kavitační oblast podstatně menší s následným kolapsem na povrchu větší štěrbin.

Závěrečná část je věnována experimentálnímu studiu kavitačního opotřebení průtočné oblasti. Pro experiment byl vybrán a vyroben třetí navržený tvar, který byl podroben třem zkouškám při rozdílných průtocích a době působení kavitace. Už po několika sekundách se objevily viditelné známky kavitační eroze. Pro podrobnější prozkoumání vniklých důlků byl vzorek, vystavený kavitaci 30 sekund při $Q = 3,12 \text{ l/s}$, poskytnut ÚMVI pro expertízu. Expertíza byla provedena pro dvě oblasti na povrchu vzorku. Důlek v první oblasti nebylo možné dostatečně přiblížit a zanalyzovat. V druhé oblasti byla provedena úspěšná analýza dvou důlků. Po provedení analýzy bylo možno určit hloubku a šířku jednotlivých důlků. Hloubka prvního důlku měla hodnotu $21 \mu\text{m}$ a hloubka druhého $28 \mu\text{m}$.

Použité informační zdroje

Literatura

- [1] BRDIČKA, Miroslav; SAMEK, Ladislav; TARABA, Oldřich. *Kavitace: Diagnostika a technické využití*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981, 332 s.
- [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 333 s. ISBN 80-030-0206-0.
- [3] FRANC, Jean-Pierr; MICHEL, Jean-Marie. *Fundamentals of cavitation*. Boston: Kluwer Academic Publishers, c2004, xxii, 300 p. ISBN 14-020-2232-8.
- [4] KOZUBKOVÁ, Milada. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 130 s. ISBN 978-80-248-2043-9.
- [5] BRENNEN, Christopher E. *Hydrodynamics of pumps*. New York: Oxford University Press, c1994, xvi, 316 p. ISBN 0198564422x.
- [6] LI, Huiying; Frank J. KELECY; Aleksandra EGELJA-MARUSZEWSKI a Sergio A. VASQUEZ. In: *Volume 10: Heat Transfer, Fluid Flows, and Thermal Systems, Parts A, B, and C*. ASME, s. 413-423. DOI: 10.1115/IMECE2008-67450. ISBN 978-0-7918-4871-5.
- [7] RUDOLF, P.: *Modeling of Cavitating FLOW*, Sborník konference POWER SYSTEM ENGINEERING, THERMODYNAMICS&FLUID FLOW 2007, pp. 30-38, ISBN 978-80-7043-542-7
- [8] Přednáška z předmětu Výpočtové modelování proudění

Internet

- [9] ANSYS FLUENT 12.0: *Theory Guide* [online]. c2009 [cit. 13.5.2015]. Dostupné z: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/FLUENT/flth.pdf>
- [10] KRISTENSEN, J. Kalestrup; I. HANSSON a K. A. MORCH. 1978. *A simple model for cavitation erosion of metals*. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*. roč. 11, s. 899-912. DOI: 10.1088/0022-3727/11/6/009. ISSN 0022-3727. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0022-3727/11/i=6/a=009?key=crossref.632e21bdac2816806c68cf0003c20030>
- [11] MITTAL, Kashmiri L; KOHLI Rajiv. *Developments in surface contamination and cleaning*. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 9781437778304. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007XEGI6/developments-in-surface/ultrasonic-cleaning-2>
- [12] Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99. In: ELA: Měřidla pro vodárenství [online]. Brno [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.elabrno.cz/mqi_99.htm

- [13] DMP 331: stainless steel sensor. In: BD Sensors: pressure measurement [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.bdsensors.de/en/industries/energy-industry-renewable-energy/details/produkt/dmp-331/>

Obrázky

- [14] Cavitation Research Laboratory. In: Australian Maritime College [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <https://www.amc.edu.au/sites/default/files/1.jpg>
- [15] Supercavitation. In: Ervivektripathi [online]. 2010-04-26 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://ervivektripathi.blogspot.cz/2010/04/supercavitation.html>
- [16] Hydrodynamics of pumps. In: CaltechAUTHORS. [online]. 2000-01-12 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://authors.library.caltech.edu/25019/1/figs/fig604.jpg>
- [17] Cavitation. In: Soyama, Takakuwa and Aoyagi Laboratory [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.mm.mech.tohoku.ac.jp/menu10/surface/peening/Cavitation.htm>
- [18] Microdieseling and Its Effects on Oil. In: Machinery Lubrication [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29220/microdieseling-oil-effects>
- [19] BRENNEN, Christopher E. Cavitation and bubble dynamics. New York: Oxford University Press, 1995, xv, 282 p. ISBN 01-950-9409-3.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotky	Význam
$\frac{dc_p}{dt}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Zrychlení proudu
a	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu kapaliny
c_1	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu vstupujícího do kanálu
c_2	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost proudu v nejužším místě kanálu
c_r	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost na okraji víru na poloměru r
c_v	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost volného proudu
c_{vir}	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost v jádře víru na poloměru r_{vir}
d	[m]	Průměr válce
d_p	[m]	Průměr paprsku kapaliny
f	$[s^{-1}]$	Frekvence vzniku vírů
h	[m]	Výška výstupku
I	$[m^{-2} \cdot s^{-1}]$	Intenzita kavitačního opotřebení
K	[-]	Kavitační číslo
l_K	[m]	Délka kavitační oblasti
p_1	[Pa]	Tlak ve vstupu do kanálu
p_2	[Pa]	Tlak v nejužším místě kanálu
p_{kav}	[Pa]	Kavitační tlak
p_k	[Pa]	Tlak v okolní kapalině
p_w	[Pa]	Tlak nasycených par
p_{vir}	[Pa]	Tlak uvnitř víru
Q	$[l \cdot s^{-1}]$	Průtok
r	[m]	Poloměr na okraji víru
r_{B0}	[m]	Velký počáteční poloměr bubliny
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
r_{vir}	[m]	Poloměr v jádře víru
S_r	[-]	Strouhalovo číslo
t	[s]	Čas

Symbol	Jednotky	Význam
V_j	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlost paprsku kapaliny
ΔG	kg	Úbytek hmotnosti materiálu
Δp	[Pa]	Změna tlaku
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota kapaliny
τ	[s]	Časové období
τ_0	[s]	Inkubační doba
x	[m]	Délka zrychlovaného sloupce kapaliny

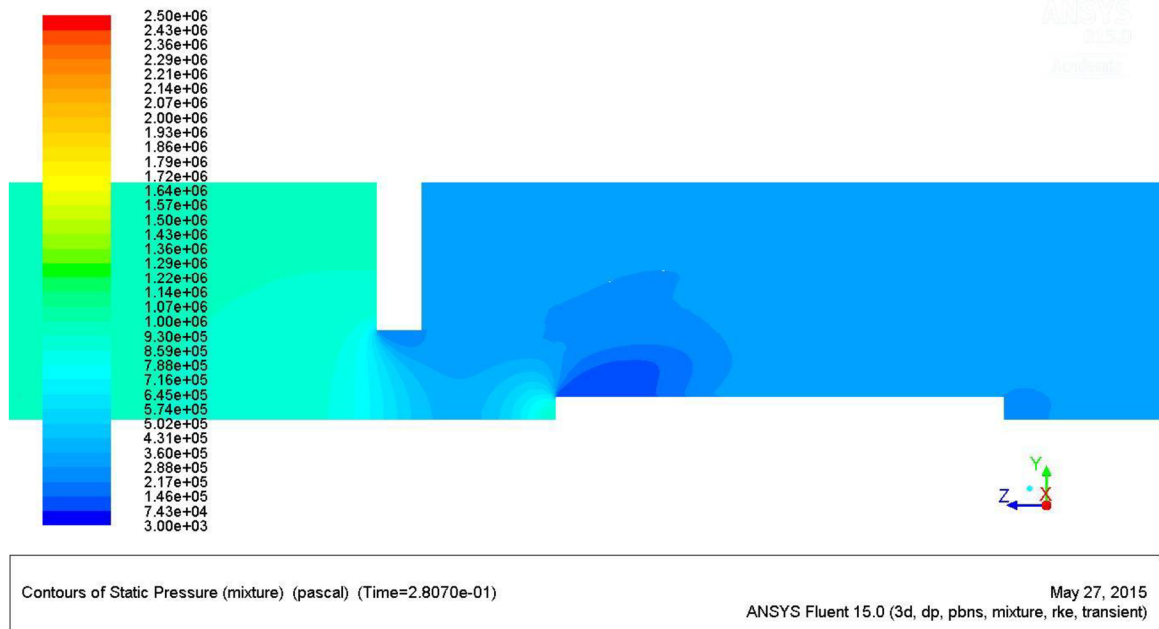
Zkratky

CFD Computational Fluid Dynamics

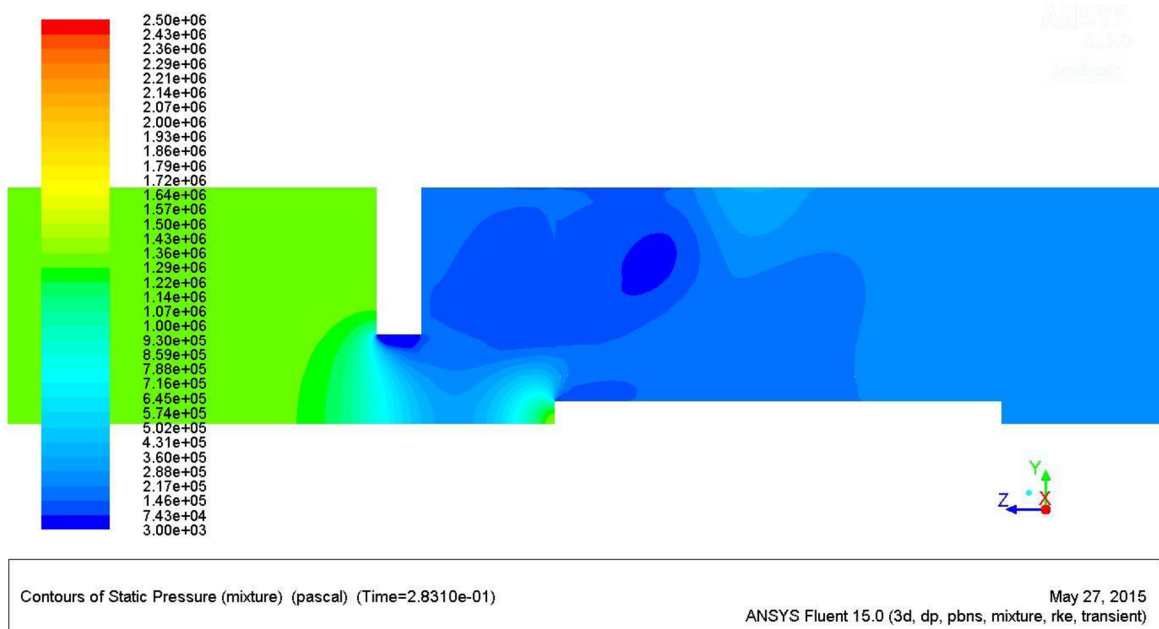
Seznam příloh

Příloha P1

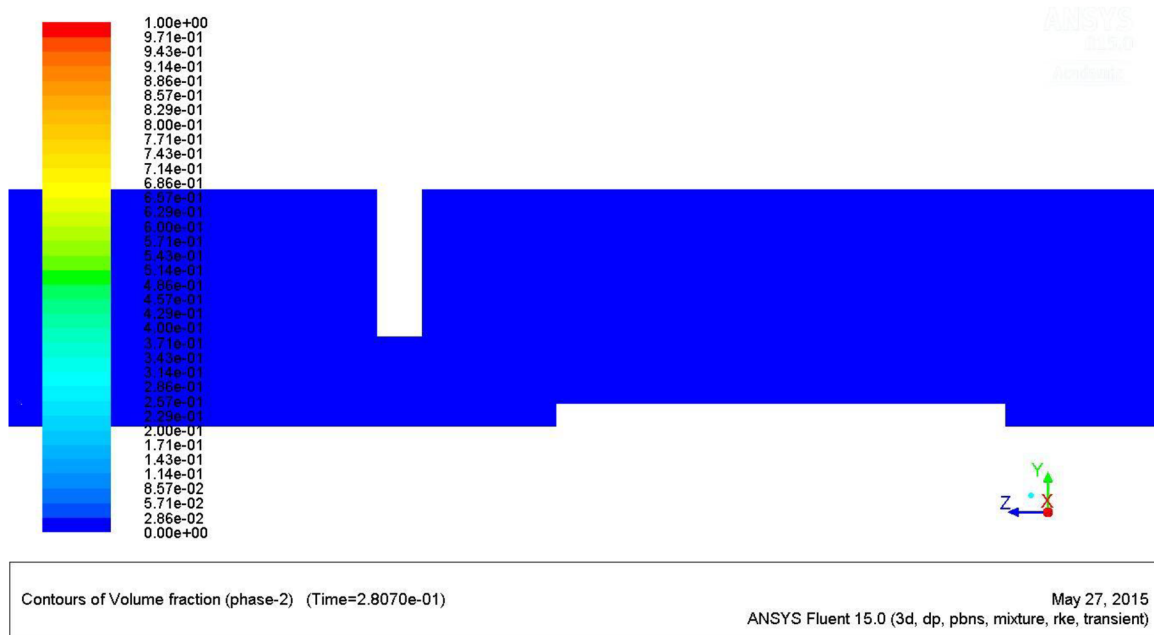
Příloha P1



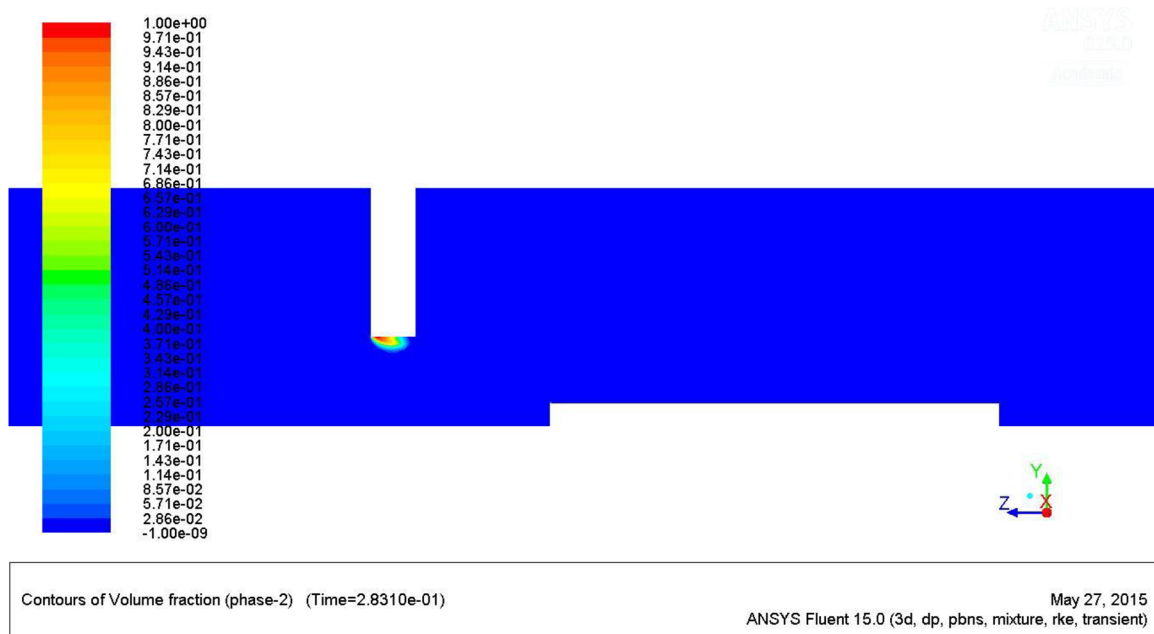
Obrázek 50: Rozložení statického tlaku prvního tvaru průtočné oblasti pro $Q = 7$ l/s a $p_v = 380$ kPa



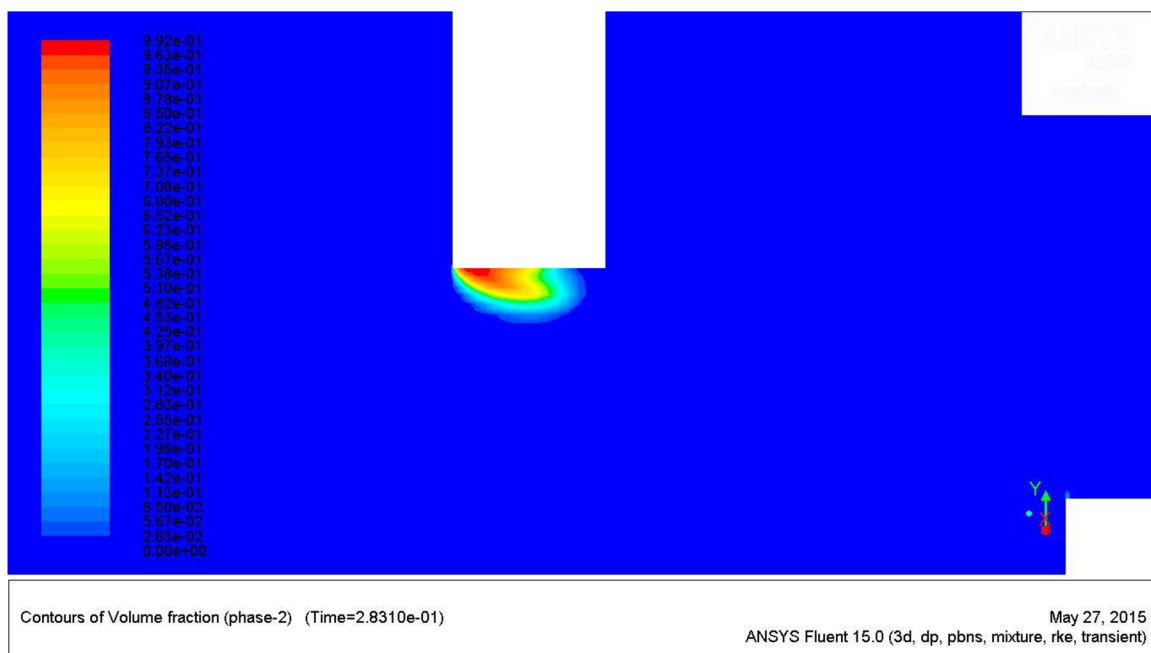
Obrázek 51: Rozložení statického tlaku prvního tvaru průtočné oblasti pro $Q = 10$ l/s a $p_v = 280$ kPa



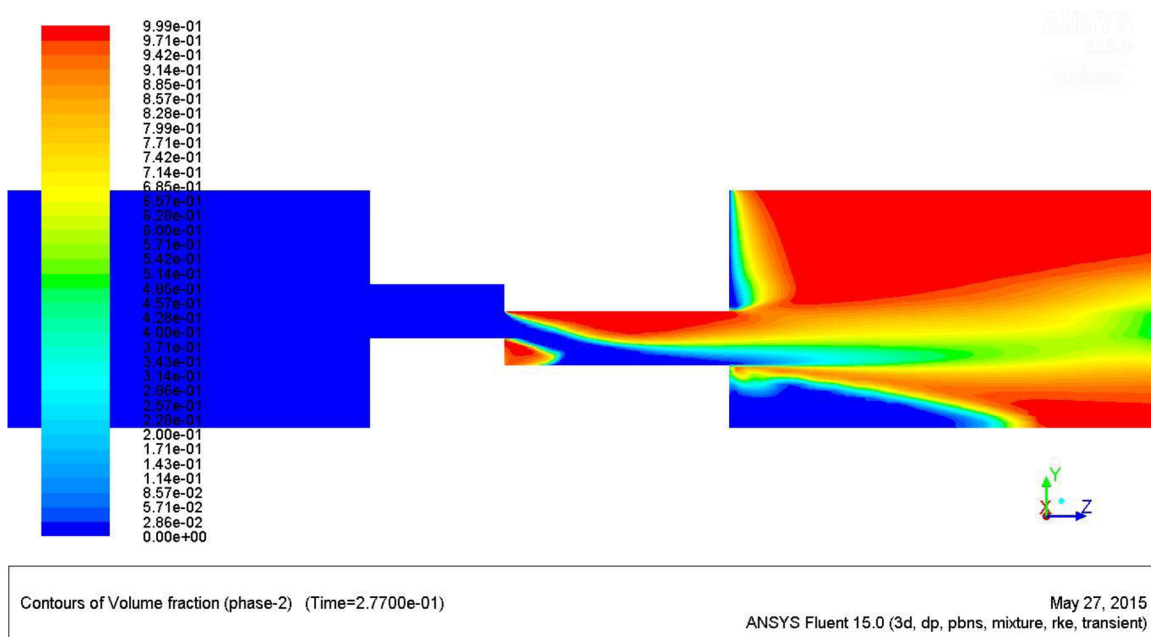
Obrázek 52: Množství parní fáze prvního tvaru průtočné oblasti při $Q = 7$ l/s a $p_v = 380$ kPa



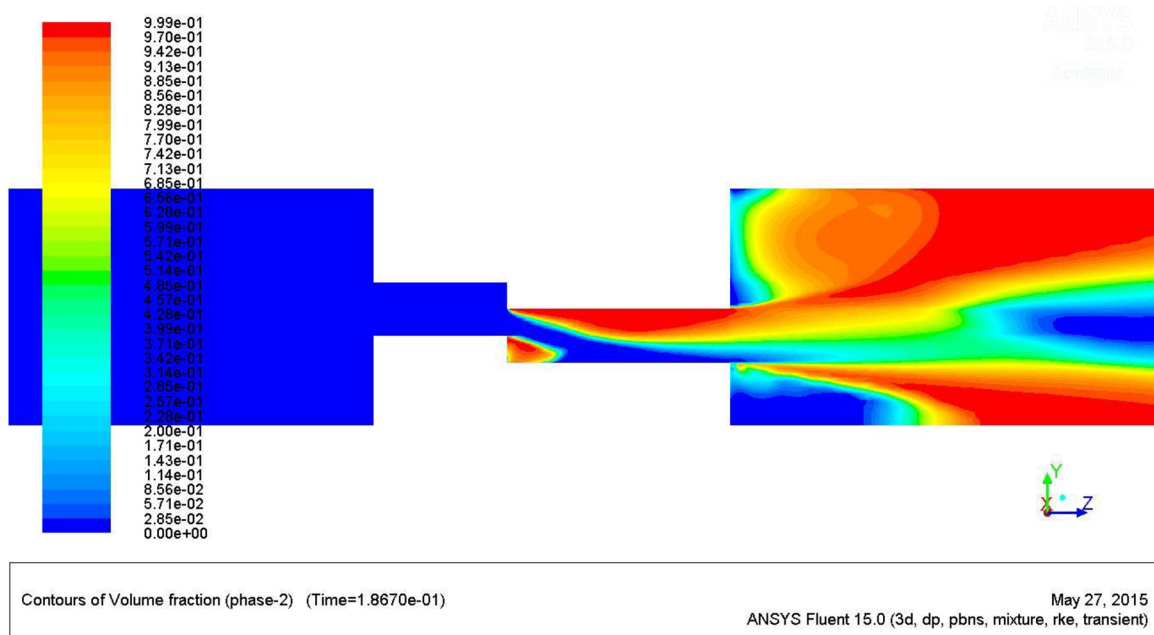
Obrázek 53: Množství parní fáze prvního tvaru průtočné oblasti při $Q = 10$ l/s a $p_v = 280$ kPa



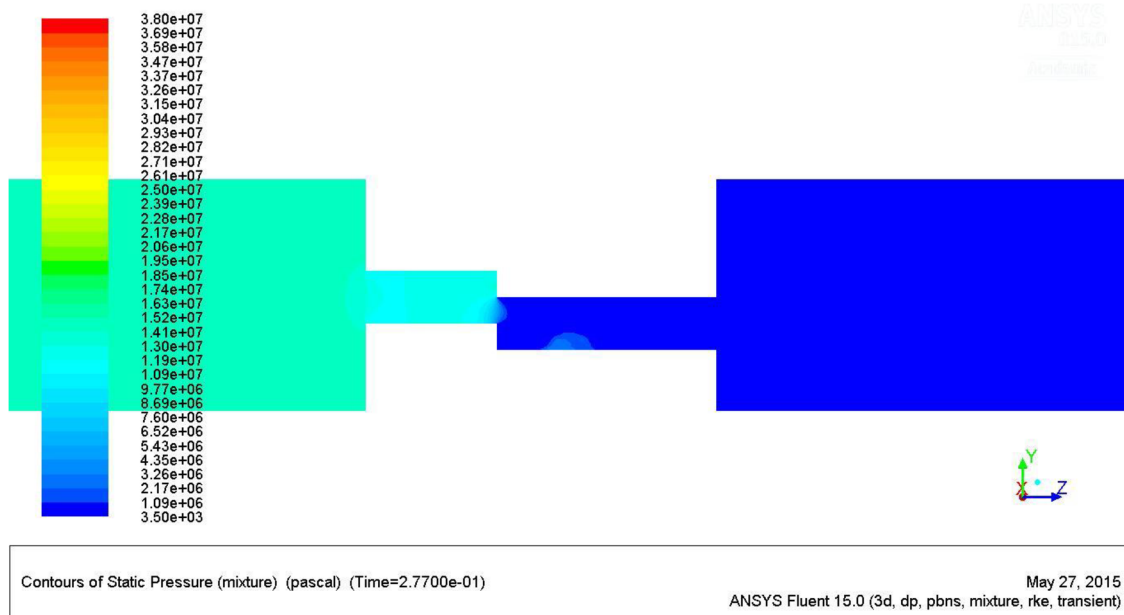
Obrázek 54: Detailní pohled na vzniklou kavitaci prvního tvaru průtočné oblasti při $Q = 10 \text{ l/s}$ a $p_v = 280 \text{ kPa}$



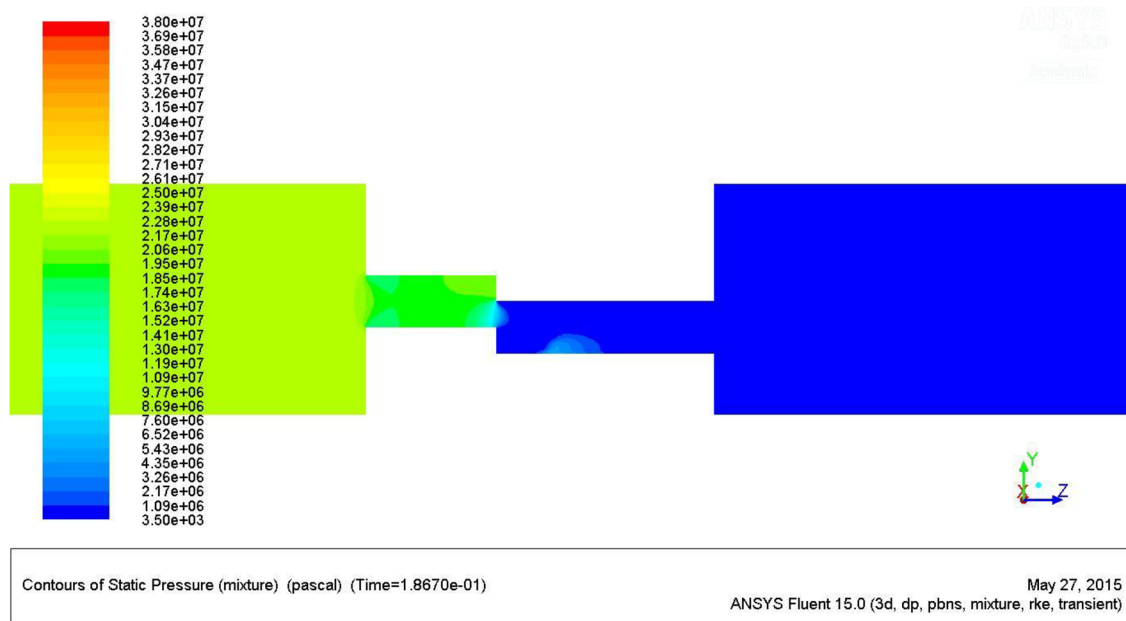
Obrázek 55: Množství parní fáze druhého tvaru průtočné oblasti při $Q = 8 \text{ l/s}$ a $p_v = 380 \text{ kPa}$



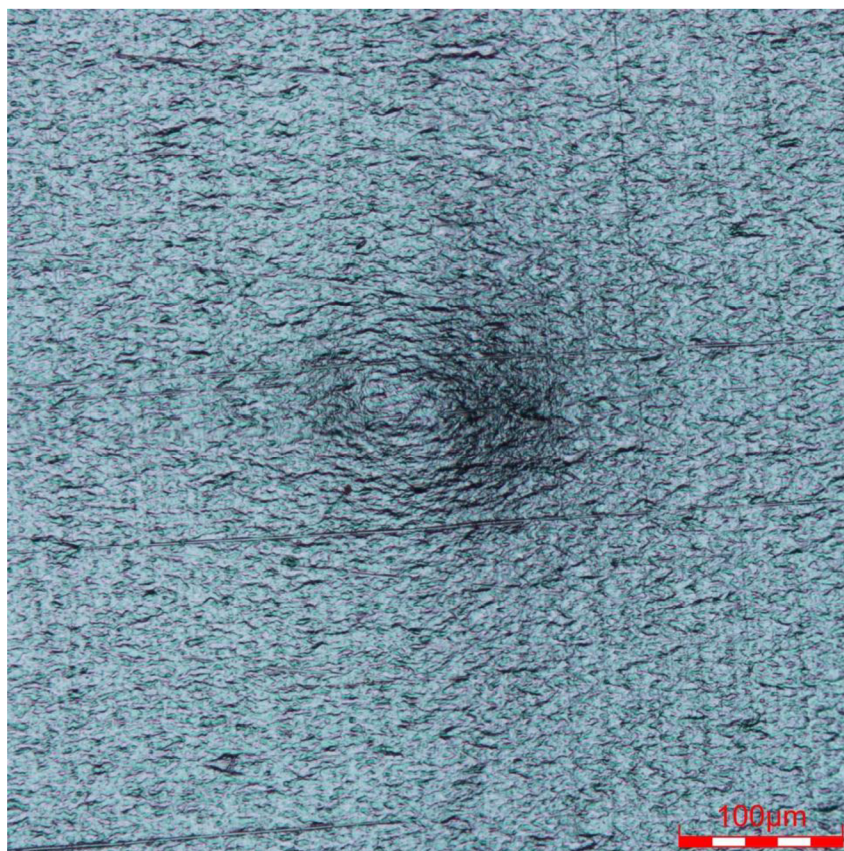
Obrázek 56: Množství parní fáze při druhého tvaru průtočné oblasti $Q = 10 \text{ l/s}$
a $p_v = 380 \text{ kPa}$



Obrázek 57: Rozložení statického tlaku druhé průtočné oblasti pro $Q = 8 \text{ l/s}$
a $p_v = 380 \text{ kPa}$



Obrázek 58: Rozložení statického tlaku druhé průtočné oblasti pro $Q = 10 \text{ l/s}$
a $p_v = 380 \text{ kPa}$



Obrázek 59: 1000x zvětšený detail důlku v první oblasti, zdroj:
ÚMVI