

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 strojním 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 jejích 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 nevhodnější 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 vedoucího 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

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Seznam použitých symbolů a zkratek</b>                    | <b>9</b>  |
| Seznam symbolů . . . . .                                     | 9         |
| Seznam zkratek . . . . .                                     | 9         |
| Seznam použitých indexů . . . . .                            | 10        |
| <b>Seznam obrázků</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 Úvod</b>  | <b>12</b> |
| <b>2 Měření teplot při vysokých podzvukových rychlostech</b> | <b>13</b> |
| 2.0.1 Dynamický ohřev . . . . .                              | 13        |
| 2.0.2 Restituční faktor . . . . .                            | 13        |
| 2.1 Dynamická teplota . . . . .                              | 13        |
| <b>3 DRTA sonda</b>  | <b>14</b> |
| 3.1 Princip fungování . . . . .                              | 14        |
| 3.1.1 Víceprvková sonda . . . . .                            | 14        |
| 3.2 Výchozí geometrie . . . . .                              | 14        |
| 3.3 Cíle numerických simulací . . . . .                      | 14        |
| <b>4 CFD model</b>   | <b>15</b> |
| 4.1 Základní systém rovnic . . . . .                         | 15        |
| 4.1.1 Rovnice kontinuity . . . . .                           | 15        |
| 4.1.2 Pohybová rovnice . . . . .                             | 15        |
| 4.1.3 Energetická rovnice . . . . .                          | 15        |
| 4.1.4 Konstitutivní vztahy . . . . .                         | 15        |
| 4.2 Model turbulence . . . . .                               | 16        |
| 4.3 Výpočetní geometrie . . . . .                            | 17        |
| 4.3.1 Výpočetní oblast . . . . .                             | 17        |
| 4.3.2 Využití symetrie . . . . .                             | 18        |
| 4.3.3 Materiály . . . . .                                    | 19        |
| 4.4 Okrajové podmínky . . . . .                              | 20        |
| 4.4.1 Hranice výpočetní oblasti . . . . .                    | 20        |
| 4.4.2 Stěny . . . . .  | 20        |
| 4.5 Výpočetní síť . . . . .                                  | 21        |
| 4.5.1 Povrchová síť . . . . .                                | 21        |
| 4.5.2 Zjemnění v mezní vrstvě . . . . .                      | 21        |
| 4.5.3 Objemová síť . . . . .                                 | 22        |
| 4.6 Numerický řešič . . . . .                                | 23        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.6.1    | Metoda konečných objemů . . . . .                       | 23        |
| 4.6.2    | Odhad gradientu . . . . .                               | 23        |
| 4.6.3    | Aproximace hodnot na stěnách . . . . .                  | 23        |
| 4.6.4    | Numerické schéma . . . . .                              | 23        |
| <b>5</b> | <b>CFD analýza konstrukčních úprav</b>                  | <b>24</b> |
| 5.1      | Studie citlivosti výpočetní sítě . . . . .              | 24        |
| 5.2      | Sonda bez stínění čidla B . . . . .                     | 25        |
| 5.2.1    | Chování při různých rychlostech proudění . . . . .      | 25        |
| 5.2.2    | Směrová citlivost v rovině symetrie . . . . .           | 26        |
| 5.2.3    | Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie . . . . .    | 27        |
| 5.2.4    | Zhodnocení . . . . .                                    | 28        |
| 5.3      | Sonda se stíněním čidla B . . . . .                     | 28        |
| 5.4      | Sonda s rozšířeným stíněním čidla B . . . . .           | 29        |
| 5.4.1    | Chování při různých rychlostech proudění . . . . .      | 30        |
| 5.4.2    | Směrová citlivost v rovině symetrie . . . . .           | 30        |
| 5.4.3    | Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie . . . . .    | 31        |
| 5.5      | Vliv průměru stínění čidla B . . . . .                  | 32        |
| 5.6      | Vliv průměru stínění čidla A . . . . .                  | 33        |
| 5.7      | Vliv polohy odvětrání čidla A . . . . .                 | 34        |
| 5.8      | Vliv průměru odvětrání čidla A . . . . .                | 35        |
| 5.9      | Vliv přidání divergentního vstupu pro čidlo A . . . . . | 36        |
| 5.10     | Vliv přidání kavity do stínění čidla A . . . . .        | 37        |
| 5.11     | Vliv přidání kavity do stínění čidla B . . . . .        | 38        |
| 5.12     | Vliv materiálu trubice sondy . . . . .                  | 39        |
| <b>6</b> | <b>Návrh a analýza finální geometrie</b>                | <b>40</b> |
| 6.1      | Návrh konstrukčních úprav . . . . .                     | 40        |
| 6.1.1    | Čidlo A . . . . .                                       | 40        |
| 6.1.2    | Čidlo B . . . . .                                       | 40        |
| 6.1.3    | Materiál . . . . .                                      | 40        |
| 6.2      | CFD analýza . . . . .                                   | 40        |
| 6.2.1    | Chování při různých rychlostech proudění . . . . .      | 40        |
| 6.2.2    | Směrová citlivost v rovině symetrie . . . . .           | 40        |
| 6.2.3    | Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie . . . . .    | 40        |
| <b>7</b> | <b>Závěr</b>  | <b>41</b> |
|          | <b>Seznam použité literatury</b>                        | <b>42</b> |



# 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                          |
| $\kappa$  | 1                | Poissonova konstanta                         |
| $Ma$      | 1                | Machovo číslo                                |
| $\mu$     | $Pas$            | Dynamická viskozita                          |
| $\nu$     | $m^2s^{-1}$      | 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                            |
| $\rho$    | $kgm^{-3}$       | 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           |
| $\infty$ | Nabíhající proud vzduchu |
| 0        | Stagnační                |
| 1        | Před dýzou               |
| 2        | Za dýzou                 |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1 Výchozí geometrie DRTA sondy. . . . .   | 14 |
| 4.3.1 Výpočetní oblast s vyznačením souřadného systému a polohy měřených geometrií. . . . .   | 17 |
| 4.3.2 Výpočetní oblast pro řešení symetrických úloh. . . . .  | 18 |
| 4.4.1 Části hranice pro aplikování okrajových podmínek (v jednotlivých obrázcích označeny žlutou barvou). . . . .                                       | 20 |
| 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. . . . . | 22 |
| 4.5.2 Pohled na výpočetní síť z kapitoly 5.6 ze strany symetrie. . . . .  | 23 |
| 5.2.1 Sonda bez stínění čidla B . . . . .   | 25 |
| 5.2.2 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na rychlosti prouďení. . . . .   | 26 |
| 5.2.3 Vizualizace vypočtených dat pro sondu bez stínění čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění $250 \frac{m}{s}$ . . . . .                     | 26 |
| 5.2.4 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení sondy v rovině symetrie. . . . .   | 27 |
| 5.2.5 Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie. . . . .  | 27 |
| 5.3.1 Sonda se stíněním čidla B . . . . .   | 28 |
| 5.3.2 Vizualizace vypočtených dat pro sondu se stíněním čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění $250 \frac{m}{s}$ . . . . .                     | 29 |
| 5.4.1 Sonda se stíněním čidla B . . . . .   | 29 |
| 5.4.2 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na rychlosti prouďení . . . . .  | 30 |
| 5.4.3 Vizualizace vypočtených dat pro sondu s rozšířeným stíněním čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění $250 \frac{m}{s}$ . . . . .           | 30 |

|   |    |
|---|----|
| 5.4.4 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení sondy v rovině symetrie . . . . .  | 31 |
| 5.4.5 Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie . . . . . | 31 |
| 5.5.1 Stínění čidla B . . . . .   | 32 |
| 5.5.2 Závislost restitučního faktoru čidla B na průměru stínění . . . . .   | 32 |
| 5.6.1 Stínění čidla A . . . . .   | 33 |
| 5.6.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru stínění . . . . .   | 33 |
| 5.7.1 Závislost restitučního faktoru čidla A na poloze odvětrání . . . . .  | 34 |
| 5.8.1 Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru odvětrání . . . . .   | 35 |
| 5.9.1 Čidlo A s divergentním vstupem . . . . .  | 36 |
| 5.9.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na vrcholovém úhlu divergentního vstupu . . . . .                          | 36 |
| 5.10.1 Čidlo A s přidanou kavitou do stínění . . . . .  | 37 |
| 5.10.2 Závislost restitučního faktoru čidla A na tloušťce kavity uvnitř stínění .                                       | 37 |
| 5.11.1 Čidlo B s přidanou kavitou do stínění . . . . .  | 38 |
| 5.11.2 Závislost restitučního faktoru čidla B na tloušťce kavity uvnitř stínění .                                       | 38 |

# **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

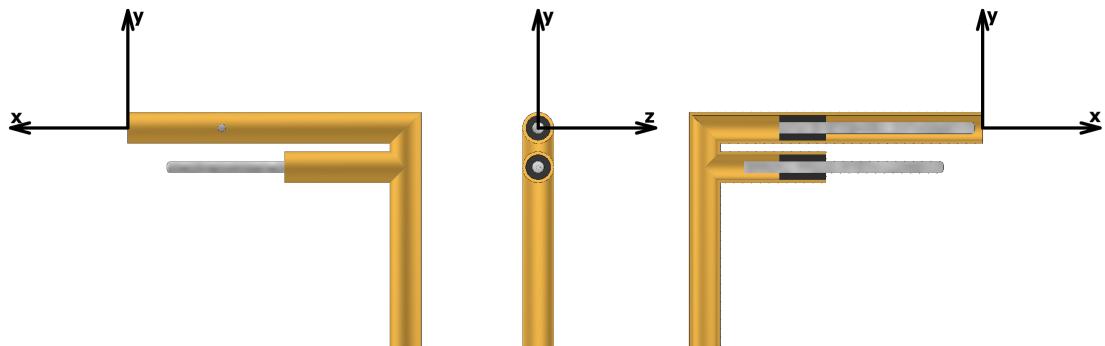
## 3 DRTA sonda

### 3.1 Princip fungování

#### 3.1.1 Víceprvková sonda

### 3.2 Výchozí geometrie

Zkoumaná sonda se skládá z dvou odporových teplotní 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

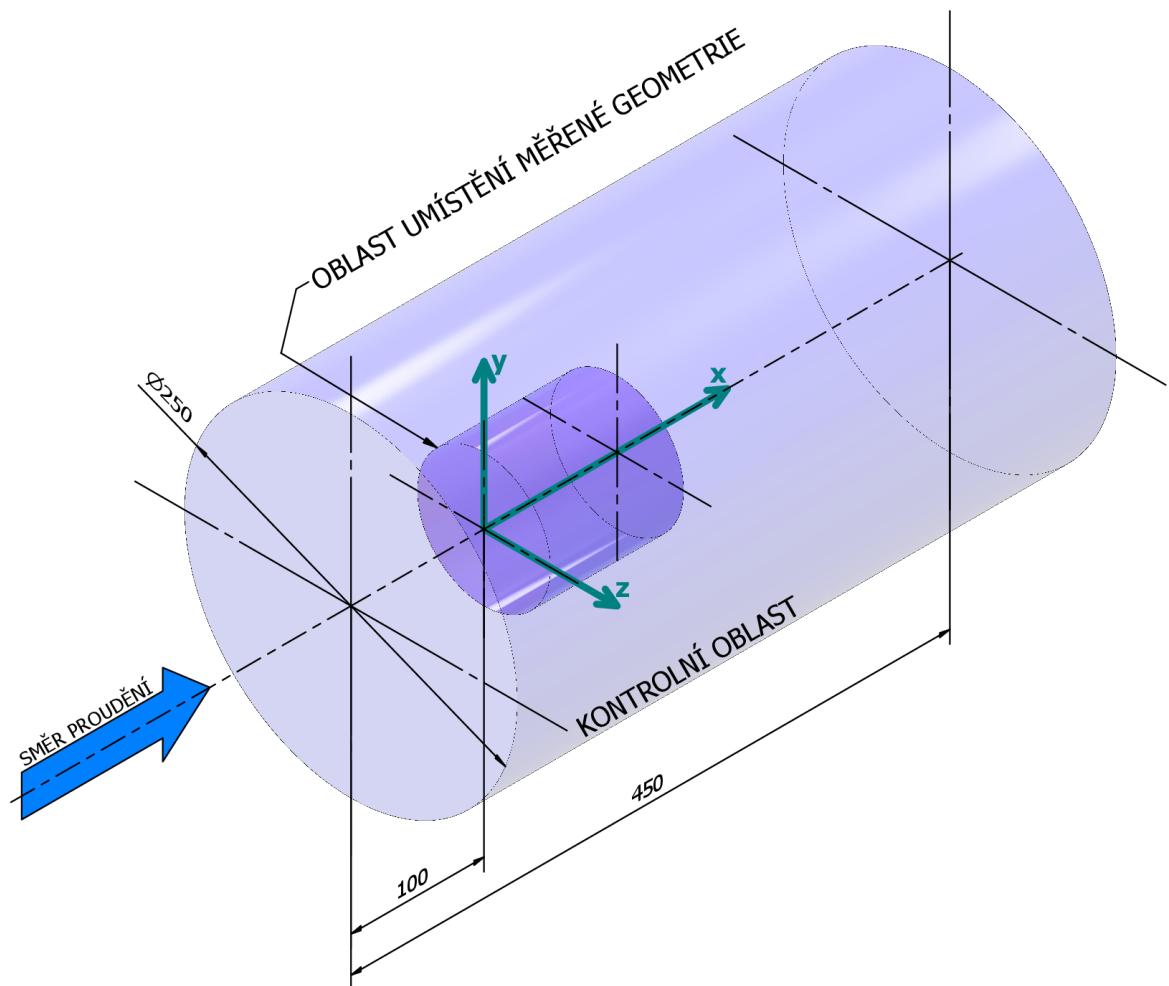
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla k) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (4.2.1)$$

## 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

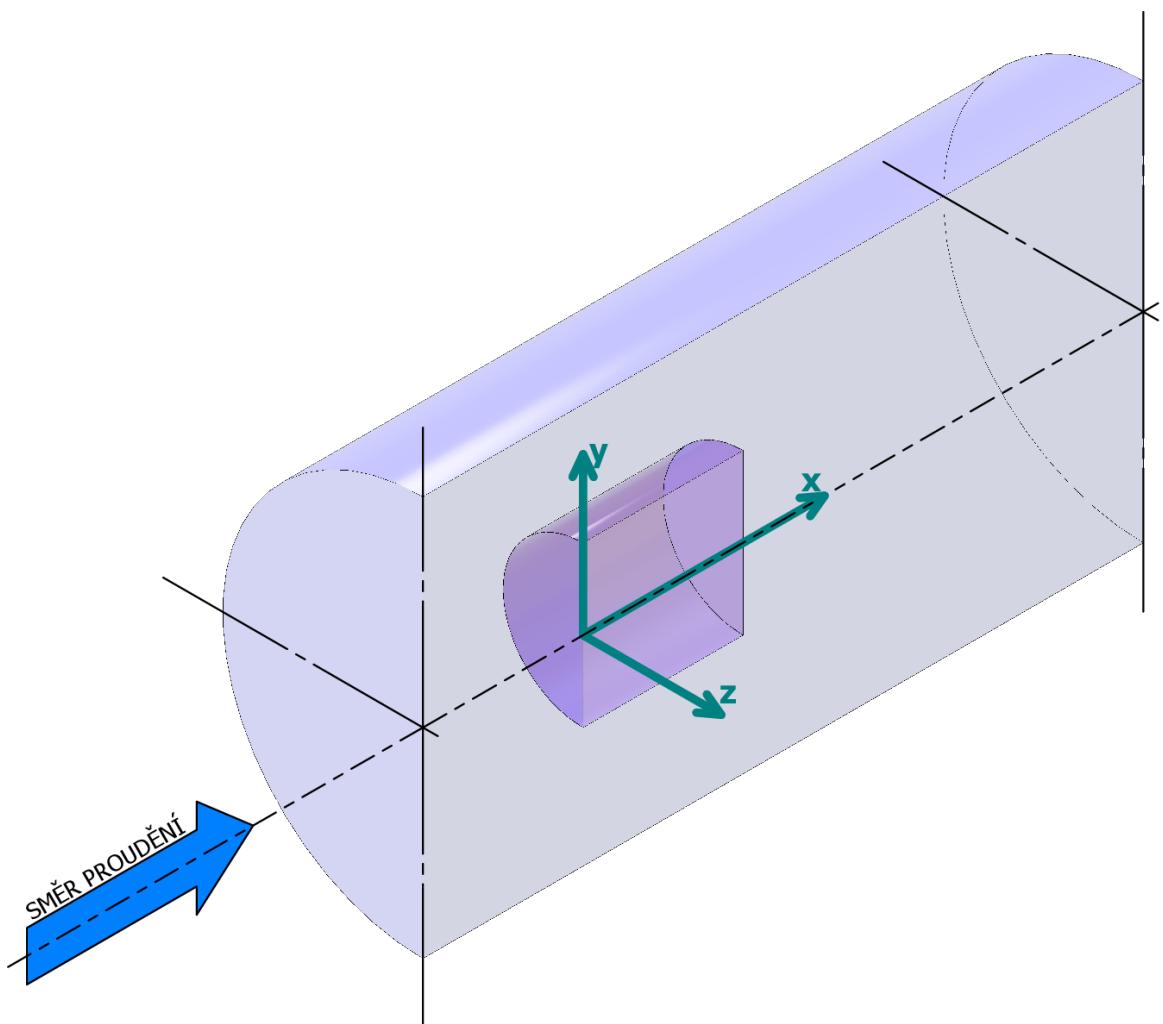
Výpočty byly prováděny na geometrii umístěné v kontrolní oblasti tvaru válce o průměru 250 mm a délce 450 mm. Vzhledem k rozměrům čidel, respektive celkové konstrukce, se jednalo o dostatečně velký kontrolní objem, který neměl ovlivňovat proudění okolo sondy. Veškeré měřené geometrie byly ve válci umístěné 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:

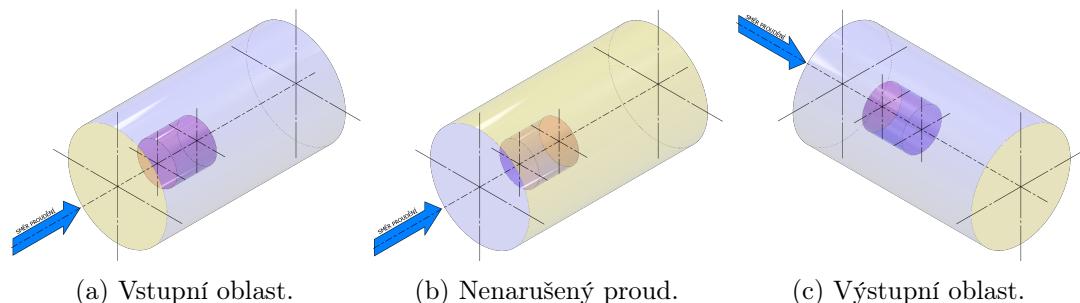
|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Měrná plynová konstanta $\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$ | Poissonovo číslo [1]               |
| 287   | 1.4                                |
| Tepelná vodivost $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$         | 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><br>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.

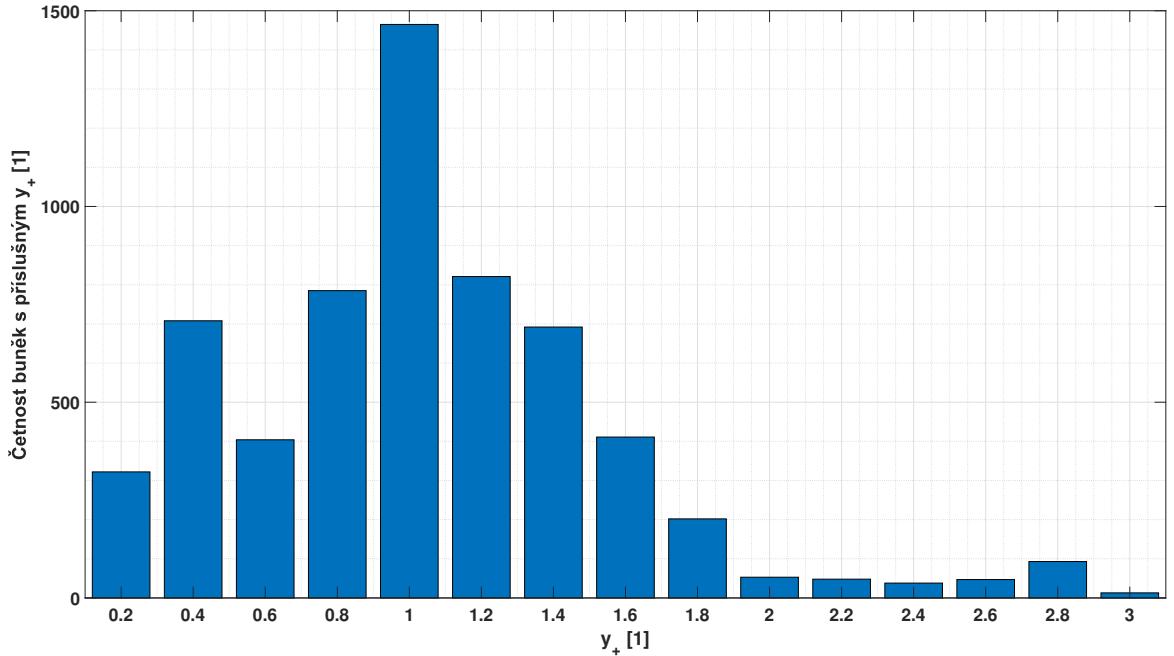
### 4.5.2 Zjemnění v mezní vrstvě

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.



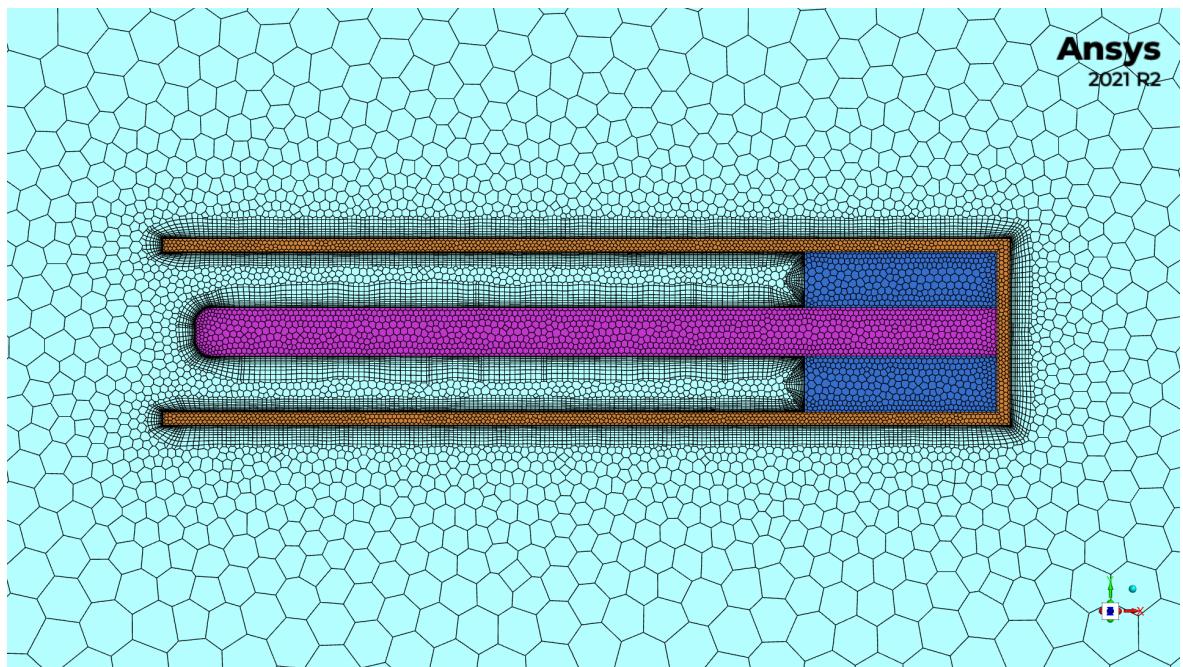
Obrázek 4.5.1: Graf četností hodnot bezrozměrné vzdálenosti od stěny čidla A pro úlohu z kapitoly 5.6. Průměrná hodnota je pro tento případ rovna 0.945.

### 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 4.5.2.



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

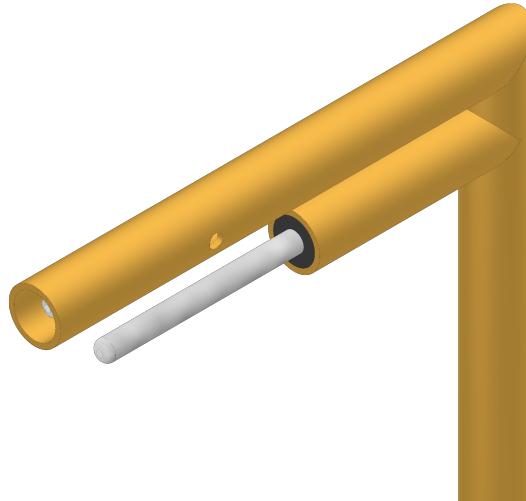
TODO

### 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 1.

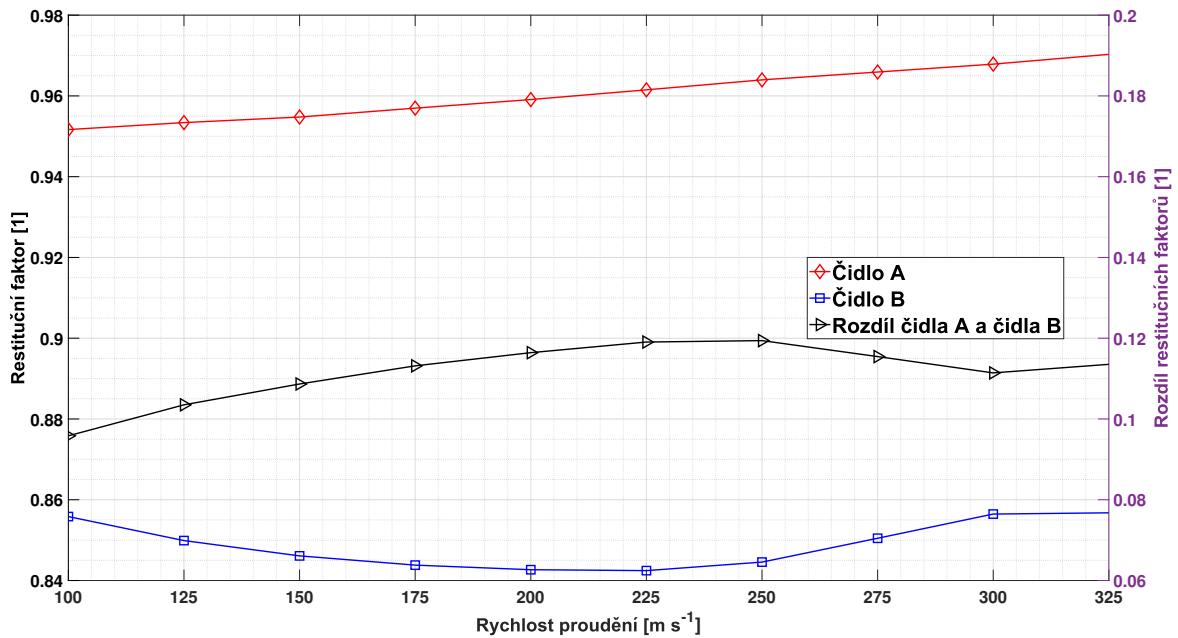


Obrázek 5.2.1: Sonda bez stínění čidla B

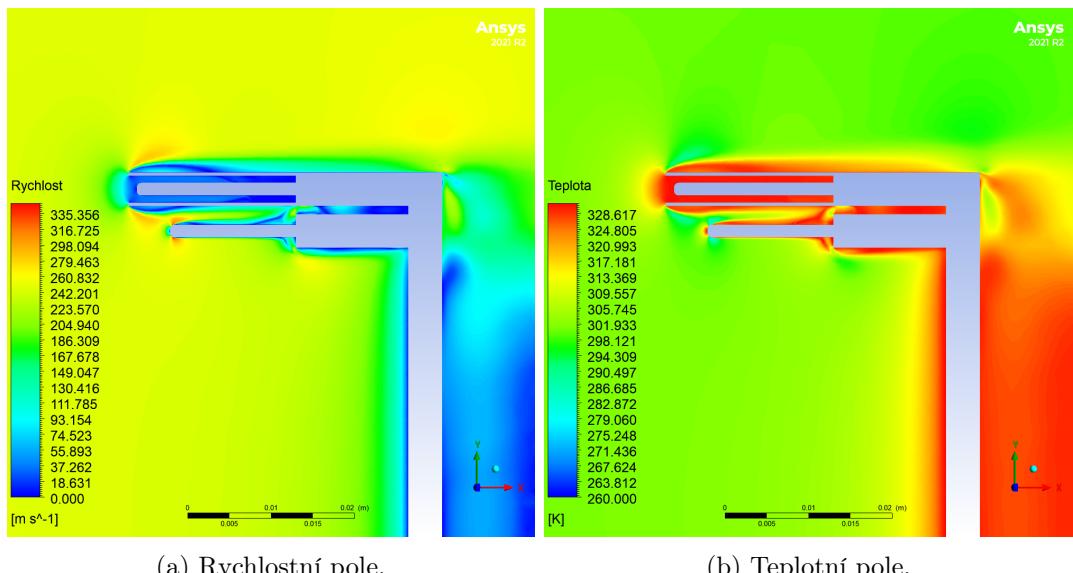
Zkoumáno bylo chování restitučních faktorů při různých rychlostech nabíhajícího proudu v rozmezí  $100 \div 325 \left[ \frac{m}{s} \right]$  s krokem  $25 \frac{m}{s}$  a při vychýlení sondy ve dvou rovinách – v rovině symetrie XY (natočení značeno jako  $\varphi_Z$ ) a poté kolmo na rovinu symetrie (rovina XZ, značeno  $\varphi_Y$ ), v obou případech s krokem  $2.5^\circ$  v rozmezí  $\pm 15^\circ$ .

### 5.2.1 Chování při různých rychlostech proudění

Výsledky výpočtu jsou znázorněny v obrázku 5.2.2. Z průběhu restitučního faktoru čidla B lze usuzovat, že docházelo k výraznějšímu ovlivnění proudění v jeho blízkosti vlivem stínění čidla A. To je patrné i z obrázku 5.2.3.



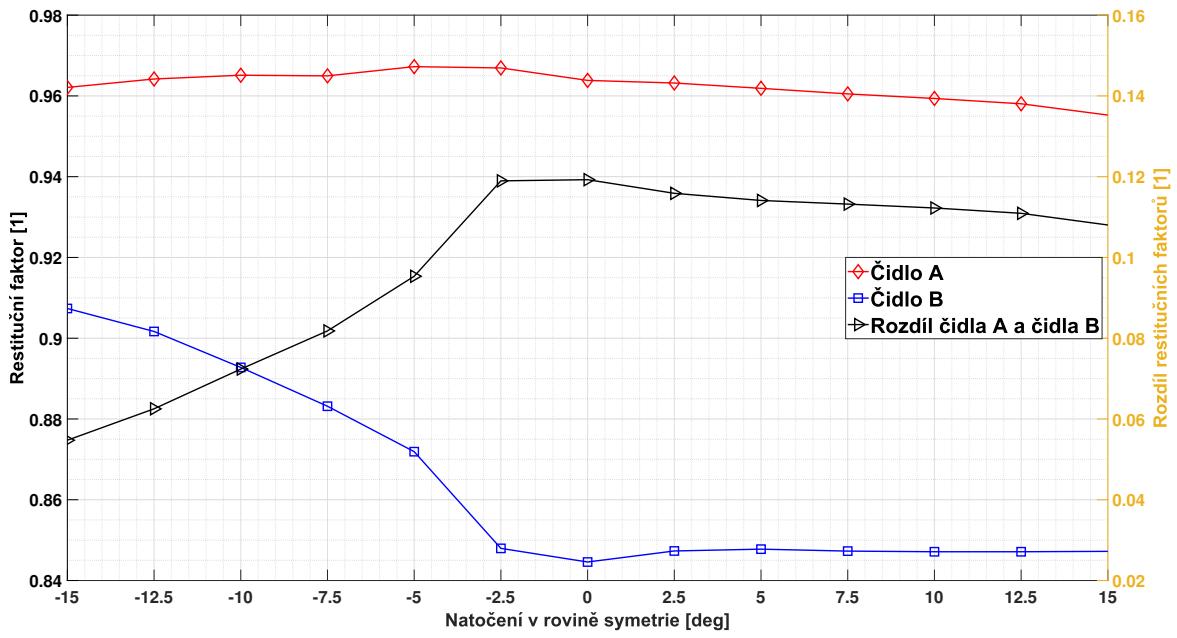
Obrázek 5.2.2: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na rychlosti proudění.



Obrázek 5.2.3: Vizualizace vypočtených dat pro sondu bez stínění čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění  $250 \frac{m}{s}$ .

## 5.2.2 Směrová citlivost v rovině symetrie

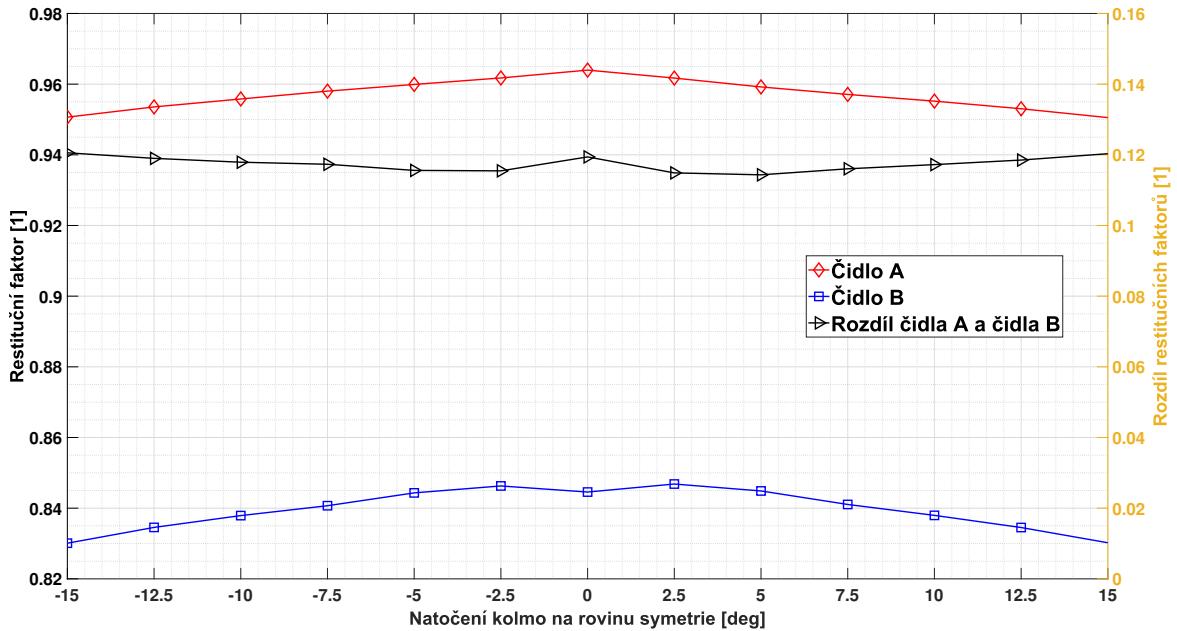
Při natáčení sondy směrem dolů (tedy v záporném smyslu otáčení, kdy proud směřuje na vršek sondy) docházelo k zastínění čidla B, které se tak nacházelo částečně v úplavu trubice stínící čidlo A. To způsobilo výraznou změnu jeho restitučního faktoru, jak je patrné z obrázku 5.2.4 – relativní odchylka od hodnoty nevychýlené sondy byla pro natočení  $-15^\circ$  rovna 7.4 %. Při natočení sondy opačným směrem nedocházelo k výrazným výchylkám restitučních faktorů, zde relativní odchylka nepřekročila 0.2 %.



Obrázek 5.2.4: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení sondy v rovině symetrie.

### 5.2.3 Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie

Vychýlení sondy kolmo na rovinu symetrie neukázalo žádné vážné problémy (viz obrázek 5.2.5). Nejvyšší relativní odchylka restitučních faktorů nepřekročila 1.4 % u čidla A a 1.8 % u čidla B.



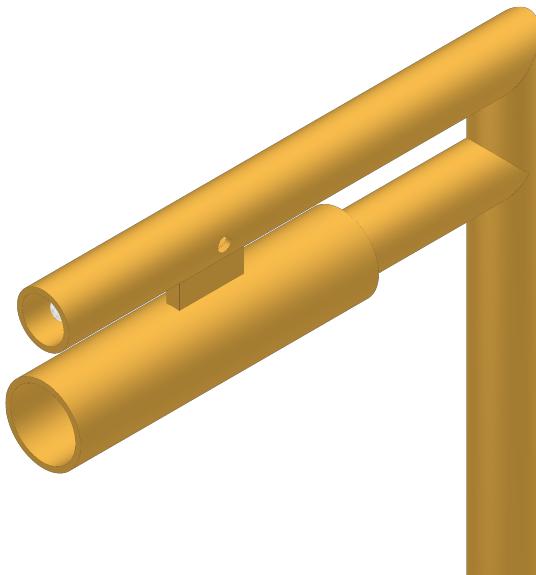
Obrázek 5.2.5: Závislost restitučních faktorů sondy bez stínění čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie.

#### 5.2.4 Zhodnocení

Problematickým místem první verze sondy se ukázalo čidlo B, které bylo ovlivňováno stíněním čidla A jak při změnách rychlosti proudění, tak při změnách natočení sondy. Prvním návrhem konstrukční úpravy tak bylo odstínění.

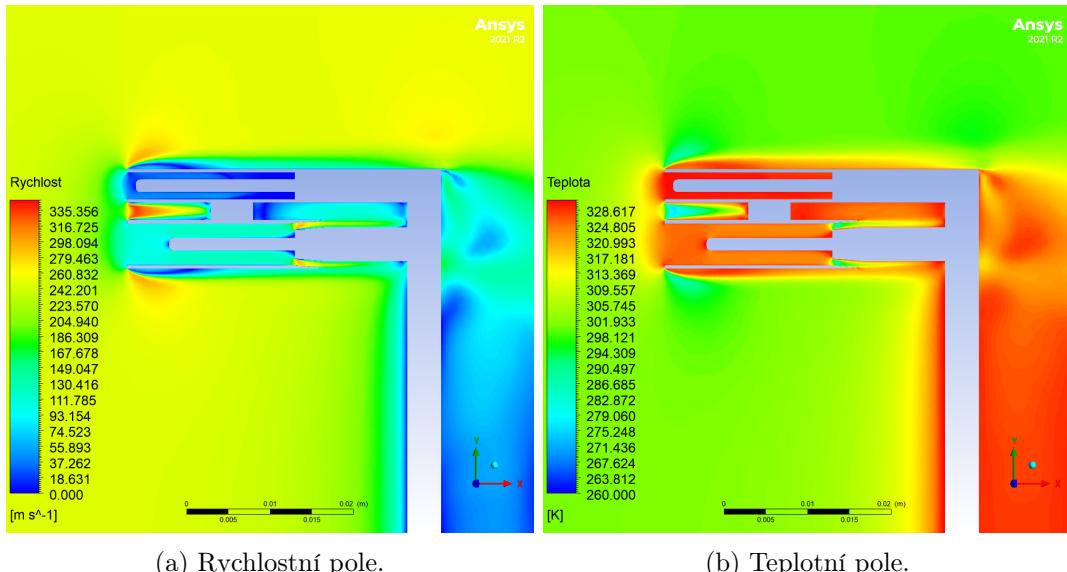
### 5.3 Sonda se stíněním čidla B

Odstínění čidla B bylo zajištěno pomocí trubice  $5.8 \times 0.4\text{ mm}$  uchycené ke stínění čidla A, viz obrázek 5.3.1. Detailní geometrie spolu s použitými rozměry modelu jsou uvedeny v příloze 2.



Obrázek 5.3.1: Sonda se stíněním čidla B

Pro tuto geometrii byl proveden pouze jeden výpočet, a to pro rychlosť  $250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Důvodem byla volba příliš úzké stínící trubice, která způsobovala výrazně vyšší ohřev čidla B oproti původní verzi (restituční faktor narostl o 7.3 %).



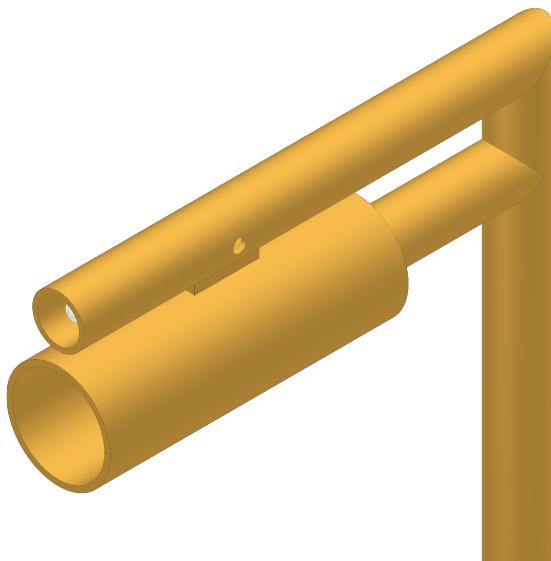
(a) Rychlostní pole.

(b) Teplotní pole.

Obrázek 5.3.2: Vizualizace vypočtených dat pro sondu se stíněním čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění  $250 \frac{m}{s}$ .

## 5.4 Sonda s rozšířeným stíněním čidla B

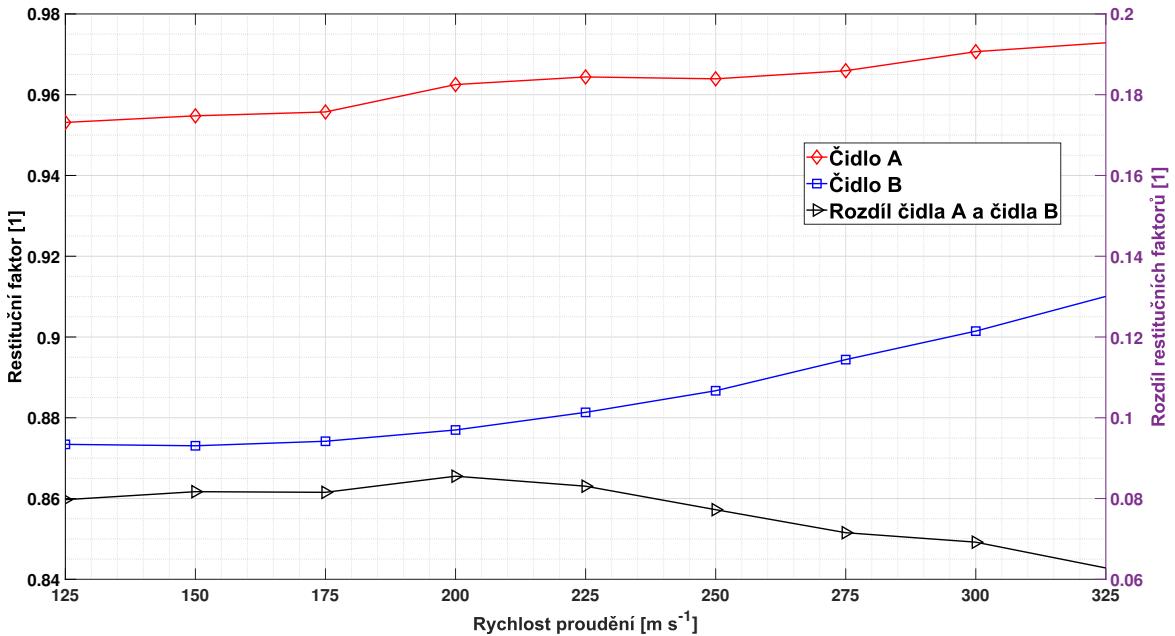
Oproti předchozí úpravě došlo pouze ke zvětšení trubice stínící čidlo B – místo původního rozměru byla použito stínění o vnějším průměru  $8 mm$  a tloušťce stěny  $0.45 mm$  (geometrie podrobně popsána v příloze 3). Zde byl již ohřev čidla B přijatelný a bylo tak analyzováno chování sondy obdobně, jako v kapitole 5.2 – byla zkoumána závislost restitučních faktorů na rychlosti proudění v rozmezí  $125 \div 325 \frac{m}{s}$  a na natočení v rovině symetrie a kolmo na ní, opět v rozsahu  $\pm 15^\circ$ .



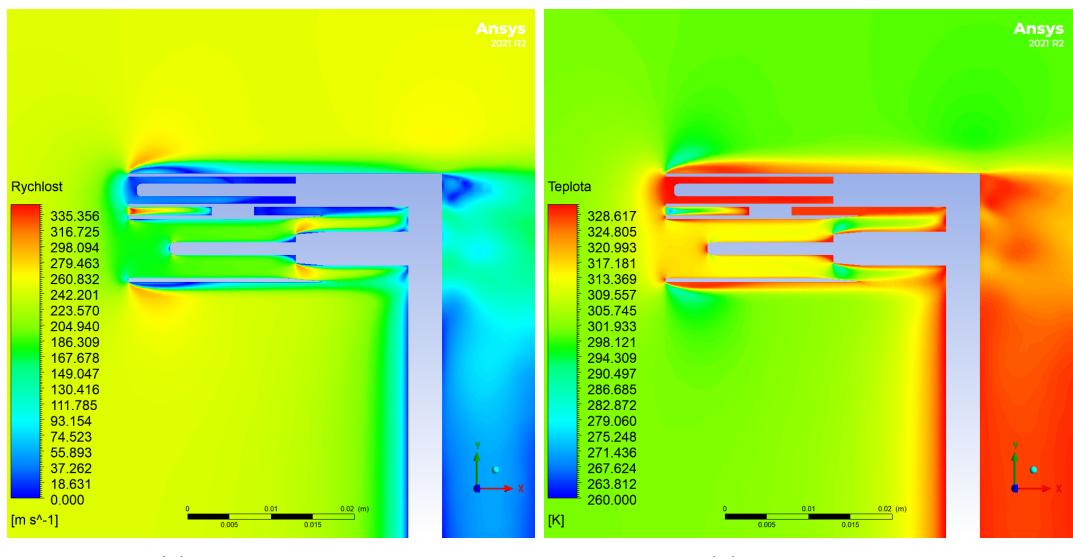
Obrázek 5.4.1: Sonda se stíněním čidla B

### 5.4.1 Chování při různých rychlostech proudění

Výsledky výpočtu shrnuje obrázek 5.4.2. Přidáním stínící trubice došlo ke snížení vlivu stínění čidla A, nicméně za cenu zvýšení restitučního faktoru čidla B, a to o přibližně 5 %.



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



(a) Rychlostní pole.

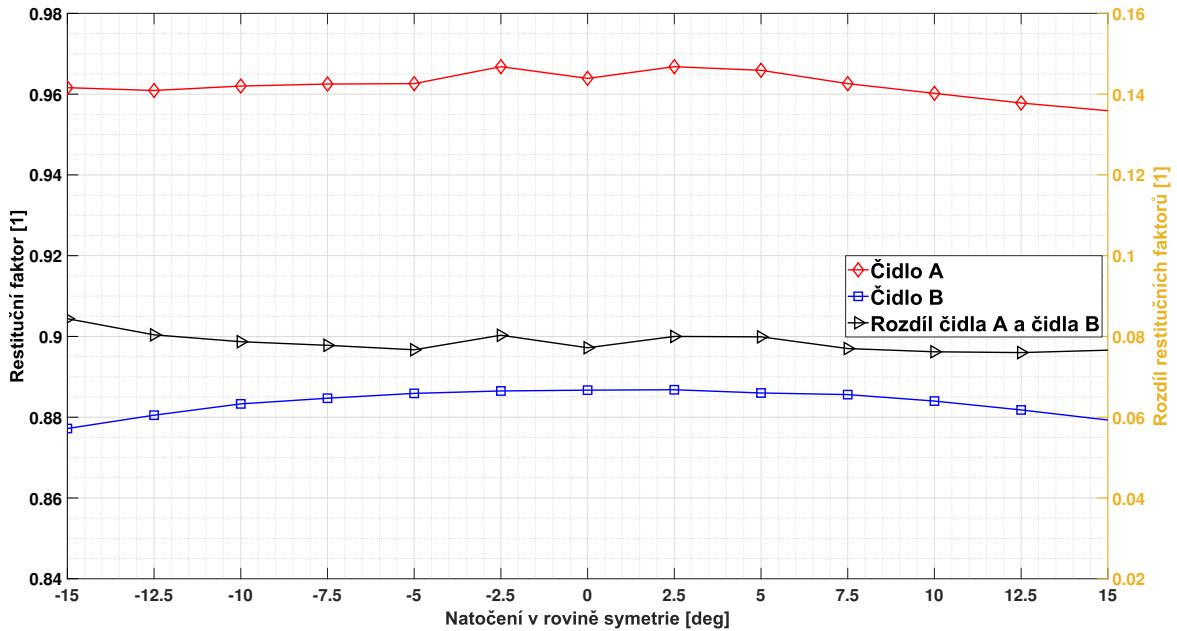
(b) Teplotní pole.

Obrázek 5.4.3: Vizualizace vypočtených dat pro sondu s rozšířeným stíněním čidla B v rovině symetrie pro rychlosť proudění  $250 \frac{m}{s}$ .

### 5.4.2 Směrová citlivost v rovině symetrie

Zde bylo zlepšení vlivem přidání stínění nejpatrnější. Restituční faktor čidla B se oproti variantě sondy bez stínění (kapitola 5.2) při natáčení v rovině symetrie prakticky

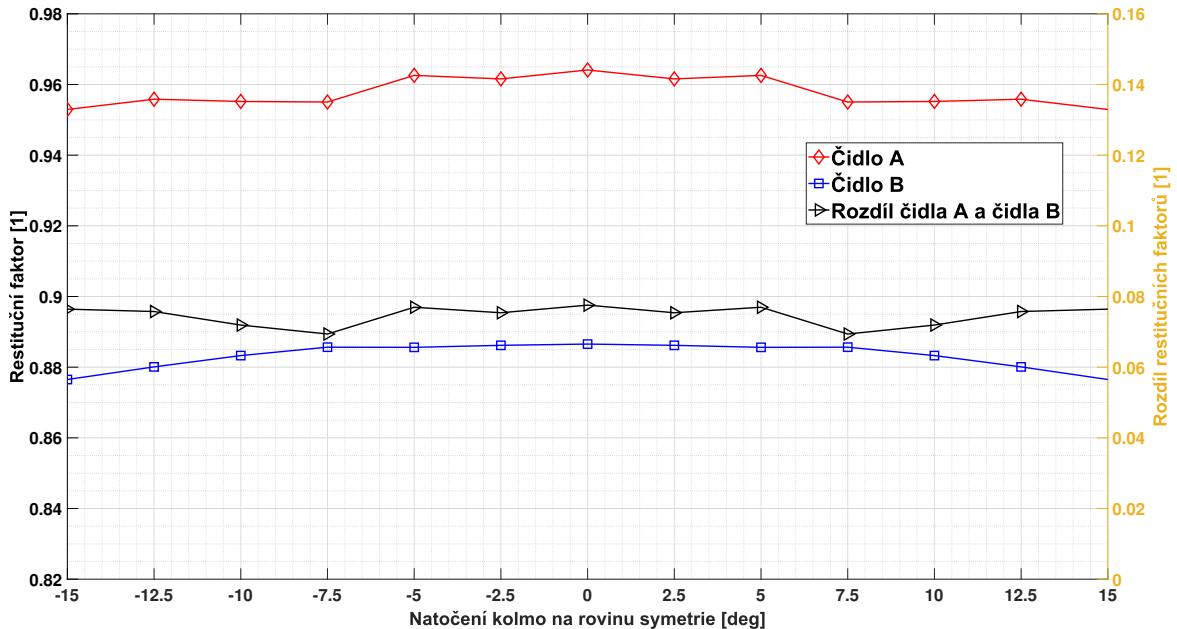
neměnil, viz obrázek 5.4.4.



Obrázek 5.4.4: Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení sondy v rovině symetrie

#### 5.4.3 Směrová citlivost kolmo na rovinu symetrie

Výsledky výpočtů, reprezentované na obrázku 5.4.5, představovaly i v tomto případě zlepšení chování restitučního faktoru čidla B, nebylo však tak výrazné, jako při natáčení sondy v rovině symetrie.



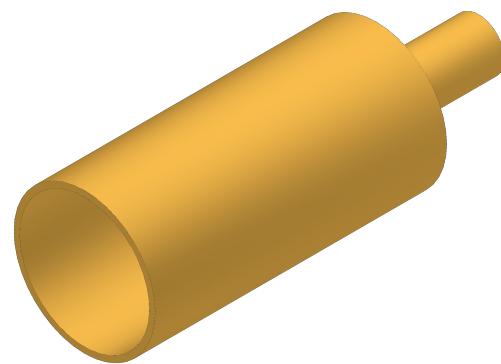
Obrázek 5.4.5: Závislost restitučních faktorů sondy s rozšířeným stíněním čidla B na natočení kolmo na rovinu symetrie

#### **5.4.4 Zhodnocení**

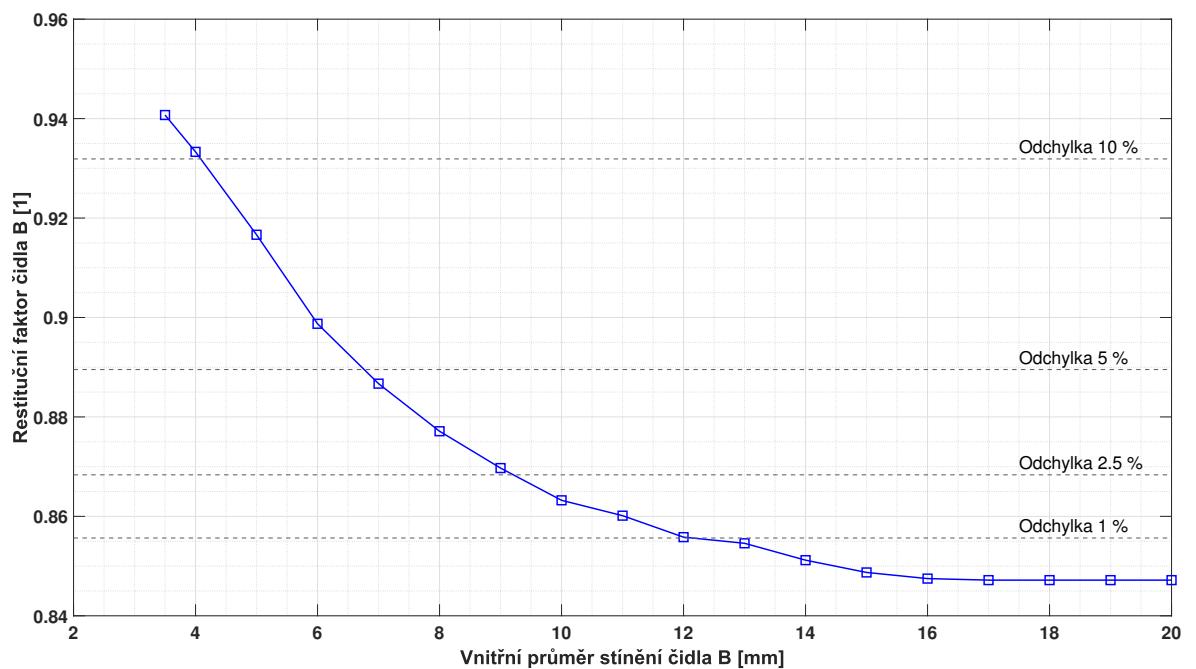
Přidáním stínění k čidlu B došlo ke snížení směrové citlivosti sondy a k zmenšení vlivu stínění čidla A na restituční faktor čidla B. Negativním dopadem této úpravy geometrie byl vyšší ohřev čidla B, dalším krokem analýzy konstrukčních úprav tak bylo detailnější zkoumání vlivu průměru stínění čidla B na jeho restituční faktor.

## 5.5 Vliv průměru stínění čidla B

DATA



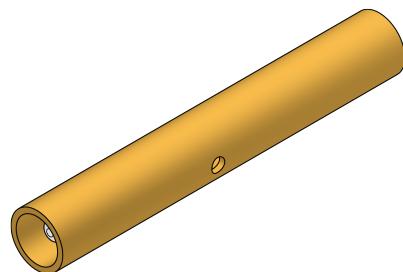
Obrázek 5.5.1: Stínění čidla B



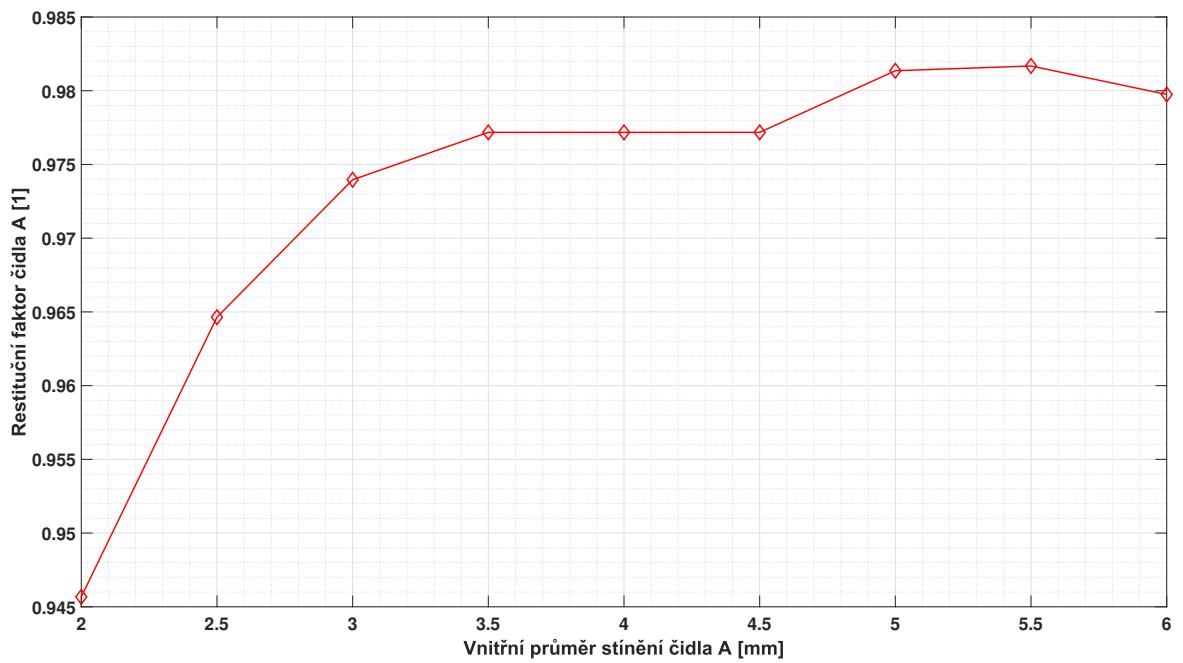
Obrázek 5.5.2: Závislost restitučního faktoru čidla B na průměru stínění

## 5.6 Vliv průměru stínění čidla A

DATA



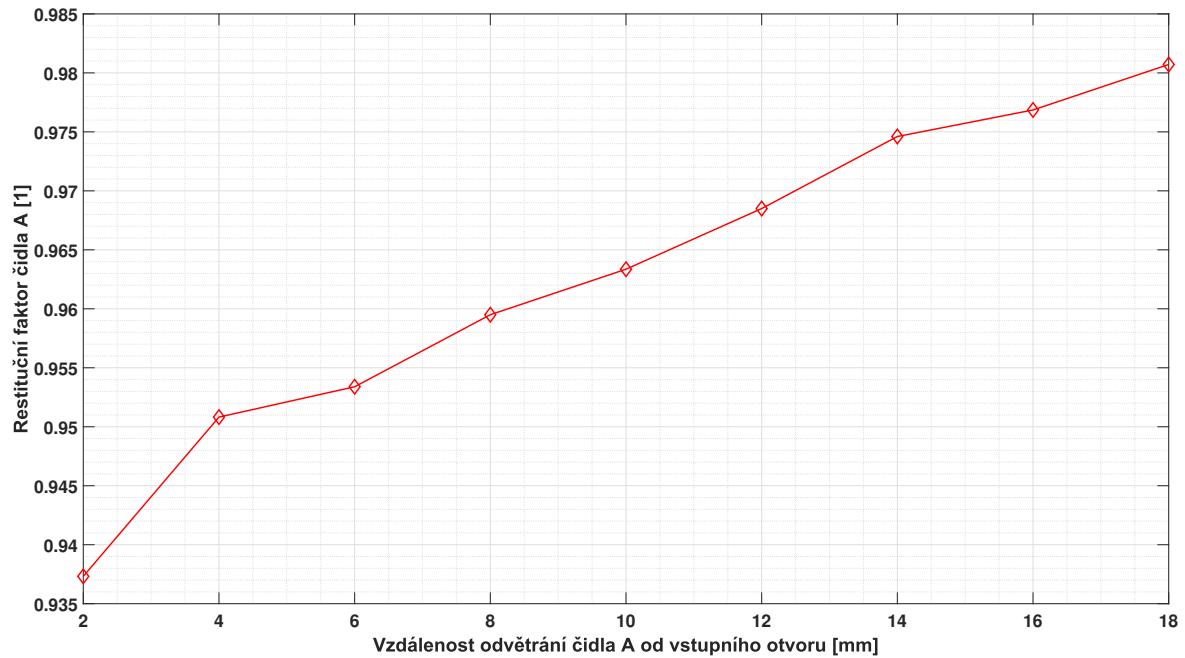
Obrázek 5.6.1: Stínění čidla A



Obrázek 5.6.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru stínění

## 5.7 Vliv polohy odvětrání čidla A

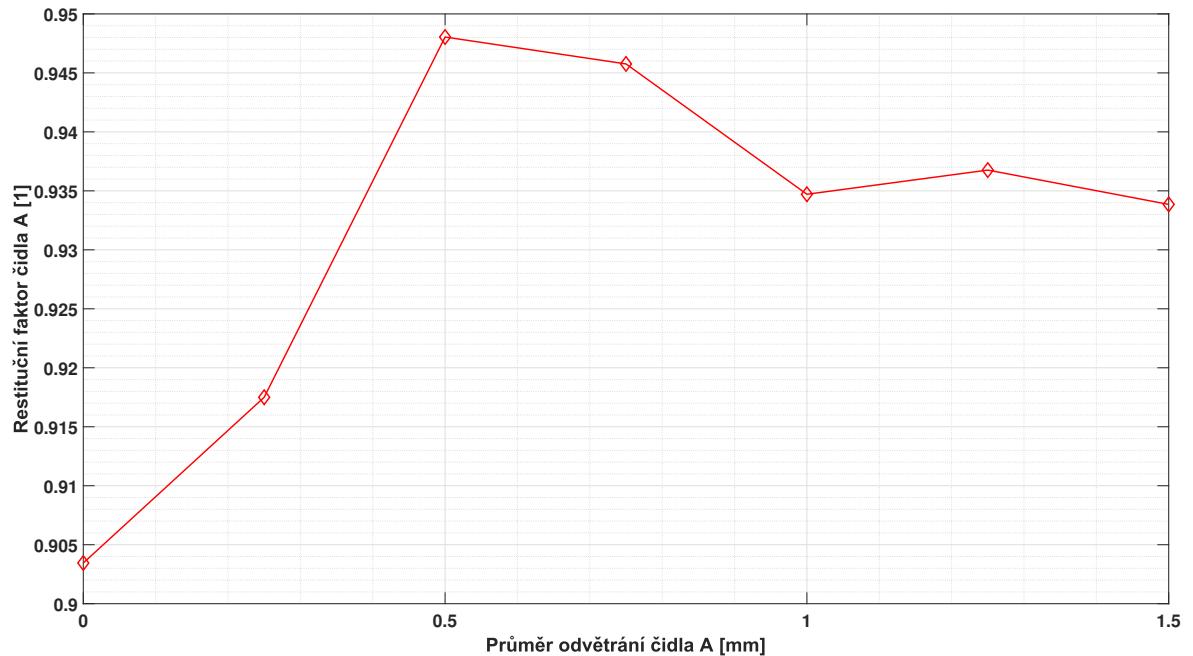
DATA



Obrázek 5.7.1: Závislost restitučního faktoru čidla A na poloze odvětrání

## 5.8 Vliv průměru odvětrání čidla A

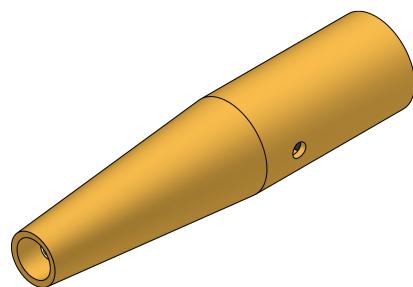
DATA



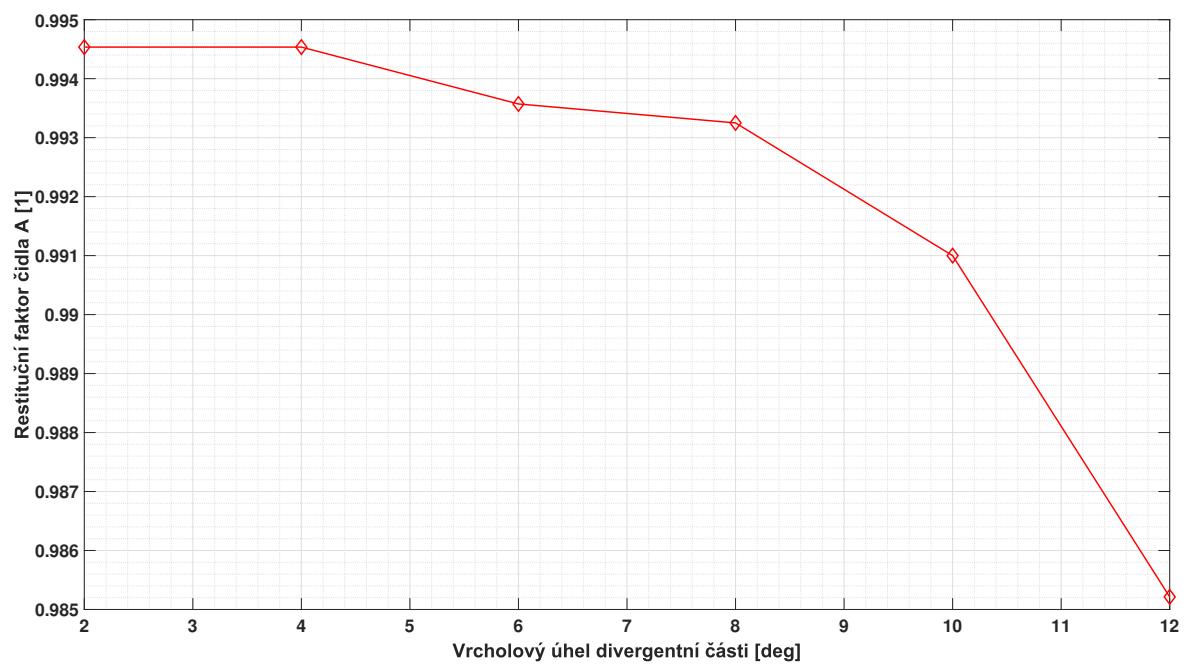
Obrázek 5.8.1: Závislost restitučního faktoru čidla A na průměru odvětrání

## 5.9 Vliv přidání divergentního vstupu pro čidlo A

DATA



Obrázek 5.9.1: Čidlo A s divergentním vstupem



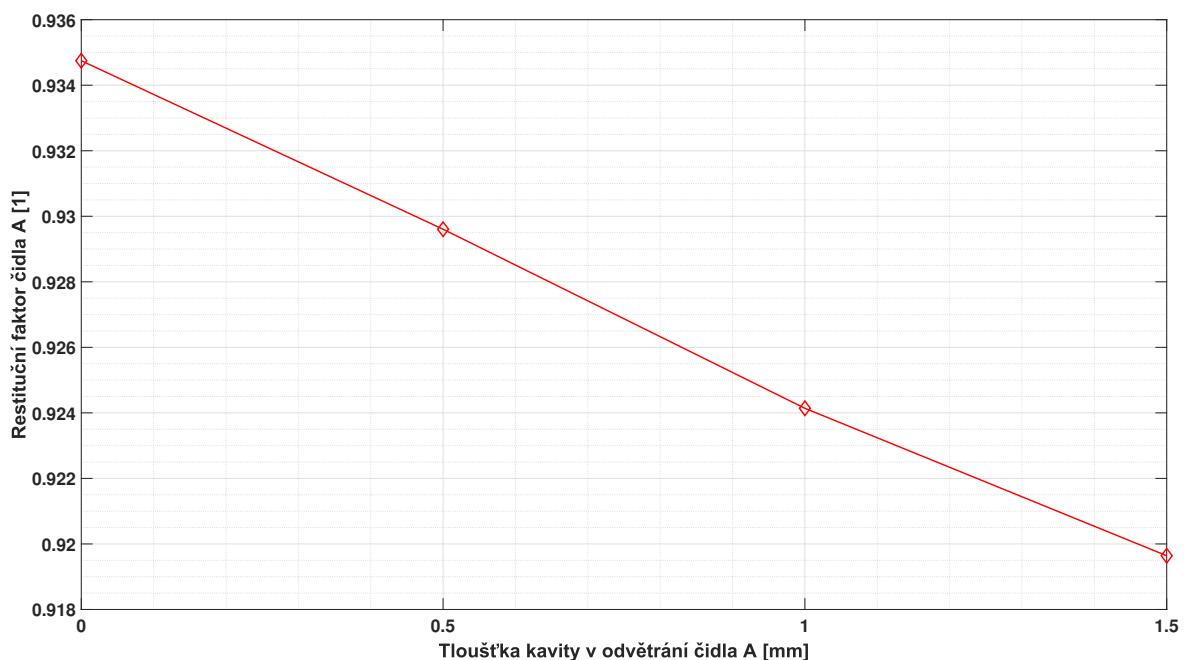
Obrázek 5.9.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na vrcholovém úhlu divergentního vstupu

## 5.10 Vliv přidání kavity do stínění čidla A

DATA



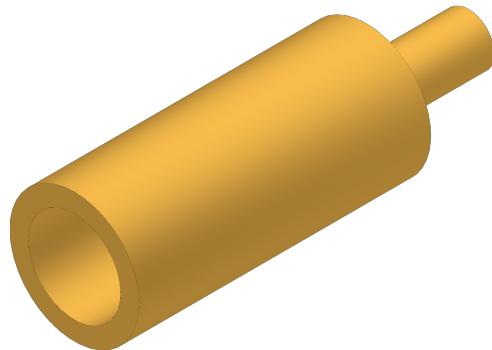
Obrázek 5.10.1: Čidlo A s přidanou kavitou do stínění



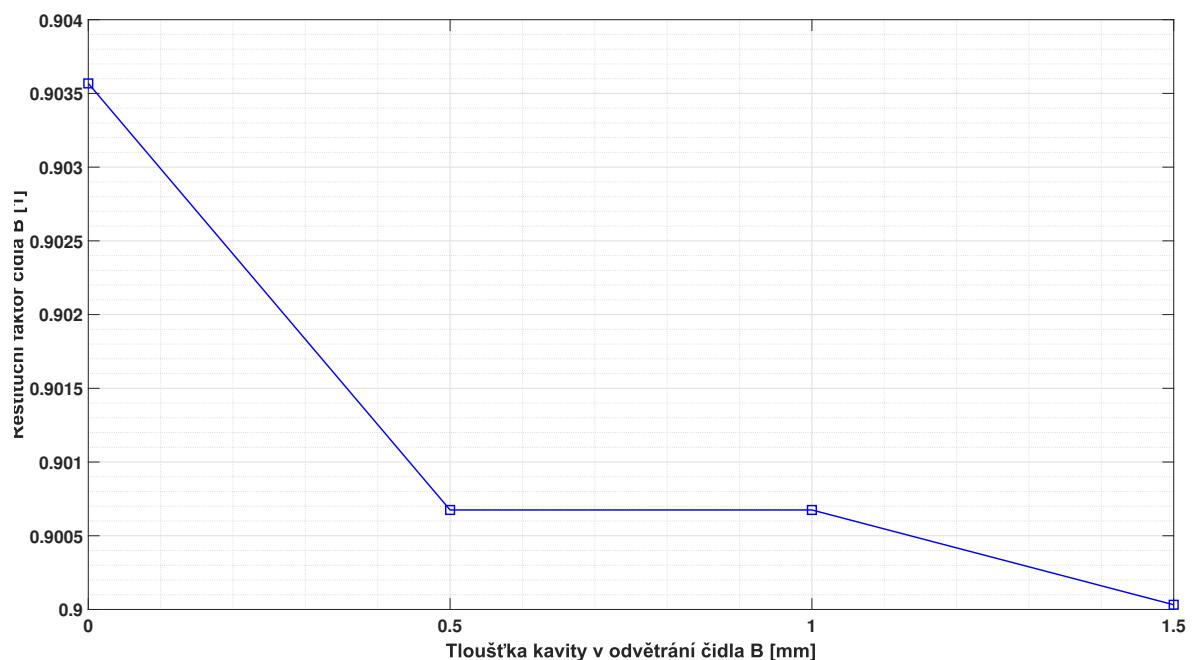
Obrázek 5.10.2: Závislost restitučního faktoru čidla A na tloušťce kavity uvnitř stínění

## 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

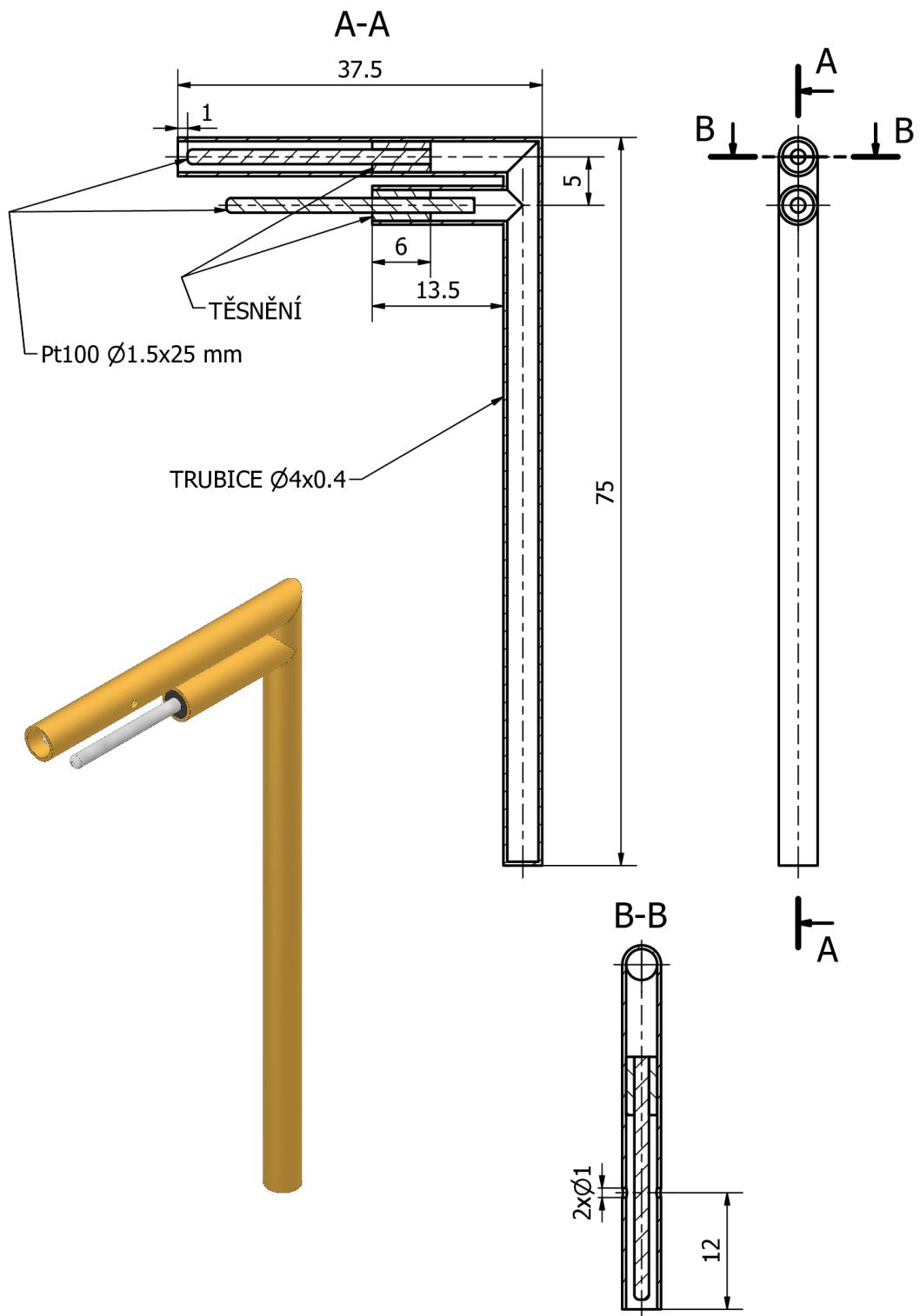
## **Seznam použité literatury**

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

## 8 Přílohy

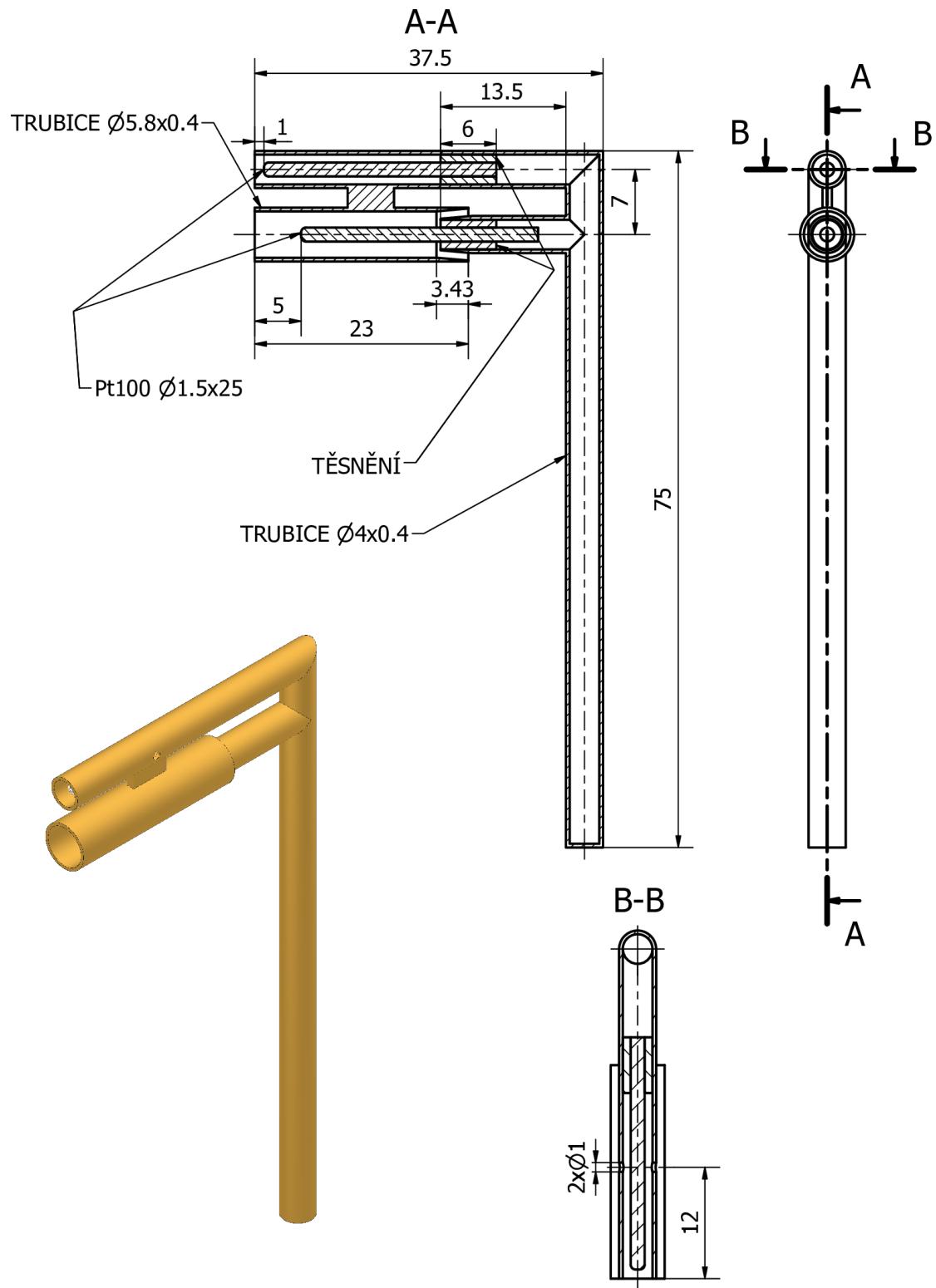
### Příloha 1 – Sonda bez stínění čidla B

DRTA SONDA BEZ OPLÁŠTĚNÍ ČIDLA B



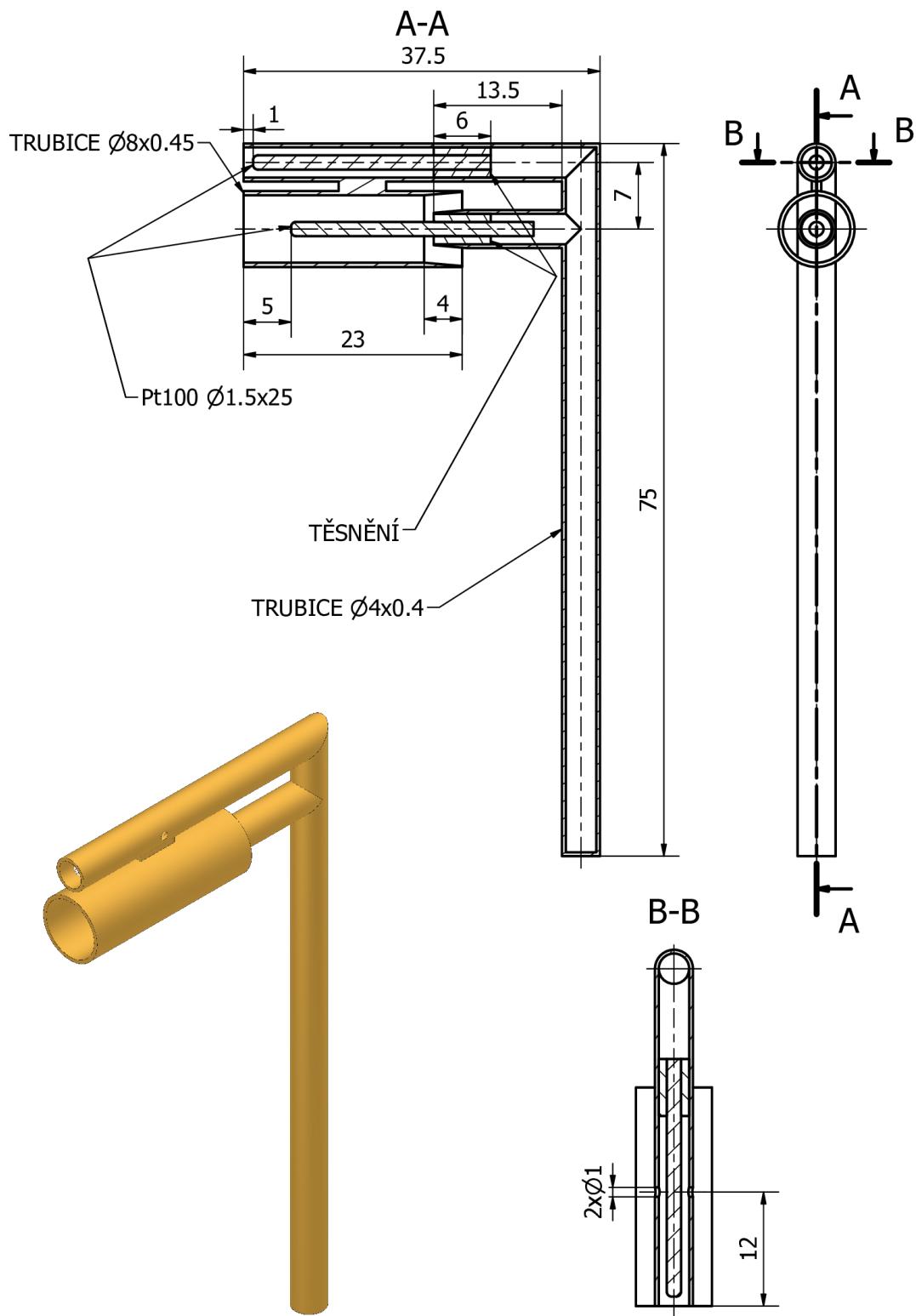
## Příloha 2 – Sonda se stíněním čidla B

DRTA SONDA S OPLÁŠTĚNÍM ČIDLA B



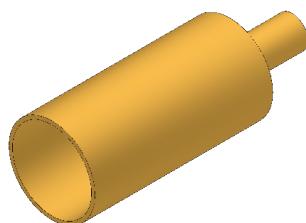
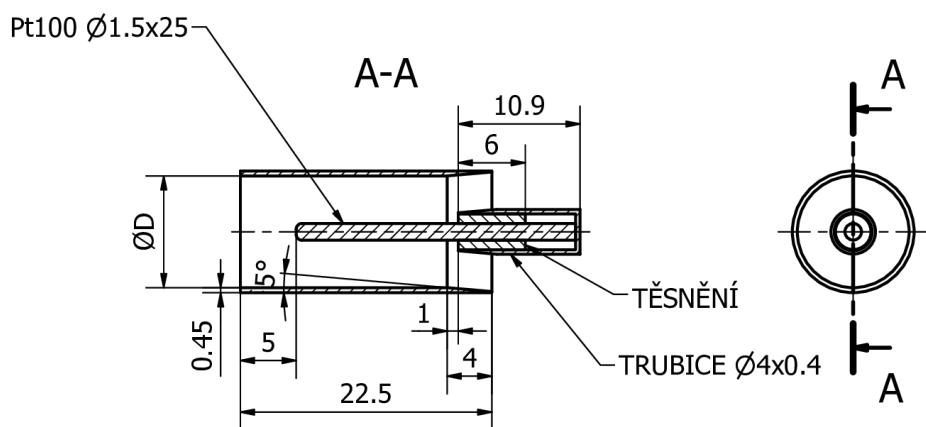
### Příloha 3 – Sonda s rozšířeným stíněním čidla B

DRTA SONDA S ROZŠÍŘENÝM OPLÁŠTĚNÍM ČIDLA B



## Příloha 4 – Stínění čidla B

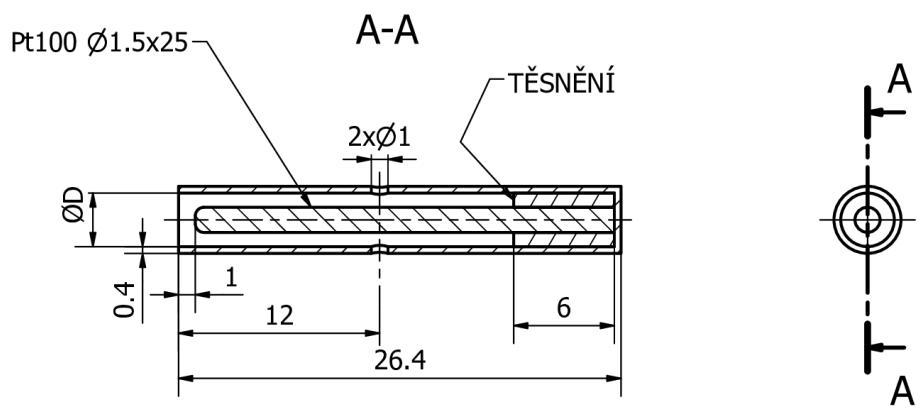
### STÍNĚNÍ ČIDLA B



| D [mm] |
|--------|
| 3.5    |
| 4      |
| 5      |
| 6      |
| 7      |
| 8      |
| 9      |
| 10     |
| 11     |
| 12     |
| 13     |
| 14     |
| 15     |
| 16     |
| 17     |
| 18     |
| 19     |
| 20     |

## Příloha 5 – Stínění čidla A

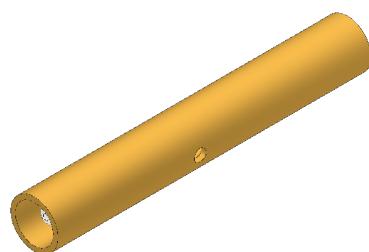
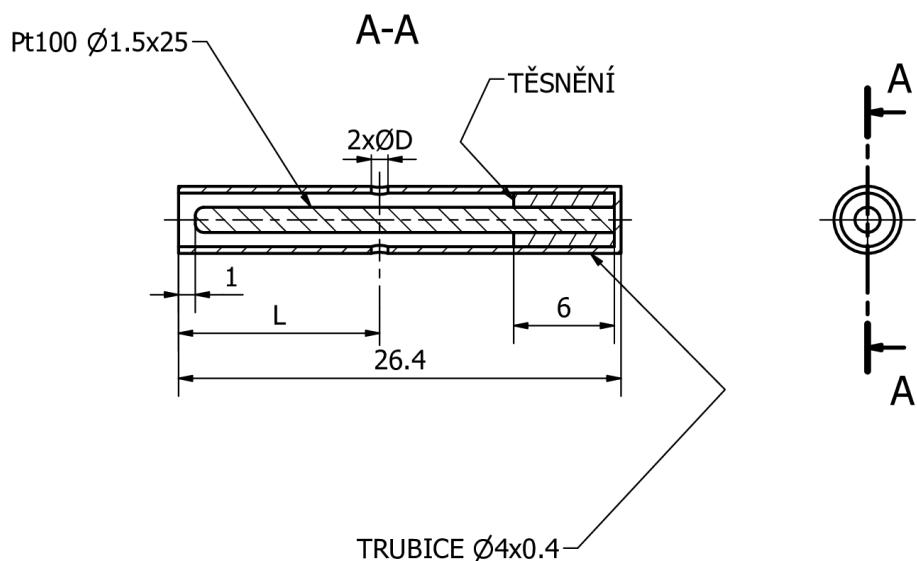
### STÍNĚNÍ ČIDLA A



| D [mm] |
|--------|
| 2      |
| 2.5    |
| 3      |
| 3.5    |
| 4      |
| 4.5    |
| 5      |
| 5.5    |
| 6      |

## Příloha 6 – Odvětrání čidla A

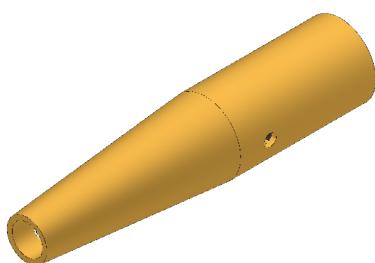
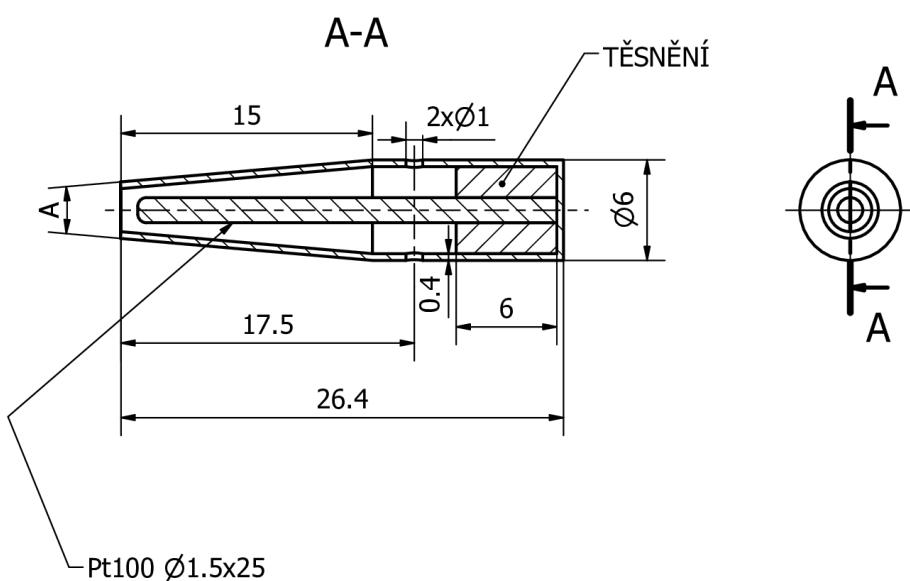
### ODVĚTRÁNÍ ČIDLA A



| D [mm]<br>(L = 12) | L [mm]<br>(D = 1) |
|--------------------|-------------------|
| 0                  | 2                 |
| 0.25               | 4                 |
| 0.5                | 6                 |
| 0.75               | 8                 |
| 1                  | 10                |
| 1.25               | 12                |
| 1.5                | 14                |
|                    | 16                |
|                    | 18                |

## Příloha 7 – Divergentní vstup čidla A

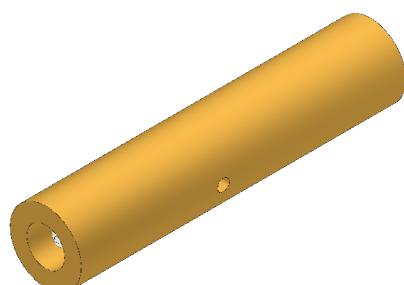
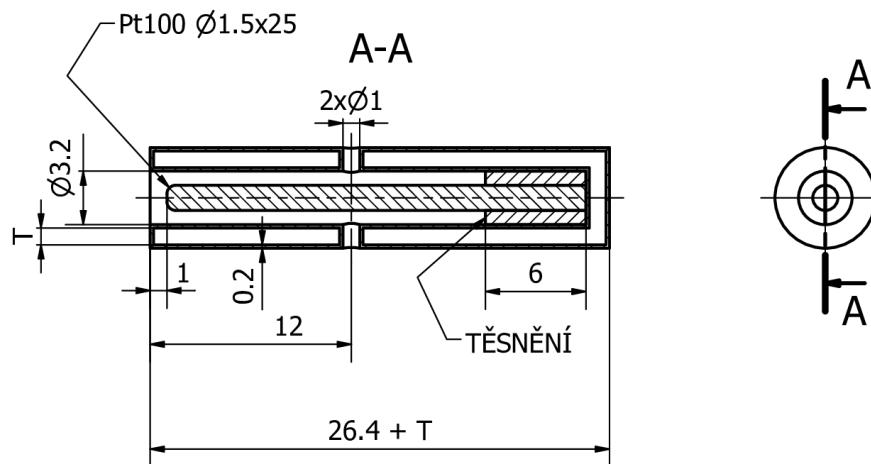
### DIVERGENTNÍ VSTUP ČIDLA A



| A [deg] |
|---------|
| 2       |
| 4       |
| 6       |
| 8       |
| 10      |
| 12      |

## Příloha 8 – Kavita ve stínění čidla A

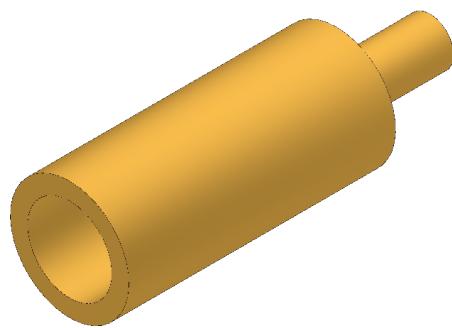
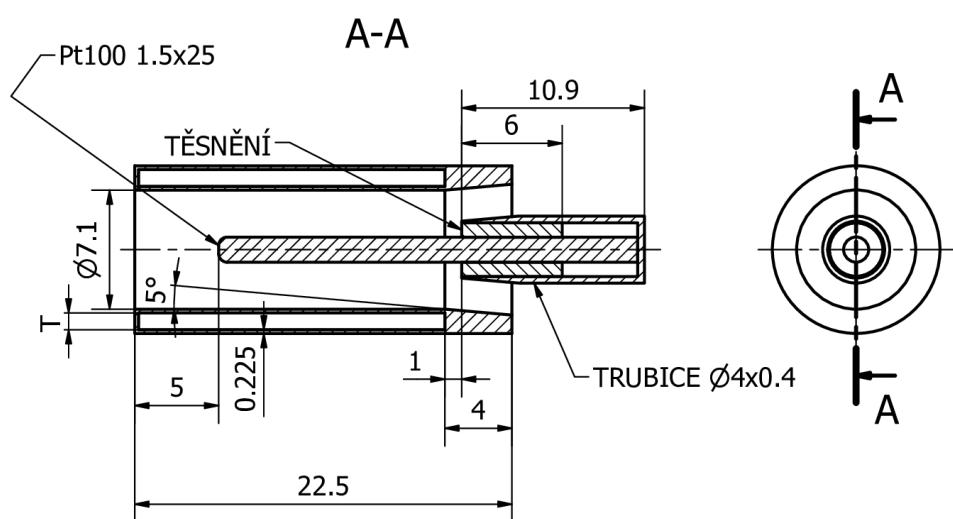
### KAVITA VE STÍNĚNÍ ČIDLA A



| T [mm] |
|--------|
| 0      |
| 0.5    |
| 1      |
| 1.5    |

## Příloha 9 – Kavita ve stínění čidla B

### KAVITA VE STÍNĚNÍ ČIDLA B



| T [mm] |
|--------|
| 0      |
| 0.5    |
| 1      |
| 1.5    |