

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní
DRTA sondy pomocí numerických simulací

MASTER THESIS

Improvement of thermodynamic properties of a high-speed
DRTA probe by numerical simulations

Autor práce: Bc. Josef Krubner

Vedoucí práce: Ing. Michal Schmirler, Ph.D.

Konzultant: doc. Ing. Jan Halama, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Krubner Jméno: Josef Osobní číslo: 473541
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající katedra/ústav: Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Studijní program: Aplikované vědy ve strojném inženýrství
Specializace: Matematické modelování v technice

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací

Název diplomové práce anglicky:

Improvement of thermodynamic properties of a high-speed DRTA probe by numerical simulations

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište problematiku měření teplot plynů proudících při vysokých podzvukových rychlostech, tedy s uvažováním jejich stlačitelnosti.
 - 2) Popište princip fungování v názvu zmiňované DRTA sondy. Představte geometrii sondy, která bude výchozí pro další kroky v rámci návrhu zlepšení jejich termodynamických vlastností.
 - 3) Popište CFD model, který budete pro simulaci termodynamických vlastností sondy používat (fyzikální model, okrajové podmínky, numerické schéma, způsoby diskretizace atd.).
 - 4) Proveďte simulace vlivu jednotlivých vybraných konstrukčních úprav na termodynamické parametry sondy (hodnoty restitučních faktorů v závislosti na rychlosti nabíhajícího proudu, směrová citlivost, rozložení proudového a teplotního pole atd.)
 - 5) Na základě výsledků provedených numerických simulací vyberte nejvhodnější geometrii sondy a vyhodnoťte její termodynamické vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce či konzultanta.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Michal Schmirler, Ph.D. ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Halama, Ph.D. ústav technické matematiky FS

Datum zadání diplomové práce: **25.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce:

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucího ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací“ vypracoval samostatně. Veškerá použitá literatura a podkladové materiály jsou uvedeny v přiloženém seznamu literatury.

V Praze, dne

.....

Josef Krubner

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Schmirlerovi, Ph.D. a doc. Ing. Janu Halamovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi byly nápomocny při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a své přítelkyni za podporu při studiu.

Anotační list

Název práce:	Zlepšení termodynamických vlastností vysokorychlostní DRTA sondy pomocí numerických simulací
Title:	Improvement of thermodynamic properties of a high-speed DRTA probe by numerical simulations
Autor:	Bc. Josef Krubner
Studijní program:	Aplikované vědy ve strojním inženýrství
Druh práce:	Diplomová
Vedoucí práce	Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
Konzultant	doc. Ing. Jan Halama, Ph.D.
Abstrakt:	TODO
Abstract:	TODO
Klíčová slova:	návrh sondy pro měření rychlosti, měření rychlosti plynů, podzvukové proudění, restituční faktor, restituční teplota, CFD simulace
Keywords:	velocimetry probe design, gas velocimetry, subsonic flow, recovery factor, recovery temperature, CFD simulation

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	8
Seznam symbolů	8
Seznam zkratek	8
Seznam použitých indexů	9
Seznam obrázků	9
1 Úvod	11
2 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech	12
2.0.1 Dynamický ohřev	12
2.0.2 Restituční faktor	12
2.1 Dynamická teplota	12
3 DRTA sonda	13
3.1 Princip fungování	13
3.1.1 Víceprvková sonda	13
3.2 Výchozí geometrie	13
3.3 Cíle numerických simulací	13
4 CFD model	14
4.1 Základní systém rovnic	14
4.1.1 Rovnice kontinuity	14
4.1.2 Pohybová rovnice	14
4.1.3 Energetická rovnice	14
4.1.4 Konstitutivní vztahy	14
4.2 Model turbulence	15
4.3 Výpočetní geometrie	16
4.3.1 Výpočetní oblast	16
4.3.2 Využití symetrie	17
4.3.3 Materiály	18
4.4 Okrajové podmínky	19
4.4.1 Hranice výpočetní oblasti	19
4.4.2 Stěny	19
4.5 Výpočetní síť	20
4.5.1 Povrchová síť	20
4.5.2 Zjemnění v mezní vrstvě	20
4.5.3 Objemová síť	21
4.6 Numerický řešič	22

4.6.1	Metoda konečných objemů	22
4.6.2	Odhad gradientu	22
4.6.3	Aproximace hodnot na stěnách	22
4.6.4	Numerické schéma	22
5	CFD analýza konstrukčních úprav	23
5.1	Studie citlivosti výpočetní sítě	23
5.2	Sonda bez stínění čidla B	23
5.2.1	Chování při různých rychlostech proudění	23
5.2.2	Směrová citlivost v rovině symetrie	23
5.2.3	Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie	23
5.3	Sonda se stíněním čidla B	24
5.4	Sonda s rozšířeným stíněním čidla B	25
5.4.1	Chování při různých rychlostech proudění	25
5.4.2	Směrová citlivost v rovině symetrie	26
5.4.3	Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie	26
5.5	Vliv průměru stínění čidla B	27
5.6	Vliv průměru stínění čidla A	28
5.7	Vliv polohy odvětrání čidla A	29
5.8	Vliv průměru odvětrání čidla A	30
5.9	Vliv přidání divergentního vstupu pro čidlo A	31
5.10	Vliv přidání kavity do stínění čidla A	32
5.11	Vliv přidání kavity do stínění čidla B	33
5.12	Vliv materiálu trubice sondy	34
6	Návrh a analýza finální geometrie	35
6.1	Návrh konstrukčních úprav	35
6.1.1	Čidlo A	35
6.1.2	Čidlo B	35
6.1.3	Materiál	35
6.2	CFD analýza	35
6.2.1	Chování při různých rychlostech proudění	35
6.2.2	Směrová citlivost v rovině symetrie	35
6.2.3	Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie	35
7	Závěr	36
	Seznam použité literatury	37

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam symbolů

a	ms^{-1}	Rychlosť zvuku
c_p	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
E	1	Korekční koeficient
h	Jkg^{-1}	Měrná entalpie
I	1	Intenzita turbulence
K	1	Korekční součinitel
κ	1	Poissonova konstanta
Ma	1	Machovo číslo
μ	Pas	Dynamická viskozita
ν	m^2s^{-1}	Kinematická viskozita
p_c	Pa	Celkový tlak
Pr	1	Prandtlovo číslo
p_s	Pa	Statický tlak
q	Jkg^{-1}	Měrné teplo
q_{dyn}	Pa	Dynamický tlak
q_{kin}	Pa	Kinetický tlak
r	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná plynová konstanta
r/r^*	1	Recovery faktor
Re	1	Reynoldsovo číslo
ρ	kgm^{-3}	Hustota
T	K	Termodynamická teplota
T_{kal}	K	Teplota podle kalibračního polynomu
T_r	K	Recovery teplota
u	ms^{-1}	Rychlosť proudenia
U	V	Elektrické napäť

Seznam zkratok

CCD	Charge-Coupled Device
EFV	Elastic Filament Velocimetry
Holo-PIV	Holographic Particle Image Velocimetry
HWA	Hot Wire Anemometry
ICCD	Intensified Charge-Coupled Device
LDD	Laser Doppler Detection
LPT	Lagrangian Particle Tracking
OTV	Ozone Tagging Velocimetry
PIV	Particle Image Velocimetry
Scan-PIV	Scanning Particle Image Velocimetry
Tomo-PIV	Tomographic Particle Image Velocimetry

Seznam indexů

A	Sonda A
B	Sonda B
i	Stupeň iterace
∞	Nabíhající proud vzduchu
0	Stagnační
1	Před dýzou
2	Za dýzou

Seznam obrázků

3.2.1 Výchozí geometrie DRTA sondy	13
4.3.1 Výpočetní oblast s vyznačením souřadného systému a polohy měřených geometrií	16
4.3.2 Výpočetní oblast pro řešení symetrických úloh	17
4.4.1 Části hranice pro aplikování okrajových podmínek (v jednotlivých obrázcích označeny žlutou barvou)	19
4.5.1 Graf četnosti hodnot bezrozměrné vzdálenosti od stěny čidla A pro úlohu z kapitoly 5.6. Průměrná hodnota je pro tento případ rovna 0.945.	21
5.2.1 Sonda bez stínění čidla B	23
5.2.2 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na rychlosti proudění	24
5.2.3 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení sondy v rovině symetrie	24
5.2.4 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie	25
5.3.1 Sonda se stíněním čidla B	25
5.4.1 Sonda se stíněním čidla B	26
5.4.2 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na rychlosti proudění	26
5.4.3 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení sondy v rovině symetrie	27
5.4.4 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie	27
5.5.1 Stínění čidla B	28
5.5.2 Závislost restitučního faktoru čidla B na průměru stínění	28
5.6.1 Stínění čidla A	29
5.6.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru stínění	29

5.7.1 Závislost restitučního faktoru čidla A na poloze odvětrání	30
5.8.1 Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru odvětrání	30
5.9.1 Čidlo A s divergentním vstupem	31
5.9.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na vrcholovém úhlu divergentního vstupu	31
5.10.1 Čidlo A s přidanou kavitou do stínění	32
5.10.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na tloušťce kavity uvnitř stínění .	32
5.11.1 Čidlo B s přidanou kavitou do stínění	33
5.11.2 Závislost restitučního faktoru čidla B na tloušťce kavity uvnitř stínění .	33

1 Úvod

Problematika měření rychlosti proudění tekutin je velice rozsáhlým vědním oborem a můžeme zde nalézt mnoho postupů a metodik, které se postupně vyvíjejí.

2 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech

2.0.1 Dynamický ohřev

2.0.2 Restituční faktor

2.1 Dynamická teplota

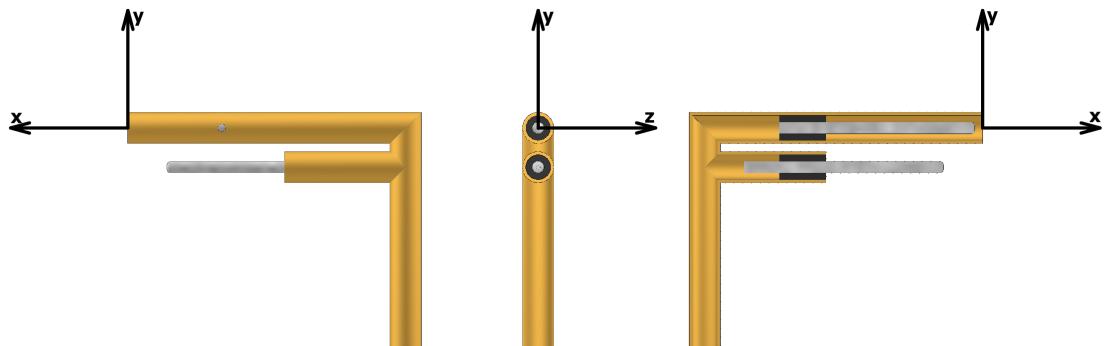
3 DRTA sonda

3.1 Princip fungování

3.1.1 Víceprvková sonda

3.2 Výchozí geometrie

Zkoumaná sonda se skládá z dvou odporových teplotních čidel Pt100 (model *1PT100K2515*) o průměru 1.5 [mm] a délce 25 [mm]. Ty jsou umístěny rovnoběžně ve směru proudění pomocí těsnění na jejich koncích, ukotveného v mosazné trubici o průměru 4 mm a tloušťce 0.4 mm, která je využita zároveň k dosažení rozdílu restitučních faktorů jednotlivých čidel. Prostorové uspořádání sestavy je patrné z obrázku 3.2.1. Vyšším restitučním faktorem disponuje čidlo umístěné uvnitř trubice a dále v práci o něm bude hovořeno jako o čidlu A. Proudění stíněním čidla A umožňuje dva odvětrávací otvory umístěné 12 mm od vstupu do trubice. Čidlo umístěné volně v proudícím médiu vykazuje nižší restituční faktor a bude dále značeno jako čidlo B.



Obrázek 3.2.1: Výchozí geometrie DRTA sondy.

3.3 Cíle numerických simulací

4 CFD model

Během výpočtů jsem pracoval s předpokladem stacionárního vazkého proudění ideálního plynu, od čehož se odvíjí i forma níže uvedených rovnic.

4.1 Základní systém rovnic

4.1.1 Rovnice kontinuity

Zákon zachování hmotnosti je pro stlačitelné stacionární proudění popsán následující rovnicí:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.1.1)$$

kde $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ je hustota a $\vec{u} \left[\frac{m}{s^2} \right]$ je rychlosť proudění.

4.1.2 Pohybová rovnice

Přenos hybnosti je popsán Navier-Stokesovými rovnicemi pro stacionární proudění:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{f} \quad (4.1.2)$$

kde $p [Pa]$ je statický tlak, $\vec{f} \left[\frac{N}{m^3} \right]$ je vektor vnějších sil a $\vec{\tau} \left[\frac{N}{m^2} \right]$ je tenzor vazkých napětí daný následujícím vztahem:

$$\vec{\tau} = \mu \left[\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) I \right] \quad (4.1.3)$$

kde $\mu [Pa \cdot s]$ je dynamická viskozita a $I [1]$ je jednotková matice.

4.1.3 Energetická rovnice

Řešení stlačitelného proudění vyžaduje doplnění energetické rovnice, kterou lze zapsat následovně:

$$\nabla \left(\rho \vec{u} H + \vec{q} - \vec{\tau} \cdot \vec{u} \right) = 0 \quad (4.1.4)$$

kde $H \left[\frac{J}{kg} \right]$ je celková měrná entalpie a $\vec{q} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ je vektor tepelného toku.

4.1.4 Konstitutivní vztahy

Stavová rovnice ideálního plynu

Rovnice popisuje vazbu mezi stavovými veličinami tekutiny:

$$\frac{p}{\rho} = rT \quad (4.1.5)$$

kde $T [K]$ je termodynamická teplota a $r \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ je měrná plynová konstanta, pro vzduch rovna $287.2 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$.

Celková měrná entalpie

Měrnou entalpii proudění $h \left[\frac{J}{kg} \right]$ lze určit ze vztahu:

$$h = c_p T = e + \frac{p}{\rho} = c_v T + \frac{p}{\rho} \quad (4.1.6)$$

kde c_p , $c_v \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ jsou měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku, resp. konstantního objemu a $e \left[\frac{J}{kg} \right]$ je měrná energie. Přičtením měrné kinetické energie proudění dostaváme celkovou měrnou entalpii H :

$$H = h + \frac{\| \vec{u} \|^2}{2} \quad (4.1.7)$$

4.2 Model turbulence

TODO

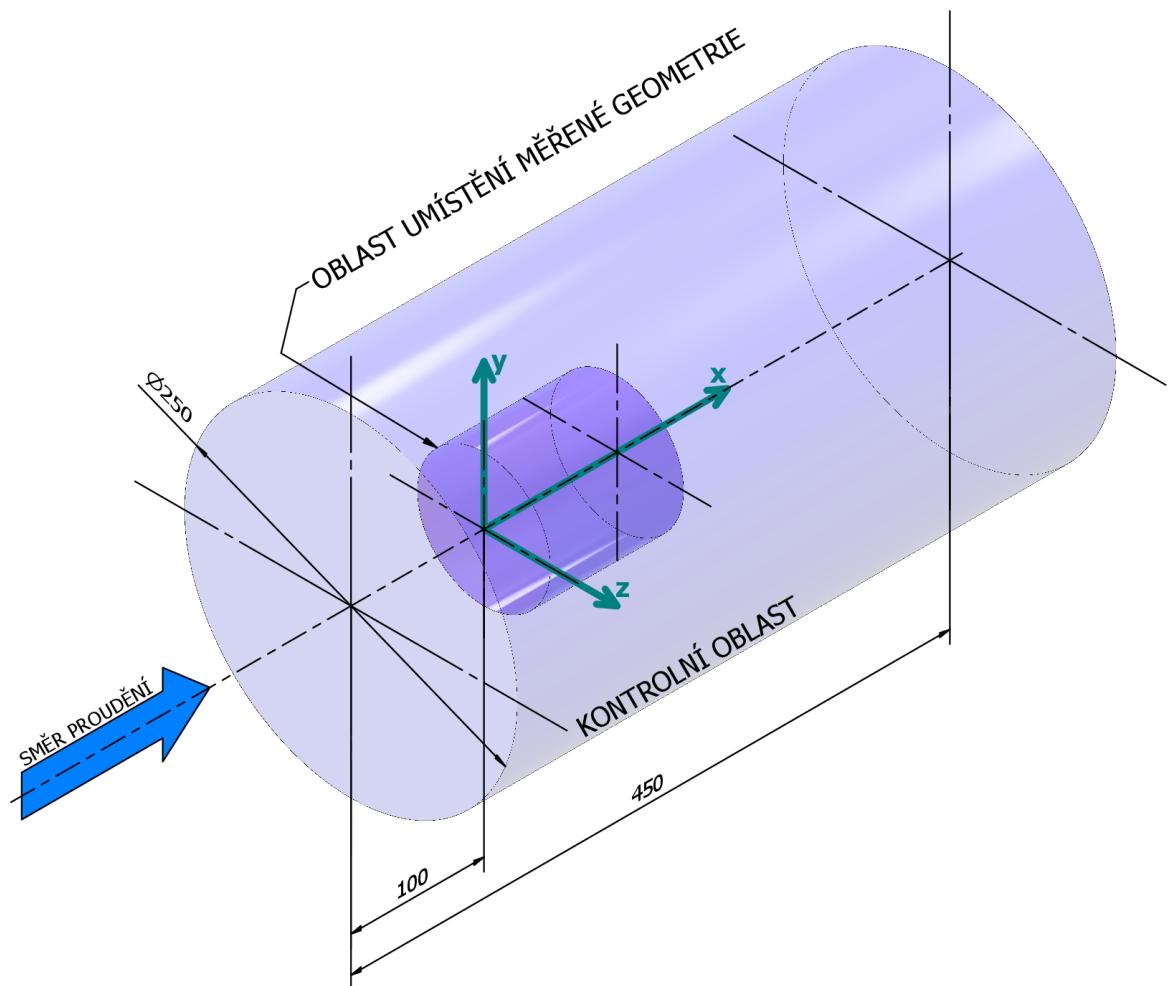
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (4.2.1)$$

4.3 Výpočetní geometrie

Vzhledem k charakteru řešeného problému byla geometrie proměnlivá. Jednotícím prvkem byla přítomnost alespoň jednoho ze dvou teplotních čidel, jehož restituční faktor byl zkoumán. Podle aktuální simulace se však měnilo uspořádání a přítomnost dalších geometrických prvků, jako například stínění.

4.3.1 Výpočetní oblast

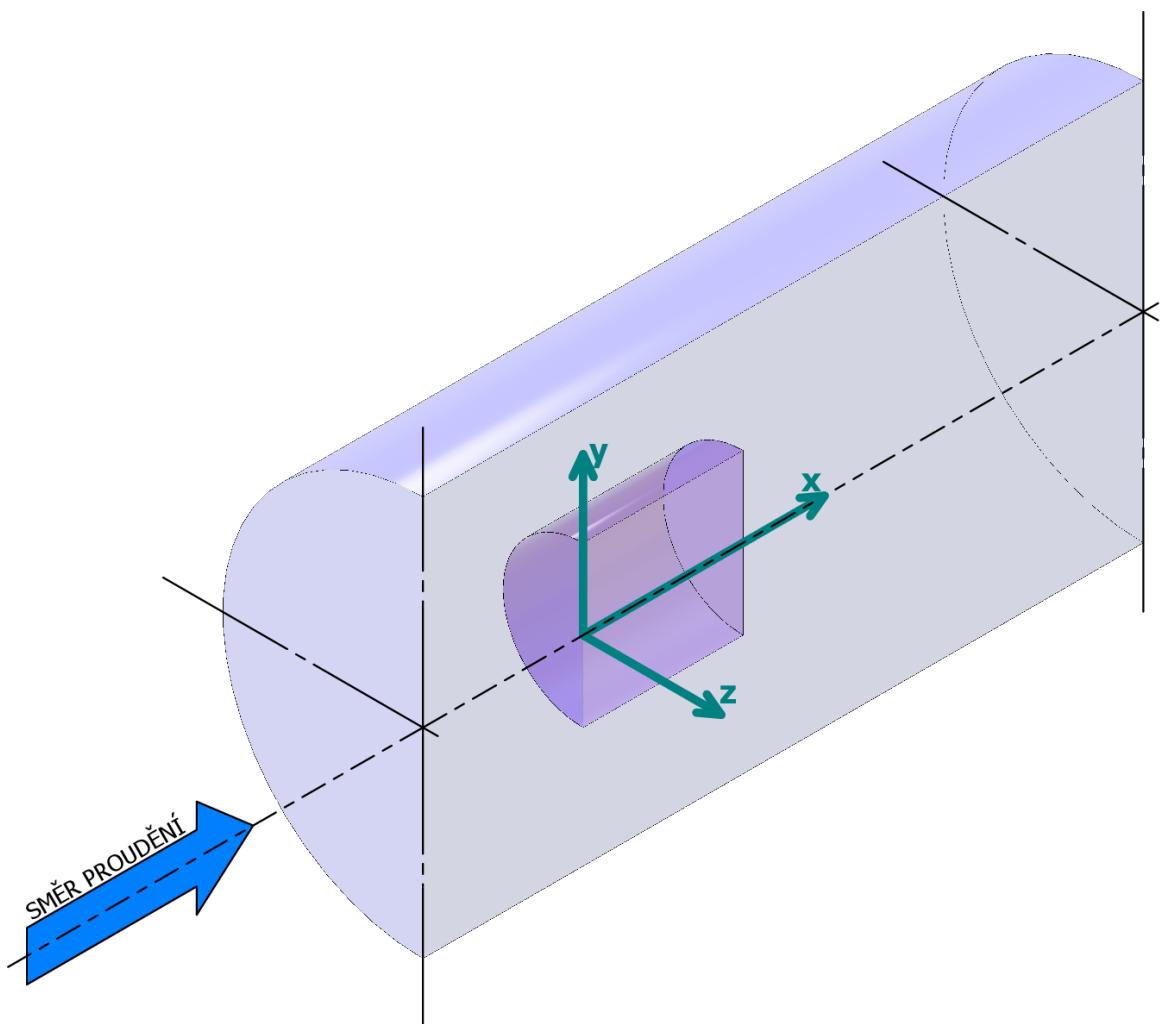
Výpočty byly prováděny na geometrii umístěné v kontrolní oblasti tvaru válce o průměru 250 mm a délce 450 mm. Vzhledem k rozměrům čidel, respektive celkové konstrukce, se jednalo o dostatečně velký kontrolní objem, který neměl ovlivňovat proudění okolo sondy. Veškeré měřené geometrie byly ve válci umístěné 100 mm od vstupní oblasti, viz obrázek 4.3.1, ze kterého je patrné i umístění souřadného systému, na který bude dále v práci odkazováno.



Obrázek 4.3.1: Výpočetní oblast s vyznačením souřadného systému a polohy měřených geometrií.

4.3.2 Využití symetrie

U všech zkoumaných geometrií se nacházela alespoň jedna rovina symetrie – bylo tedy možné využít této výhody pro úsporu výpočetního výkonu. Veškeré simulace uvedené v kapitolách 5 a 6 s výjimkou analýzy směrové citlivosti v rovině XZ byly provedeny s využitím symetrie výpočetního modelu, viz obrázek 4.3.2.



Obrázek 4.3.2: Výpočetní oblast pro řešení symetrických úloh.

4.3.3 Materiály

Během výpočtů byly uvažovány celkem tři materiály, ze kterých se skládala geometrie – trubice byla tvořena mosazí, čidla byla uvažována jako homogenní tělesa z keramiky Al_2O_3 a těsnění bylo reprezentováno pryží. Použité fyzikální vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v tabulce 4.3.1.

	Mosaz	Pryž	Keramika
Hustota $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	8730	1100	3500
Měrná tepelná kapacita $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	400	1300	700
Tepelná vodivost $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	96	0.09	30

Tabulka 4.3.1: Fyzikální vlastnosti použitých materiálů.

Jako proudící médium byl uvažován vzduch splňující stavovou rovnici ideální plynu (viz vztah 4.1.5) s následujícími vlastnostmi:

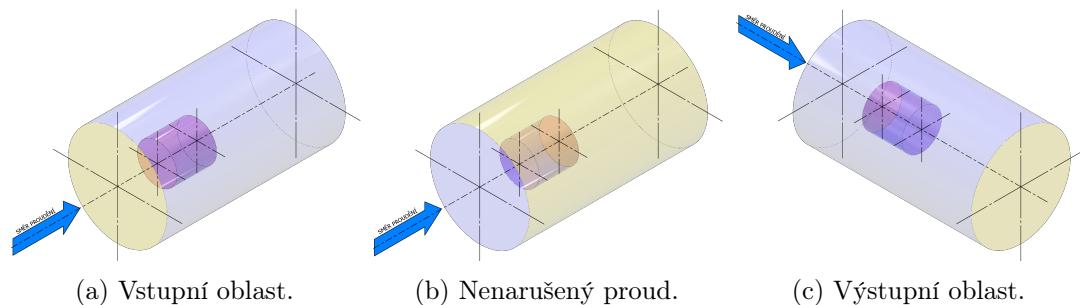
Měrná plynová konstanta $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Poissonovo číslo [1]
287	1.4
Tepelná vodivost $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	Dynamická viskozita $[Pa \cdot s]$
$2.42 \cdot 10^{-2}$	$1.7894 \cdot 10^{-5}$

Tabulka 4.3.2: Fyzikální vlastnosti vzduchu.

4.4 Okrajové podmínky

4.4.1 Hranice výpočetní oblasti

Hranice válcové kontrolní oblasti byla rozdělena na tři části s odlišnými okrajovými podmínkami – podstavy válce představovaly vstup a výstup a jeho plášť poté nenarušený proud (viz obrázek 4.4.1). Ve všech oblastech byly předepsány hodnoty uvedené v tabulce 4.4.1. Ve vstupní oblasti byla dále zadávána rychlosť proudění, respektive velikost vektoru rychlosťi a jeho směrové cosiny (využito při analýze směrové citlivosti). Hranice nenarušeného proudu měla předepisovanou hodnotu Machova čísla a směr proudění (opět ve formě směrových cosinů vektoru rychlosťi).



Obrázek 4.4.1: Části hranice pro aplikování okrajových podmínek (v jednotlivých obrázcích označeny žlutou barvou).

Statický tlak [Pa]	Statická teplota [K]
10^5	300
Intenzita turbulence [%]	Směšovací délka [m]
2.5	0.01

Tabulka 4.4.1: Hodnoty předepisované na hranici kontrolní oblasti.

Výchozí rychlosť použitou pro testování bylo $250 \frac{m}{s}$, tomu odpovídá při teplotě $300 K$ Machovo číslo 0.72. Nebude-li dále uvedeno jinak, pak byly pro výpočet použity právě tyto hodnoty.

4.4.2 Stěny

Při numerických simulacích bylo pro vyhodnocení restitučních faktorů třeba počítat s přestupem tepla do pevných látek a s jeho šířením objemem. V místech kontaktu proudícího média se stěnami geometrie byla proto použita podmínka sdílené teploty – teplota na hranici tekutiny byla přenesena na hranici tělesa.

4.5 Výpočetní síť

Vytváření modelů probíhalo v prostředí software Autodesk Inventor (verze 2021 a 2022), odkud byly následně vyexportovány ve formátu *.dwg*. K přípravě pro síťování byl následně použit software Ansys SpaceClaim (verze 2020b-2021b), jehož účel spočíval primárně ve sdílení topologie modelu, vytváření jmenných sekcí a exportu do optimálnějšího formátu *.pmdb*. Samotné síťování poté probíhalo v software Ansys Fluent (verze 2020b-2021b).

4.5.1 Povrchová síť

Prvním krokem při vytváření výpočetní sítě pro řešič bylo importování geometrie (soubor *.pmdb*) a vysíťování jejích ploch pomocí triangulace. Zde bylo použito následující nastavení:

<u>Minimální</u> Maximální velikost elementů [mm]	Poměrný růst velikosti elementů [1]
$\frac{0.1}{15}$	1.2
Maximální úhel překlenutí [deg]	Minimální dělení hran [1]
10	3

Tabulka 4.5.1: Předepisované hodnoty při vytváření povrchové sítě.

Kvalita povrchové sítě byla následně kontrolována, aby šikmost žádného elementu nepřesáhla 0.5. Šikmost představuje odchylku geometrie buňky od optimálního tvaru (v případě triangulace se jedná o rovnostranný trojúhelník). Její hodnota se pohybuje mezi $0 \div 1$, kde 0 odpovídá nejlepší kvalitě. Pro správný průběh a konvergenci výpočtů je doporučeno, aby maximální šikmost nepřesahovala 0.95 a aby se průměrná šikmost pohybovala nejvýše okolo hodnoty 0.33 [1]. Tato doporučení platí pro konečnou objemovou síť, která se používá během výpočtů, nicméně počáteční kvalita povrchové sítě má zásadní vliv na jakost následujícího síťování.

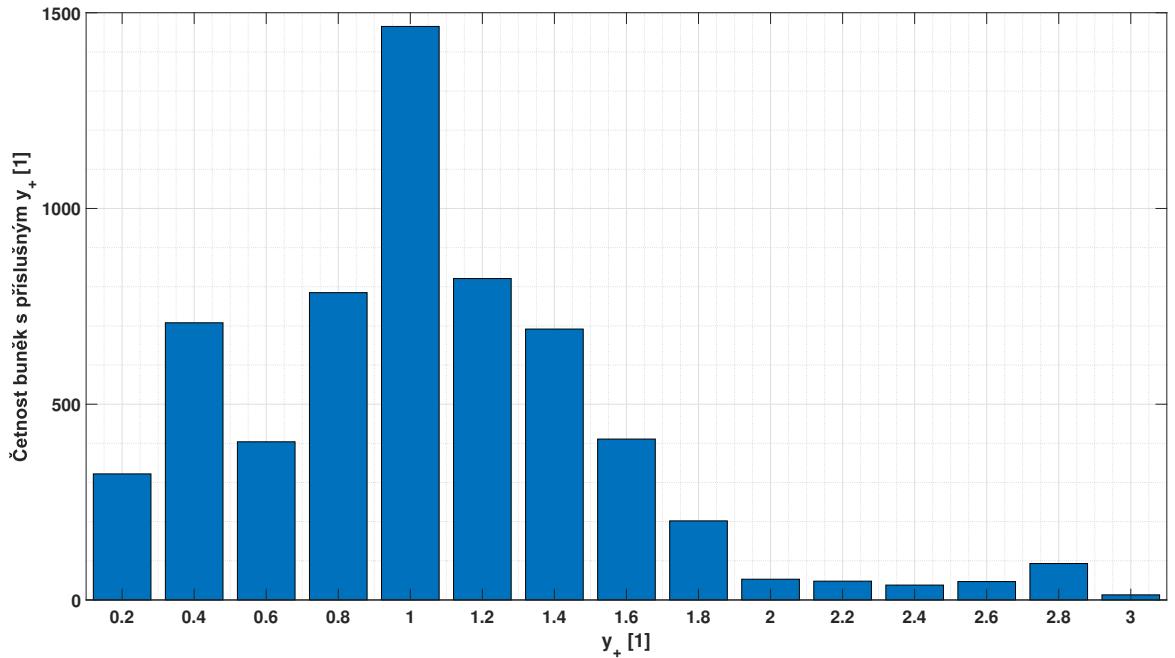
4.5.2 Zjemnění v mezní vrstvě

Pro dosažení přijatelné přesnosti výpočtu přestupu tepla ze vzduchu do těles bylo třeba vytvořit dostatečně jemnou síť v oblasti mezní vrstvy. K tomu byly využity prismatické buňky v místech kontaktu tekutiny s měřenou geometrií. Cílem bylo dosažení průměrné bezrozměrné vzdálenosti od stěny co nejblíže 1. Toho bylo docíleno pomocí nastavení uvedeného v tabulce 4.5.2. Příklad rozložení y_+ u teplotního čidla je uveden na obrázku 4.5.1.

Míra natažení prvního elementu (aspect ratio) [1]

	6.2
Poměrný růst velikosti elementů [1]	Počet prismatických vrstev [1]
1.2	10

Tabulka 4.5.2: Předepisované hodnoty při vytváření prismatických buněk.



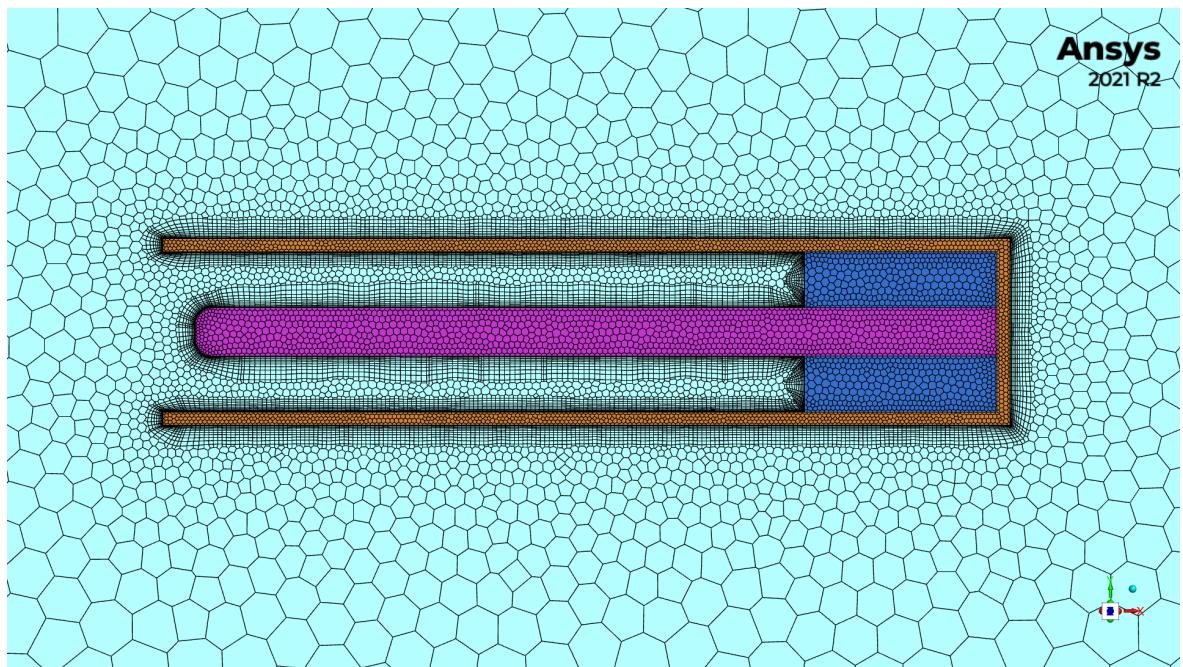
Obrázek 4.5.1: Graf četností hodnot bezrozměrné vzdálenosti od stěny čidla A pro úlohu z kapitoly 5.6. Průměrná hodnota je pro tento případ rovna 0.945.

4.5.3 Objemová síť

Při vytváření objemové sítě byly zvoleny polyhedrální buňky, které umožňují dosahovat přesnějších řešení oproti starším typům elementů při shodných počtech buňek. Umožňují navíc lepší odhad gradientu díky vyššímu počtu stěn a obecně lze s jejich použitím dosahovat lepší kvality sítě [Sosnowski2018]. Postup generování objemové sítě byl následující:

1. Konverze povrchové triangulace na polygonální síť
2. Vygenerování vrstev prismatických buněk
3. Iterační generování polyhedrální objemové sítě ve zbytku objemu

Maximální šikmost hotové sítě se vždy pohybovala pod hodnotou 0.85. Počty buňek se pohybovaly v rozmezí $150 \div 300$ tisíc pro symetrické úlohy a $250 \div 500$ tisíc pro úlohy bez využití symetrie. Příklad výpočetní sítě je uveden na obrázku ??.



Obrázek 4.5.2: Pohled na výpočetní síť z kapitoly 5.6 ze strany symetrie.

4.6 Numerický řešič

- 4.6.1 Metoda konečných objemů
- 4.6.2 Odhad gradientu
- 4.6.3 Aproximace hodnot na stěnách
- 4.6.4 Numerické schéma

5 CFD analýza konstrukčních úprav

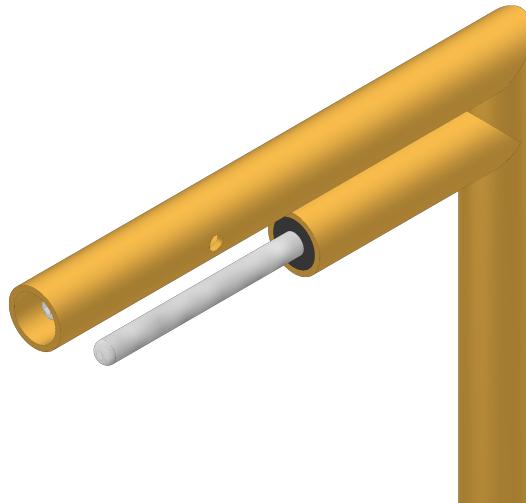
TODO

5.1 Studie citlivosti výpočetní sítě

TODO

5.2 Sonda bez stínění čidla B

Analýzu konstrukčních úprav zahájilo zkoumání nejjednodušší varianty sondy – s původními rozměry stínění čidla A a bez jakéhokoli odstínění čidla B. Cílem bylo určit problematická místa, která bude vhodné zkoumat jako první. Použitý model je znázorněn na obrázku 5.2.1, konkrétní rozměry jsou uvedeny v příloze ???. Zkoumáno bylo chování restitučních faktorů při různých rychlostech nabíhajícího proudu v rozmezí $100 \div 325 \frac{m}{s}$ a při vychýlení sondy ve dvou rovinách – v rovině symetrie XY (natočení značeno jako φ_Z) a poté kolmo na rovinu symetrie (rovina XZ, značeno φ_Y).



Obrázek 5.2.1: Sonda bez stínění čidla B

5.2.1 Chování při různých rychlostech proudění

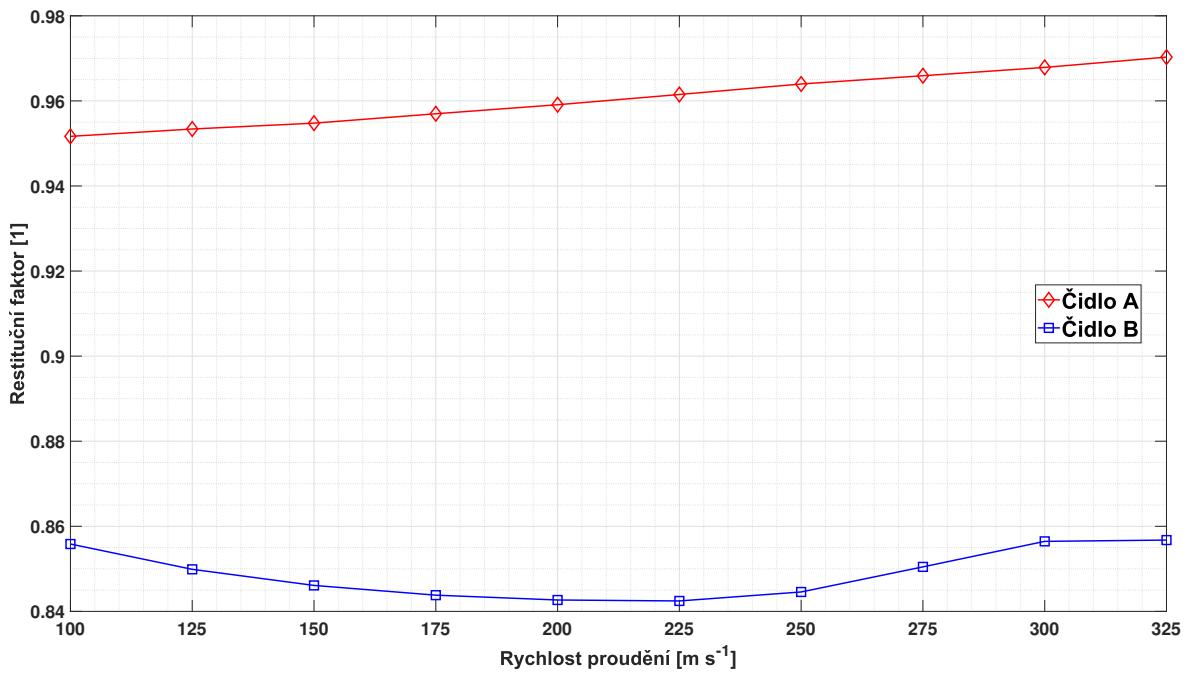
Výpočet byl proveden s následujícími okrajovými podmínkami:

5.2.2 Směrová citlivost v rovině symetrie

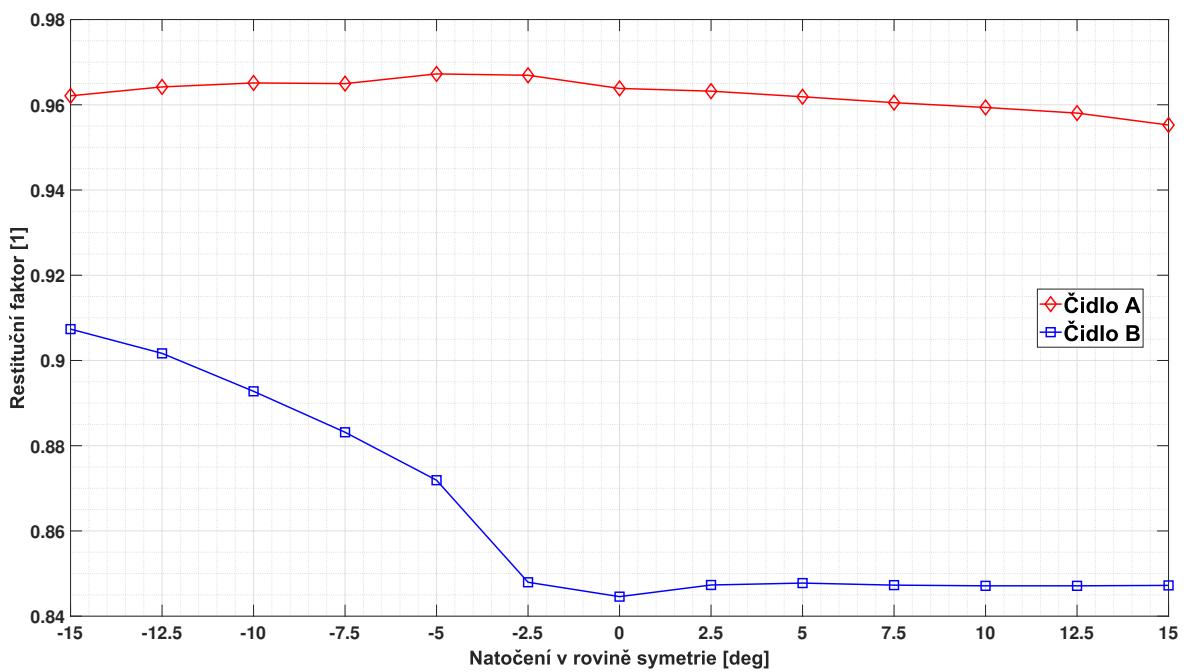
DATA

5.2.3 Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie

DATA



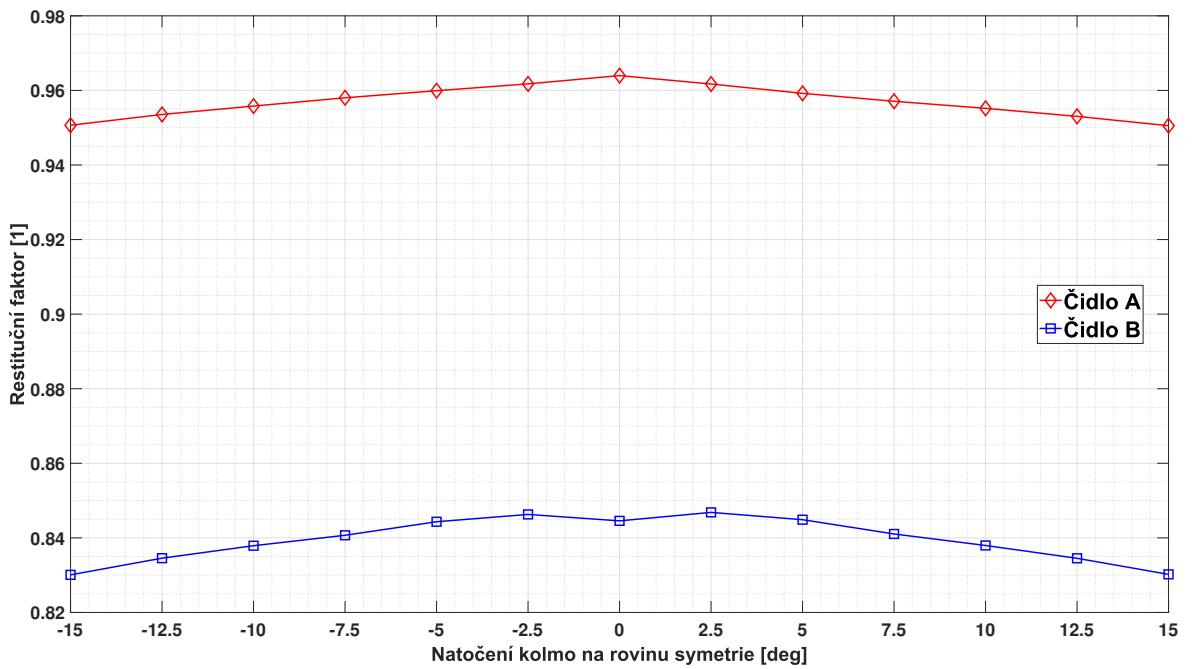
Obrázek 5.2.2: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na rychlosti proudění



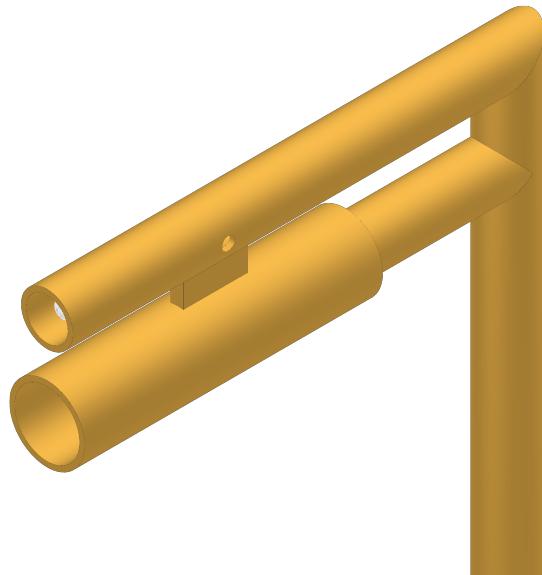
Obrázek 5.2.3: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení sondy v rovině symetrie

5.3 Sonda se stíněním čidla B

DATA



Obrázek 5.2.4: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie



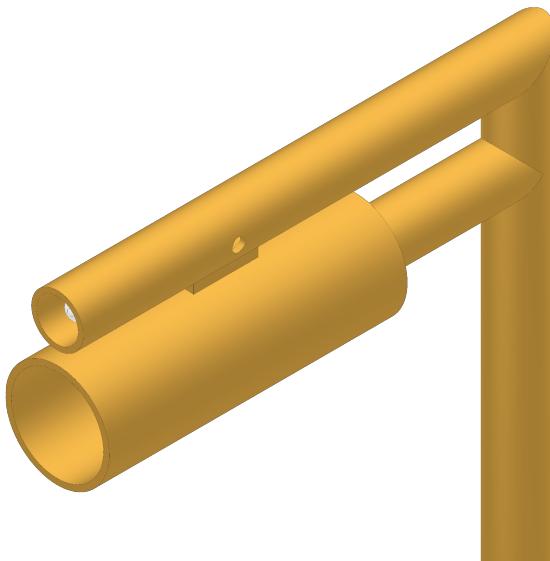
Obrázek 5.3.1: Sonda se stíněním čidla B

5.4 Sonda s rozšířeným stíněním čidla B

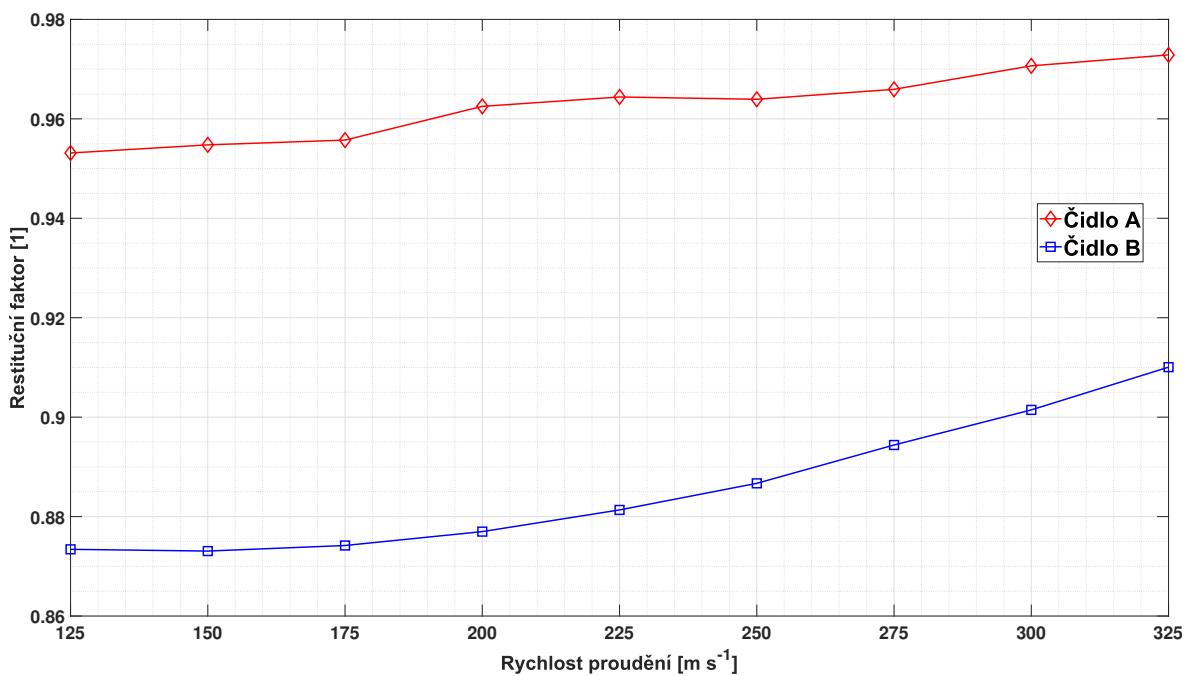
DATA

5.4.1 Chování při různých rychlostech proudění

DATA



Obrázek 5.4.1: Sonda se stíněním čidla B



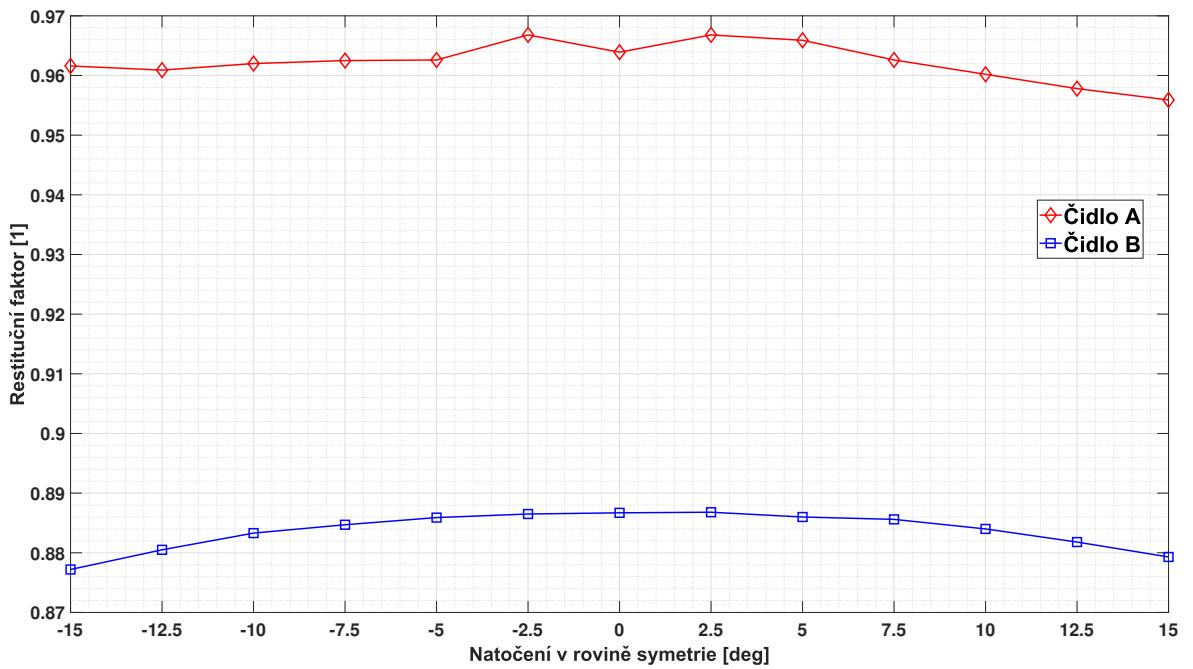
Obrázek 5.4.2: Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na rychlosti proudění

5.4.2 Směrová citlivost v rovině symetrie

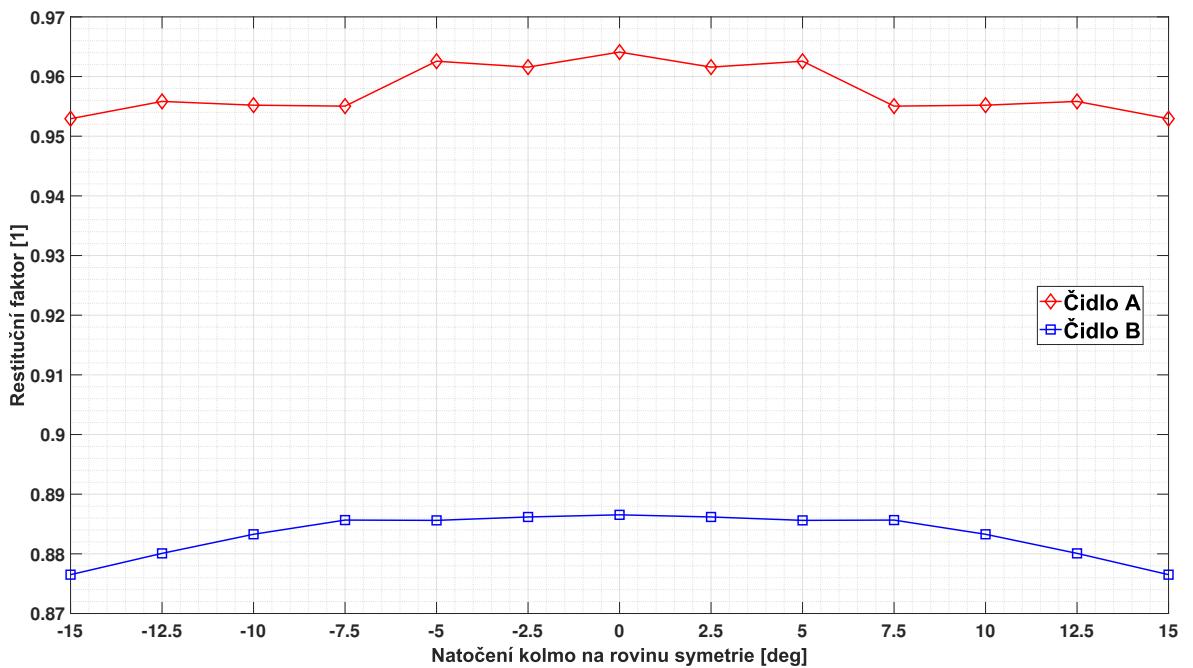
DATA

5.4.3 Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie

DATA



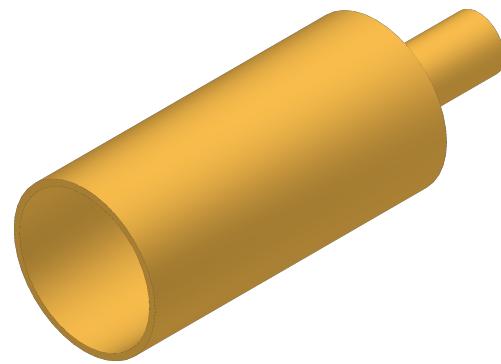
Obrázek 5.4.3: Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení sondy v rovině symetrie



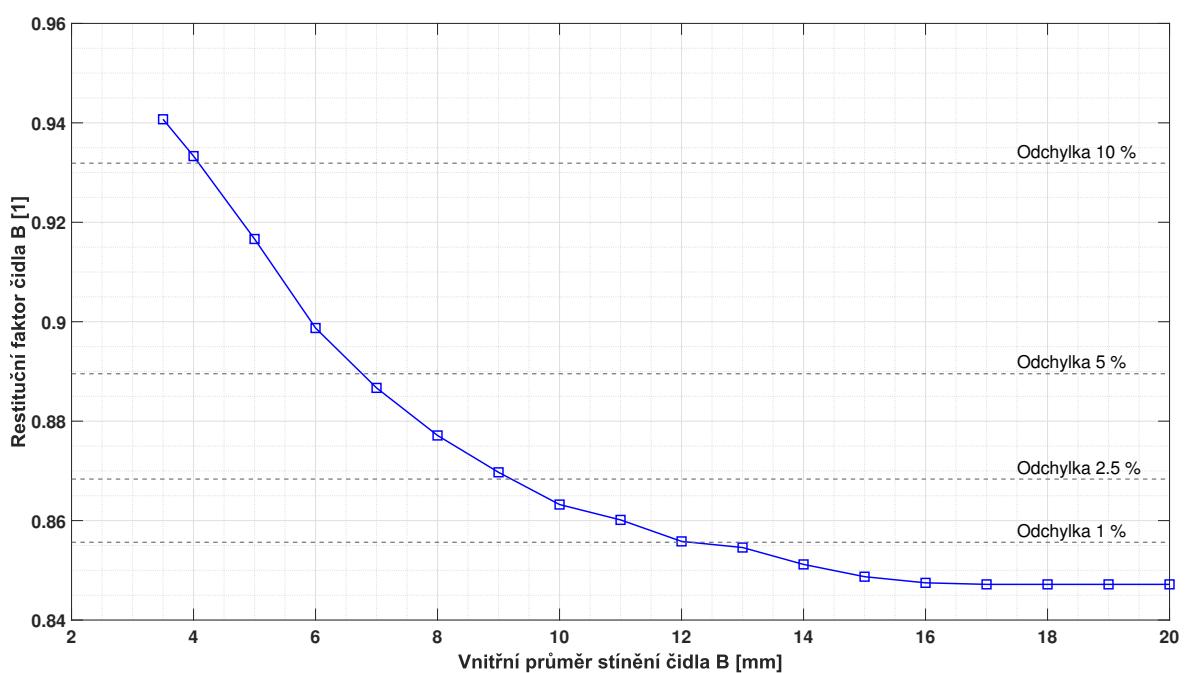
Obrázek 5.4.4: Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie

5.5 Vliv průměru stínění čidla B

DATA



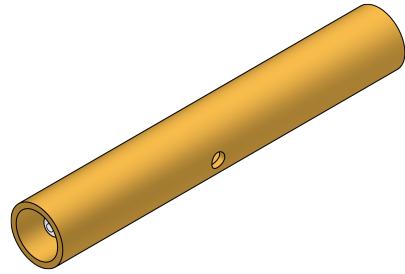
Obrázek 5.5.1: Stínění čidla B



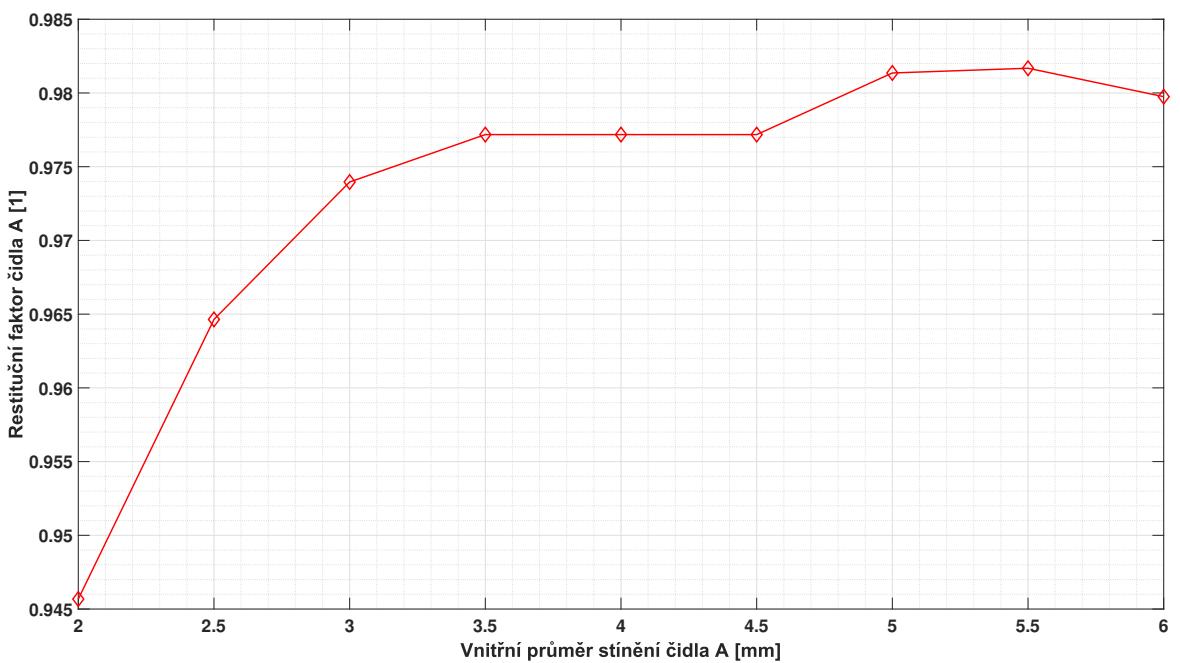
Obrázek 5.5.2: Závislost restitučního faktoru čidla B na průměru stínění

5.6 Vliv průměru stínění čidla A

DATA



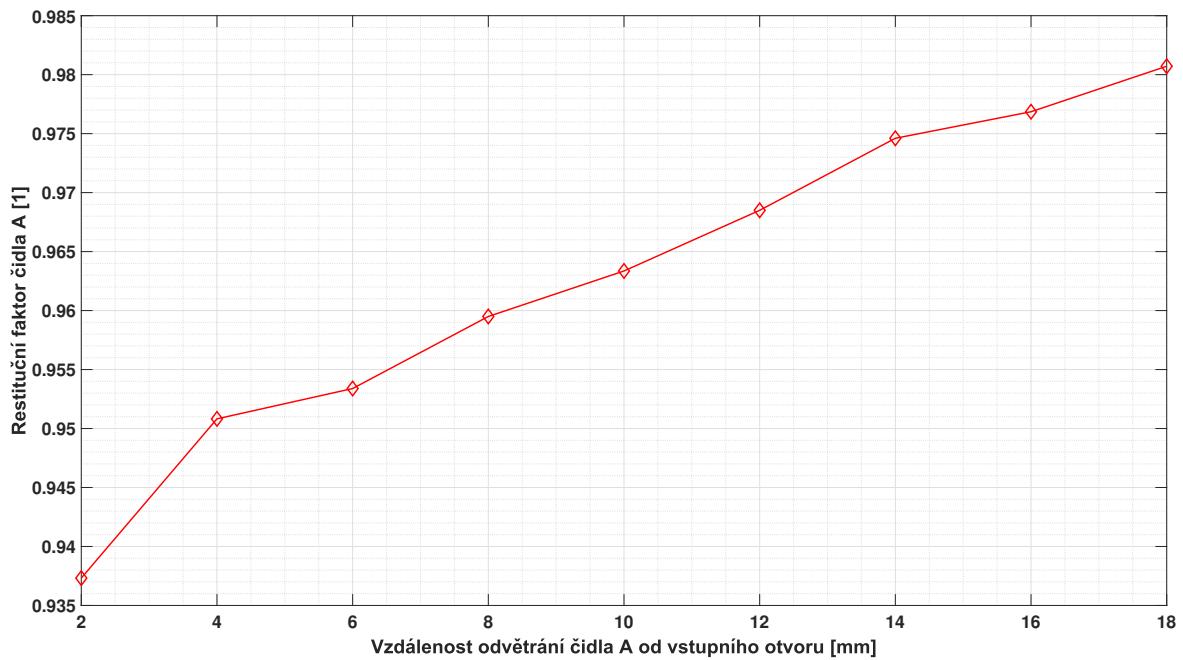
Obrázek 5.6.1: Stínění čidla A



Obrázek 5.6.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru stínění

5.7 Vliv polohy odvětrání čidla A

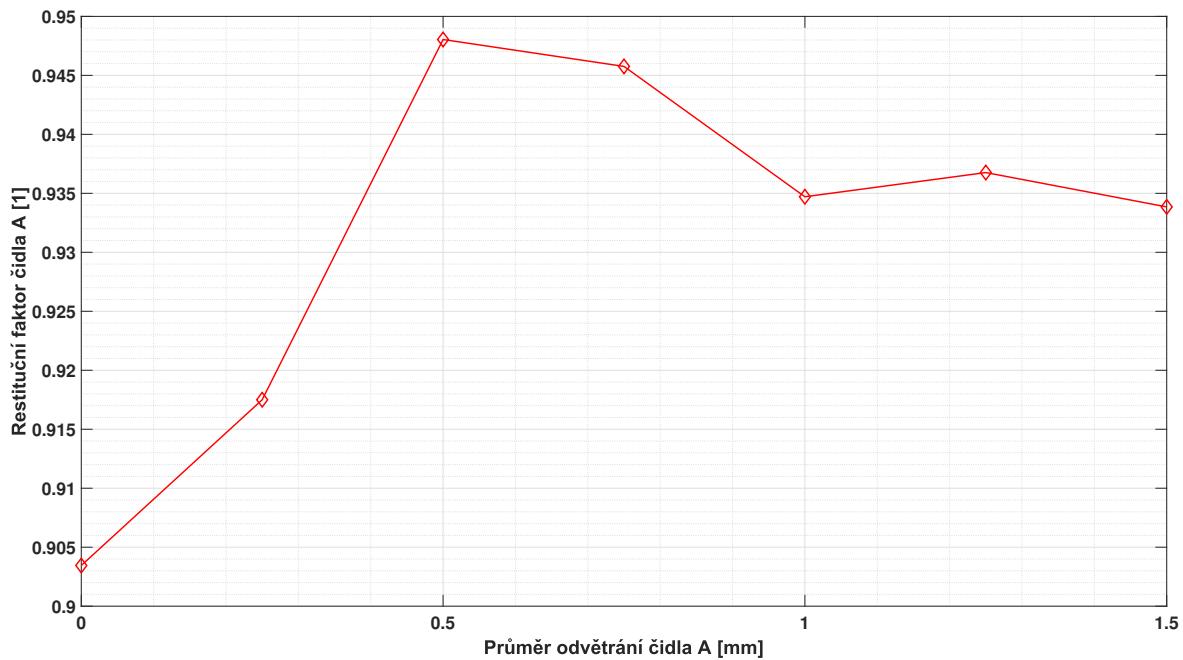
DATA



Obrázek 5.7.1: Závislost restitučního faktoru čidla A na poloze odvětrání

5.8 Vliv průměru odvětrání čidla A

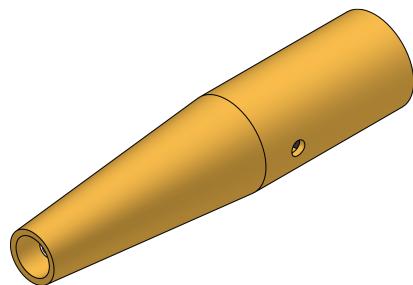
DATA



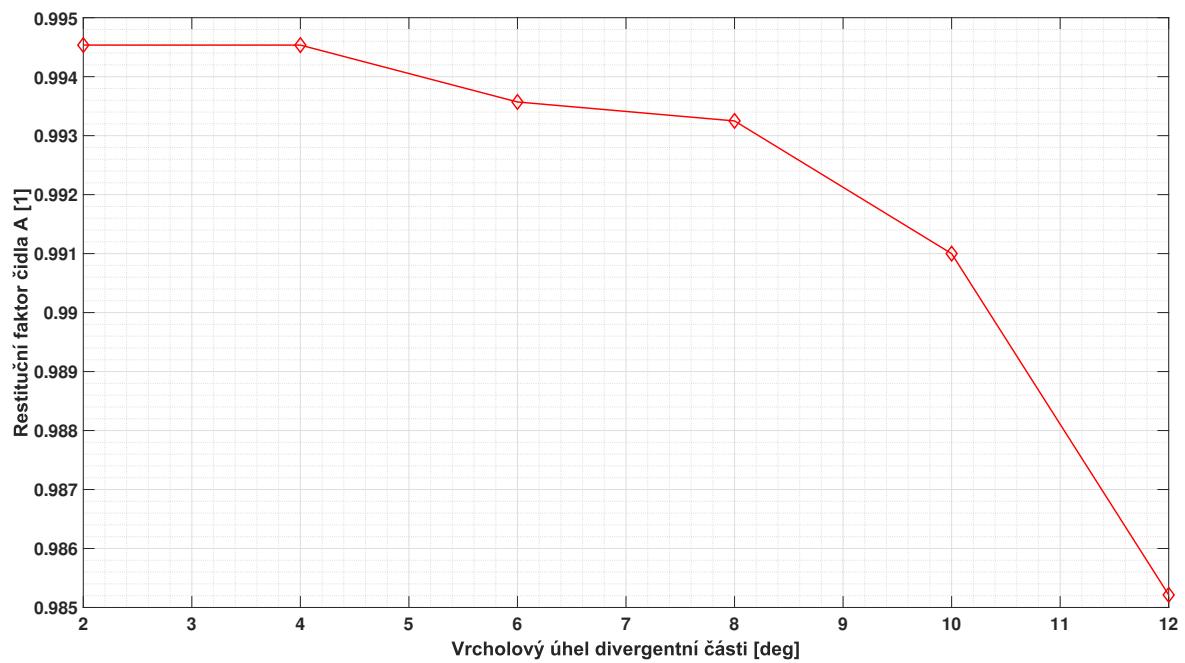
Obrázek 5.8.1: Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru odvětrání

5.9 Vliv přidání divergentního vstupu pro čidlo A

DATA



Obrázek 5.9.1: Čidlo A s divergentním vstupem



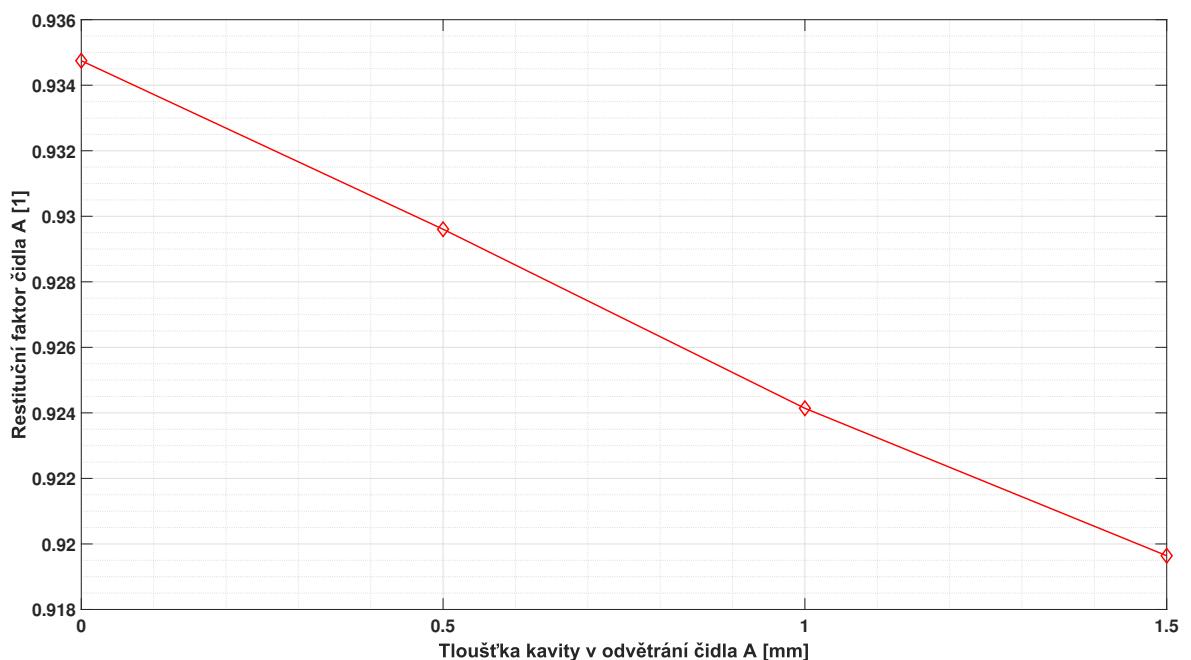
Obrázek 5.9.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na vrcholovém úhlu divergentního vstupu

5.10 Vliv přidání kavity do stínění čidla A

DATA



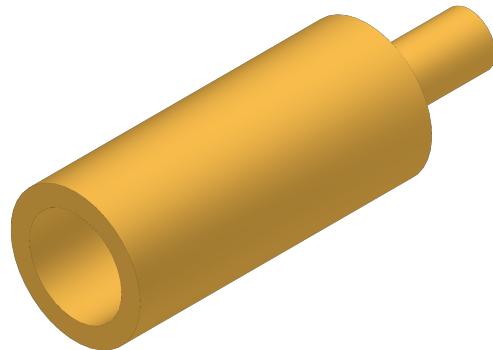
Obrázek 5.10.1: Čidlo A s přidanou kavitou do stínění



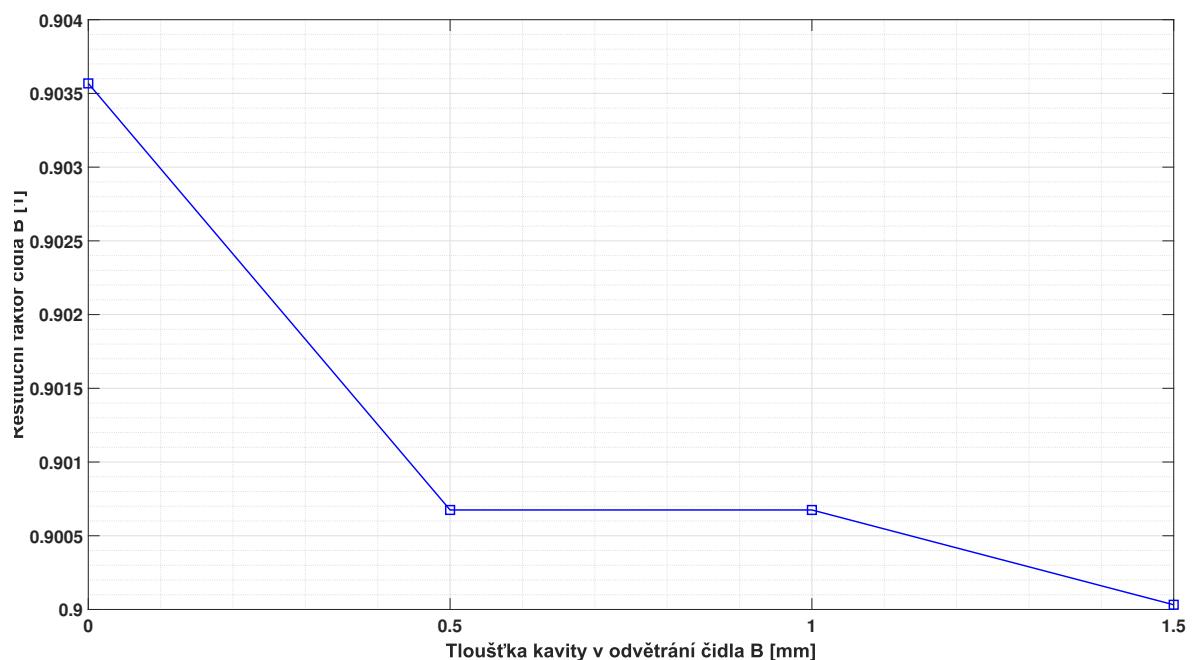
Obrázek 5.10.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na tloušťce kavity uvnitř stínění

5.11 Vliv přidání kavity do stínění čidla B

DATA



Obrázek 5.11.1: Čidlo B s přidanou kavitou do stínění



Obrázek 5.11.2: Závislost restitučního faktoru čidla B na tloušťce kavity uvnitř stínění

5.12 Vliv materiálu trubice sondy

TODO

6 Návrh a analýza finální geometrie

6.1 Návrh konstrukčních úprav

6.1.1 Čidlo A

TODO

6.1.2 Čidlo B

TODO

6.1.3 Materiál

TODO

6.2 CFD analýza

6.2.1 Chování při různých rychlostech proudění

TODO

6.2.2 Směrová citlivost v rovině symetrie

TODO

6.2.3 Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie

TODO

7 Závěr

Seznam použité literatury

1. Ansys, Ansys Fluent User's Guide. (2020).