



# Měření a výpočet supersonických ejektorů

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Bc. Lukáš Vojta**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Vojta**

Osobní číslo: **S16000018**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**

Název tématu: **Měření a výpočet supersonických ejektorů**

Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši literatury o nadzvukových ejektorech a metodikách měření statických tlaků, měření hmotnostních toků clonami a dýzami.
2. Nastudujte měřicí trať nadzvukových ejektorů v laboratořích.
3. Proměřte charakteristiky supersonického ejektoru (závislost dosaženého protitlaku na nasávaném toku) pro různé klidové tlaky hnacího vzduchu.
4. Spočítejte stejné konfigurace a režimy ejektoru metodou CFD a analytickou metodou.
5. Výsledky zpracujte a okomentujte.
6. Formulujte závěry.
7. V seznamu použité literatury uveďte alespoň 10 zdrojů.

Rozsah grafických prací: **10 stran**

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

[1] **DVOŘÁK, V.**, *Výzkum a optimalizace ejektorů, habilitační práce. TUL, 2010.*

[2] **DVOŘÁK, V.**, *Proudové procesy v ejektorech, disertační práce. TUL, 2013.*

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.**

Katedra energetických zařízení

Datum zadání diplomové práce:


**1. února 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**1. srpna 2019**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 28. února 2018

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15. 5. 2018

Podpis:



## Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D., a konzultantu Ing. Janu Kracíkovi za trpělivost a cenné rady při vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval svým přátelům a rodině, která mě vždy podporovala v profesním i osobním životě.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá analytickým, numerickým a experimentálním studiem proudění vzduchu v nadzvukovém ejektoru, který je umístěn v laboratoři katedry energetických zařízení na Technické Univerzitě v Liberci. Tento ejektor prošel kompletní opravou směšovací komory, kde došlo ke změně geometrie. S takto upravenou geometrií bylo provedeno několik měření, při nastaveních vzdáleností výstupní části trysky od směšovací komory, a to *1 mm, 2 mm a 3 mm*. Dále pak při hodnotách hnacího tlaku *200kPa a 300kPa*.

## **Klíčová slova**

ejektor, vzduch, numerická simulace, analytická metoda, nadzvukové proudění, Machovo číslo, Lavalova tryska

## **Annotation**

The master's thesis deals with the analytical, numerical and experimental investigation of the flow in the supersonic air ejector which is situated in the laboratory of the Department of Power Engineering Equipment at the Technical University of Liberec. The ejector mixing chamber had to be completely repaired since a scratch due to the previous machining had been found. As a result, a new geometry of the mixing chamber has been created. There were conducted several measurements for a different nozzle exit position (NXP): *1 mm, 2 mm, 3 mm*. Furthermore, for a given NXP, two different values of stagnation pressure of *200 kPa and 300 kPa* at the primary air inlet were investigated in more detail.

## **Keywords**

ejector, air, numerical analysis, analytical method, supersonic flow, Mach number, de Laval nozzle

## Obsah

Seznam použitého značení .....	7
Význam indexů .....	8
1 Úvod .....	9
1.1 Princip a funkce ejektoru.....	9
1.2 Využití ejektorů v praxi.....	10
1.3 Současný stav znalostí.....	11
2 Analytické řešení.....	13
2.1 Výpočet směšování beze ztrát .....	13
3 Experimentální výzkum .....	16
3.1 Ejektorová trať .....	16
3.2 Eliminace výrobních chyb.....	17
3.3 Měření veličin .....	19
3.4 Ověření použitelnosti diferenčních snímačů tlaku .....	20
3.5 Výpočet hmotnostního toku .....	22
3.6 Postup výpočtu hmotnostního toku .....	24
3.7 Metodika měření na ejektorové trati .....	25
3.8 Nejistoty měření .....	26
4 Numerický výpočet .....	28
4.1 Tvorba sítě.....	28
4.2 Nastavení výpočtového softwaru .....	29
5 Výsledky.....	31
5.1 Analytická metoda.....	31
5.2 CFD .....	34
5.3 Experimentální měření .....	40
5.4 Porovnání jednotlivých výsledků .....	43
6 Diskuze.....	49
7 Závěr.....	50
Literatura .....	51

## Seznam použitého značení

$M [-]$ .....	Machovo číslo
$\dot{m} [kg \cdot s^{-1}]$ .....	hmotnostní tok
$\eta [1; \%]$ .....	účinnost
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$ .....	hustota
$c [m \cdot s^{-1}]$ .....	rychlost
$A [m^2]$ .....	plocha, průřez
$h [kJ \cdot kg^{-1}]$ .....	měrná entalpie
$\Gamma [-]$ .....	ejekční součinitel
$\Theta [-]$ .....	poměr klidových teplot
$q(\lambda)[-]$ .....	aerodynamická funkce hustoty
$\mu [-]$ .....	poměr průřezů
$\lambda [-]$ .....	bezrozměrná rychlost
$\chi [-]$ .....	Poissonova konstanta
$T [K]$ .....	termodynamická teplota
$z(\lambda)$ .....	aerodynamická funkce
$a [m \cdot s^{-1}]$ .....	rychlost
$p [Pa]$ .....	tlak
$\pi(\lambda)$ .....	aerodynamická funkce tlaku
$\tau(\lambda)$ .....	aerodynamická funkce teploty
$r [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ .....	měrná plynová konstanta
$\psi [-]$ .....	součinitel stlačitelnosti
SK .....	směšovací komora



## Význam indexů

$0$	.....	statická hodnota veličiny
$01$	.....	statická/klidová hodnota veličiny
$1$	.....	absolutní hodnota veličiny
$SK$	.....	hodnota přiřazena směšovací komoře
$12$	.....	společná veličina pro stav $1$ a $2$
$kr$	.....	kritický stav
$s$	.....	sání
$v$	.....	výtlač
$T$	.....	hrdlo
$max$	.....	maximální

# 1 Úvod

V úvodní kapitole budou předneseny základní principy a funkce správně fungujících ejektorů a také bude uveden současný stav poznatků, ke kterým v současnosti výzkum dospěl.

## 1.1 Princip a funkce ejektoru

Ejektor, jakožto zařízení pracující s vysokotlakým médiem, je konstrukčně velmi jednoduchý. Ejektor základní konstrukce má jen čtyři části. Hlavní částí je konvergentně divergentní tryska, která umožňuje docílit nadzvukových rychlostí hnacího média. Druhou částí je sací potrubí, třetí je směšovací komora a poslední, čtvrtou částí je difuzor.

Konvergentně divergentní tryska umožňuje urychlení hnacího proudu až do supersonických rychlostí. Tento stav je docílen pouze změnou geometrie jednotlivých částí trysky. Obvykle se tryska skládá ze dvou protilehlých kuželů, kde po směru proudu se první zužuje (proud se urychluje,  $M \rightarrow 1$ ), dále proud prochází skrze hrdlo trysky ( $M = 1$ ) a vchází do druhého, rozšiřujícího se kuželu (proud se dále urychluje,  $M > 1$ ).

Sací potrubí spolu se směšovací komorou se nacházejí v těsné blízkosti za výstupem z Lavalovy trysky. Protože hnací proud vystupuje z divergentní části trysky vysokou rychlostí, strhává díky třecím silám ve smykové vrstvě okolní proud do směšovací komory, tudíž dochází k nasávání hnaného proudu a vytváření podtlaku na sání. Ve směšovací komoře dochází primárně k mísení obou proudů, k ustalování jejich rychlostí a tlaků.

Za směšovací komorou může či nemusí být zařazen difuzor. Difuzor má tvar rozšiřujícího se kužele, takto přidaná geometrie zvyšuje nárůst statického tlaku na úkor snížení kinetické energie, čímž umožňuje překonávat vyšší protitlaky a také zvyšuje účinnost ejektoru jako celku.

Ejektory lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou je použití pro stlačitelné tekutiny, což je případ této diplomové práce. Dají se ale použít i pro nestlačitelné tekutiny, potom pro takovéto ejektory používáme spíše výraz injektory. Při konstrukčním návrhu není pevně dáno, že musí být hnací proud v ose směšovací komory. Lze najít i případy konstrukcí, kdy je ejektor poháněn několika tryskami, které jsou umístěny například po obvodu směšovací komory [1]. Obecně nelze stanovit, který konstrukční návrh je ten nejúčinnější.

## **1.2 Využití ejektorů v praxi**

Jak již vyplývá z předchozí kapitoly, ejektor se skládá jen z částí, které neobsahují pohyblivé elementy, což mu umožňuje široké použití v procesech, kde by bylo použití běžných čerpadel či ventilátorů problematické. Díky těmto vlastnostem může být ejektor použit pro čerpání agresivních tekutin, které by mohly tyto pohyblivé části poškozovat nebo způsobovat jejich nadměrné opotřebení.

Dalším možným použitím je jako zdroj vysokého podtlaku (vytvoření vakua), které je potřeba při různých technologických procesech nebo jako pohon aerodynamických tunelů. Není potřeba pořizovat drahé vývěvy, postačí vysokotlaké médium a ejektor [2].

Pravděpodobně se největšího uplatnění dostane ejektorům v alternativních chladicích zařízeních, kde je ejektor spolu s termickými solárními panely použit místo kompresoru.

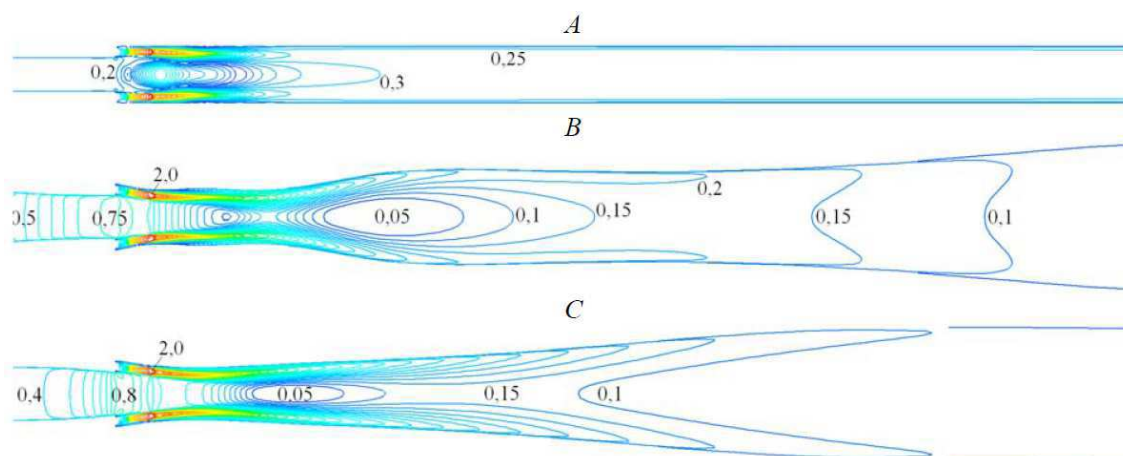
Jejich další využití je například při zvyšování tahu leteckých motorů, dopravě sypkých látek nebo zvyšování účinnosti turbín [3].

Celkově je příčinou řídkého využití ejektorů jejich nízká účinnost (<30%), proto se nyní pracuje na optimalizaci ejektorů, zvýšení jejich účinnosti a širším využití v průmyslu.

### 1.3 Současný stav znalostí

Současný výzkum se spíše ubírá směrem lepšího pochopení dějů, ke kterým během nadzvukového proudění v ejektoru dochází. K tomu nepochybně také patří studium tvaru Lavalovy trysky, směšovací komory a difuzoru. Při správném nastavení výpočtového softwaru lze provádět numerické simulace téměř se shodnými výsledky jako při experimentálním měření. Důležitou součástí numerických simulací je také výpočtový čas, který spolu s přesností roste. Proto se při numerických simulacích zavádějí jistá zjednodušení, která nemají příliš značný vliv na přesnost výsledků a jejich následné porovnání s experimentálním měřením. Mezi tato zjednodušení můžeme zařadit například Fannův proces, kdy při numerické simulaci zanedbáme tření tekutiny o stěny ejektoru, tento děj ovšem při reálném experimentálním měření nastává.

Studiem tvaru Lavalovy trysky, směšovací komory a difuzoru se na katedře energetických zařízení na TU v Liberci zabývají doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D., vedoucí této diplomové práce, a Ing. Jan Kracík, její konzultant. Dnes používané optimalizační metody jsou založeny převážně na numerických simulacích. Tento způsob umožňuje nalezení mnoha variant tvarů trysek, směšovacích komor a difuzorů za relativně krátký čas. Ukázka příkladu numerické optimalizace směšovací komory a difuzoru podzvukového ejektoru je na obrázku č. 1 a výsledné hodnoty v tabulce č. 1.

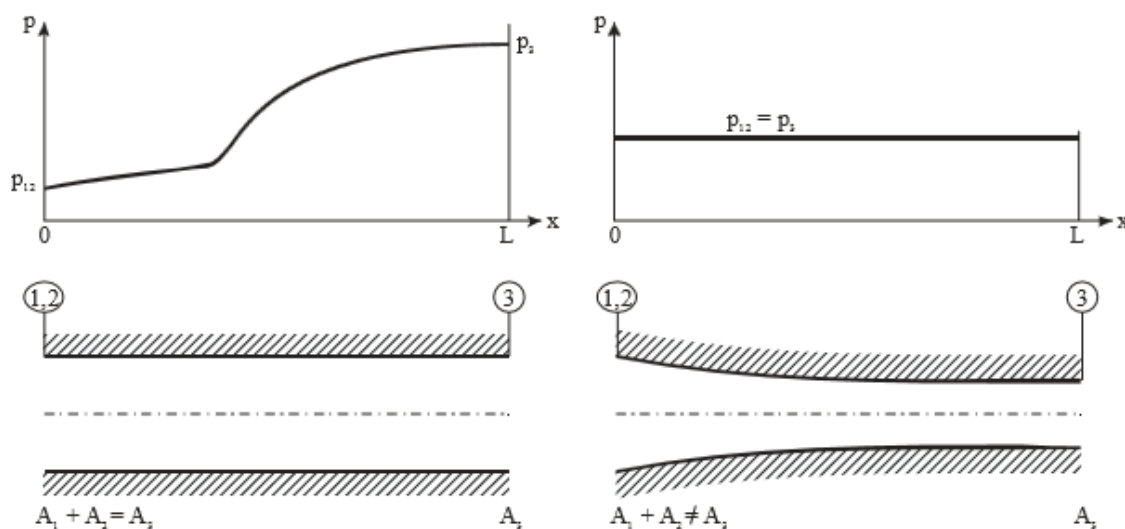


**Obr. 1:** Výsledné tvary ejektorů s konturami Machova čísla, A – počáteční tvar, B – optimalizovaný tvar základní metodou, C – optimalizovaný tvar vylepšenou metodou [4]

	$M_1[-]$	$M_2[-]$	$\dot{m}_1[kg \cdot s^{-1}]$	$\dot{m}_2[kg \cdot s^{-1}]$	$\eta[\%]$
<b>A</b>	2,00	0,24	0,3802	0,0802	4,21
<b>B</b>	2,05	0,76	0,3732	0,2858	15,26
<b>C</b>	2,04	0,80	0,3765	0,2906	15,39

**Tab. 1:** Vybrané vypočtené hodnoty optimalizovaných ejektorů [4]

Při návrhu ejektoru je možné využít dva typy směšovací komory. První z nich je komora rovnoplochá, druhá je rovnotlaká. U rovnoploché směšovací komory mluvíme například o válcové dutině, kde je výroba velmi jednoduchá, tudíž cena velmi nízká. Naopak u směšovací komory rovnotlakého typu je výroba podstatně komplikovanější. Stěny směšovací komory mají složitý tvar a její výroba je složitější a tím i nákladnější.



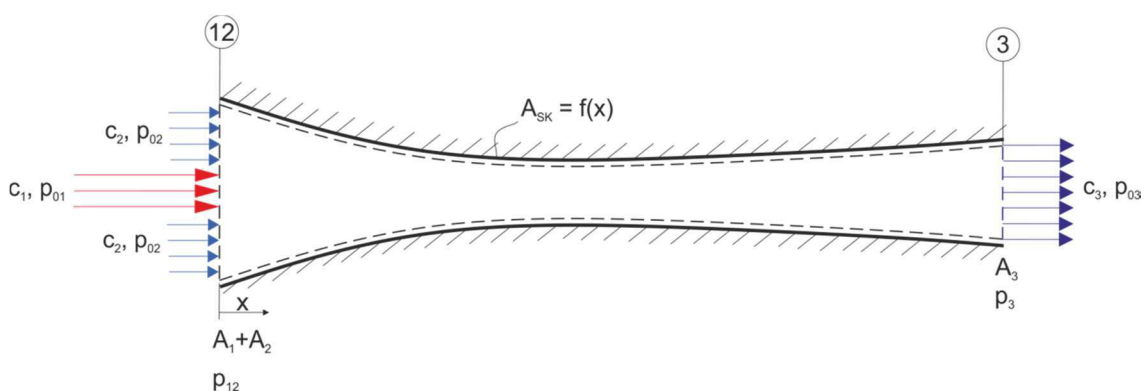
**Obr. 2:** Průběh tlaku v rovnoploché a rovnotlaké směšovací komoře

Použití rovnoploché nebo rovnotlaké směšovací komory není z hlediska vyššího využití energie zcela jednoznačné. Při použití rovnoploché směšovací komory dochází k rychlejšímu smíšení obou proudů, což má za následek zvýšení ztrát směšováním. Naopak u rovnotlaké směšovací komory dochází k pomalejšímu směšováním za konstantního tlaku, ale v důsledku zúžení v rovnotlaké směšovací komoře dochází k opětovnému urychlení proudu a tudíž ke zvýšení třecích ztrát [4]. Z tohoto pohledu se jeví jako ideální nalezení kompromisu mezi směšovací komorou rovnoplochou a rovnotlakou [5].

## 2 Analytické řešení

Analytické metody lze rozdělit na jednorozměrné a dvourozměrné. Dvourozměrné metody jsou využívány hlavně v moderních výpočtových softwarech. V této části diplomové práce se budeme zabývat pouze analytickým řešením s použitím jednorozměrné metody.

Při použití analytické metody musíme zavést určitá zjednodušení. Budeme předpokládat, že proudění je adiabatické a budeme uvažovat rovnoměrný rychlostní profil s kontrolním objemem uvedeným na obr. 3.



Obr. 3: Kontrolní objem

### 2.1 Výpočet směšování beze ztrát

Pro obecný tvar kontrolního objemu lze psát tři základní bilanční rovnice. První z nich je rovnice kontinuity, která má tvar

$$\rho_1 c_1 A_1 + \rho_2 c_2 A_2 = \rho_3 c_3 A_3. \quad (1)$$

Druhou z těchto základních bilančních rovnic je rovnice toku hybnosti, kterou napíšeme za předpokladu, že tlaky obou tekutin na vstupu do směšovací komory budou mít stejnou hodnotu  $p_1 = p_2 = p_{12}$ . Tlak  $p_{12}$  se pak nazývá společný expanzní tlak. Rovnice pak bude ve tvaru

$$\rho_1 A_1 c_1^2 + \rho_2 A_2 c_2^2 + p_{12}(A_1 + A_2) = \rho_3 A_3 c_3^2 + p_3 A_3 + \int_{A_{SKx}} p(x) dA_{SKx}, \quad (2)$$

kde integrál na pravé straně představuje tlakovou sílu na průmět plochy  $A_{SKx}$  směšovací komory do směru  $x$  od obecného tlaku  $p(x)$  na stěně směšovací komory [14] [15].

Třetí rovnicí je rovnice toku energie za předpokladu adiabatického proudění

$$\dot{m}_1 h_{01} + \dot{m}_2 h_{02} = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_{03}. \quad (3)$$

Po zjednodušení těchto rovnic a předpokladu, že měrné izobarické tepelné kapacity a izoentropické exponenty obou proudů budou rovny, lze určit stav proudu na konci směšování

$$p_{03} = p_{01} \frac{\sqrt{(1+\Gamma)(1+\Gamma\Theta_{21})} q(\lambda_1)}{1 + \frac{p_{01}\Gamma}{p_{02}} \sqrt{\Theta_{21}} \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)} q(\lambda_3)}, \quad (4)$$

kde

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{1}{\mu} \frac{p_{02} q(\lambda_2)}{p_{01} q(\lambda_1)} \sqrt{\frac{1}{\Theta_{21}}}. \quad (5)$$

V rovnici č. 5 vyjadřuje člen  $\Theta_{21}$  poměr klidových teplot

$$\Theta_{12} = \frac{T_{02}}{T_{01}}. \quad (6)$$

Člen  $q(\lambda)$  se nazývá aerodynamická funkce hustoty hmotnostního toku a je dána následujícím vztahem

$$q(\lambda) = \frac{\rho c}{(\rho c)_{kr}} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}, \quad (7)$$

a  $\mu$  je poměr průřezů

$$\mu = \frac{A_1}{A_2}. \quad (8)$$

Klidovou teplotu na konci směšování lze získat z energetické rovnice. Výsledný vztah vypadá následovně

$$T_{03} = T_{01} \frac{1+\Gamma\Theta_{21}}{1+\Gamma}. \quad (9)$$

Bezrozměrná rychlost  $\lambda_3$  na konci směšování je definována vztahem

$$z(\lambda_3) = \frac{z(\lambda_1) + \Gamma \sqrt{\Theta_{21}} z(\lambda_2)}{\sqrt{(1+\Gamma)(1+\Gamma\Theta_{21})}} \quad (10)$$

a zde použitá aerodynamická funkce  $z(\lambda)$  je

$$z(\lambda) = \lambda + \frac{1}{\lambda}. \quad (11)$$

Dle podmínek hnacího proudu lze dosáhnout na výstupu z Lavalovy trysky subsonického nebo supersonického proudění. Subsonické proudění  $\lambda_3 < 1$  může nastat při jakýchkoliv hodnotách tlaků a tvarů trysek. Naopak supersonické proudění  $\lambda_3 > 1$  může nastat jen za příznivých hodnot tlaků a správných tvarů trysek.

Další vlastnosti proudu na konci směšování lze určit z Lavalova čísla  $\lambda_3$ , klidového tlaku  $p_{03}$  a klidové teploty  $T_{03}$  využitím těchto vztahů

$$c_3 = \lambda_3 a_{kr3}, \quad (12)$$

$$p_3 = p_{03} \pi(\lambda_3), \quad (13)$$

$$T_3 = T_{03} \tau(\lambda_3), \quad (14)$$

kde  $a_{kr3}$  je kritická rychlost vypočítaná ze vztahu

$$a_{kr3} = \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa+1)rT_0}}, \quad (15)$$

$\pi(\lambda)$  a  $\tau(\lambda)$  jsou aerodynamické funkce tlaku a teploty vypočtené dle vztahů

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p_0} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad (16)$$

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T_0} = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right). \quad (17)$$



### 3 Experimentální výzkum

Tato část diplomové práce se zabývá experimentálním měřením na ejektorové trati, která je umístěna v laboratořích Katedry energetických zařízení Technické Univerzity v Liberci. Na ejektorové trati lze měřit tlakové diference na clonách v sacím a výtlačném potrubí a statické tlaky v místech odběrů. V této kapitole bude uvedeno několik variací nastavení ejektorové trati a bude zde prezentováno chování ejektoru v určitých režimech nastavení hodnot statických tlaků hnacího proudu  $p_{01}$ , protitlaků  $p_b$  a vzdáleností trysky od směšovací komory.

Lavalova tryska, která je použita na experimentální měření v této diplomové práci, je navržena v předchozí diplomové práci [6]. Je navržena tak, aby výstupní Machovo číslo bylo rovno  $M = 2,07$  což odpovídá poměru kritického průřezu (hrdla) a výstupního průřezu trysky  $\frac{A}{A_{kr}} = 1,7902$ . Tryska použita v tomto měření má průměr hrdla  $d_T = 3,5mm$ . Pro další výzkum, který probíhá na Katedře energetických zařízení, byly navrženy a vyrobeny trysky i s průměry hrdla  $d_T = 3mm$  a  $d_T = 2,5mm$ . Při použití směšovací komory, která je nyní instalována na ejektorové trati a bude s ní proveden výzkum uvedený v této diplomové práci, a některé z trysek s menším průřezem hrdla by mělo dojít ke zvýšení ejekčního součinitele [16]. Zároveň bude snížen nárok na množství tlakového vzduchu.

#### 3.1 Ejektorová trať

Měřicí ejektorová trať se skládá ze tří hlavních částí – Lavalova tryska, směšovací komora a sací potrubí. Pro určení hmotnostních toků je v sacím a výtlačném potrubí umístěna clona pro měření tlakové diference. V sacím potrubí je umístěna clona o průměru  $d_s = 17,9mm$  a ve výtlačném potrubí o průměru  $d_v = 24,9mm$ . Dále se podél směšovací komory a difuzoru nachází odběry statických tlaků, které jsou měřeny snímači od firmy DEWEsoft a hodnoty tlaků zaznamenávány v PC s měřicím softwarem. Tlakové diference jsou měřeny pomocí měřicí centrály OM – Link.



Obr. 4: Ejektor sestavený v laboratoři



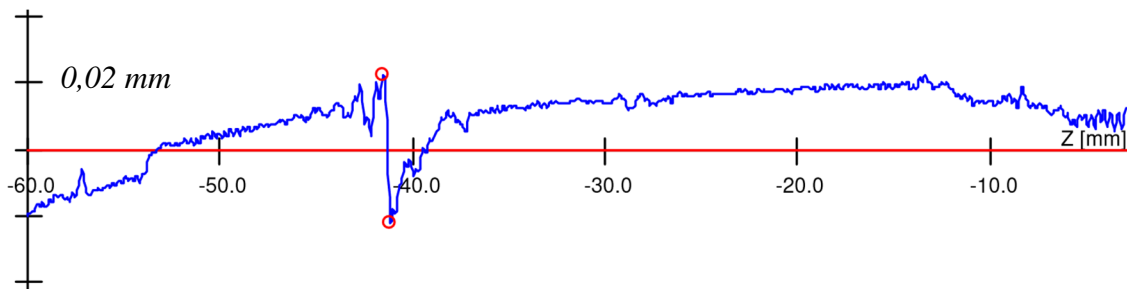
Obr. 5: Měřicí centrála OM – Link

### 3.2 Eliminace výrobních chyb

V přípravné části této diplomové práce byl měřen průběh statických tlaků ve směšovací komoře. Při vyhodnocení dat byl zjištěn nesoulad průběhu statických tlaků spolu s numerickým výpočtem, proto bylo před samotným experimentálním měřením nutné

provést celkovou kontrolu ejektorové trati. Při této kontrole bylo zjištěno několik závad, které mohly mít vliv na toto měření.

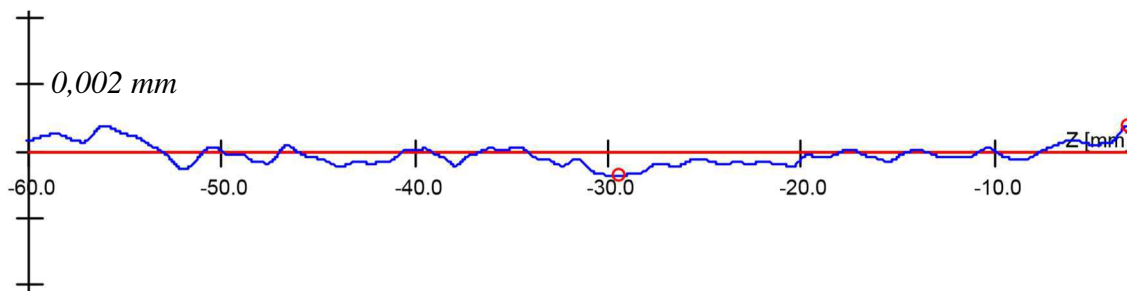
První a nejdůležitější závadou, která mohla mít vliv na průběh statických tlaků, byl vryp na vnitřní stěně směšovací komory, který při supersonickém proudění způsoboval nestabilitu v okolí tohoto vrypu a tím změnu statického tlaku. Proto bylo nutné tento vryp opravit. Velikost vrypu je možné vidět na obrázku níže.



**Obr. 6:** Povrchová přímka přes vryp ve směšovací komoře před opravou [12]

Jeden dílek na ose „y“ na obrázku č. 1 ukazuje hodnotu výchylky o 0,02 mm. Rozdíl mezi body, které jsou vyznačeny červeně v obrázku č. 1, je 0,045mm.

Po vystružení poškozené směšovací komory bylo dosaženo výsledku zobrazeného na následujícím obrázku.



**Obr. 7:** Povrchová přímka přes vryp ve směšovací komoře po opravě [12]

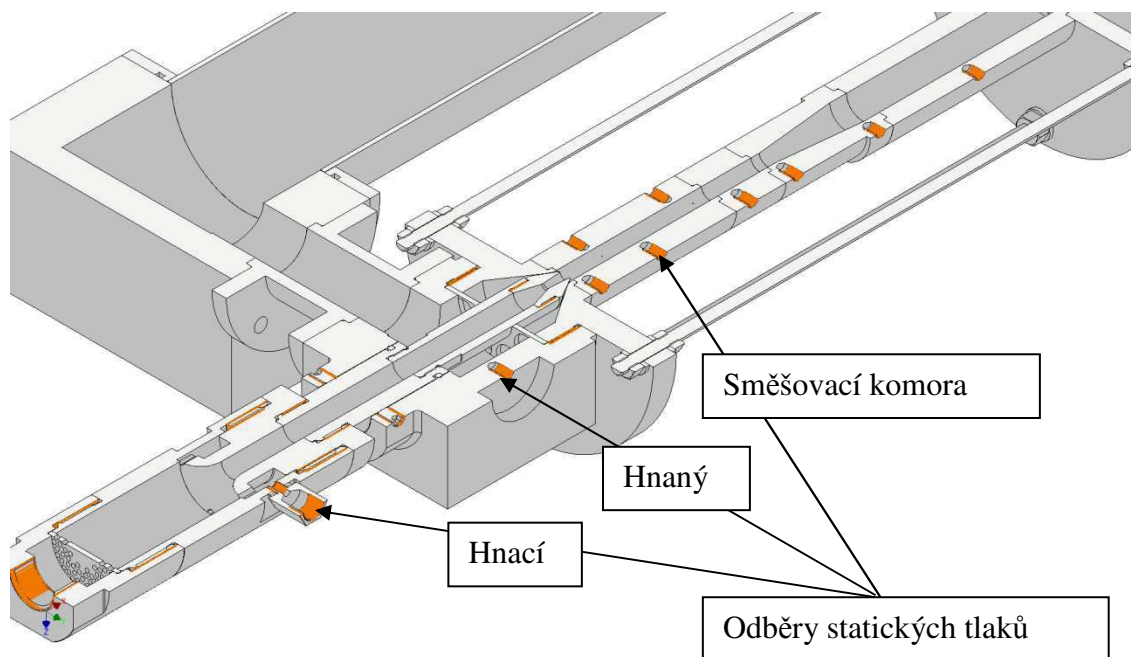
Jeden dílek osy „y“ na obrázku č. 2 ukazuje hodnotu odchylky 0,002mm což je 10x méně než u předchozího. Celková maximální odchylka je na obrázku č. 2 vyznačena opět červenými body a její hodnota je 0,0016mm.

Opravou této nerovnosti uvnitř směšovací komory došlo ovšem ke zvětšení průměru směšovací komory z původních požadovaných  $8\text{mm}$  na  $8,34\text{mm}$  [13]. Pro tuto novou hodnotu byly upraveny i geometrické modely použité v kapitole 4. Numerický výpočet.

Během kontroly při sestavování ejektoru bylo zjištěno nesouosé umístění trysky vzhledem ke směšovací komoře. Tato nepřesnost byla způsobena špatnou volbou stavěcích šroubů zajišťujících polohu trysky vzhledem ke směšovací komoře. Nepřesnost byla odstraněna výměnou stavěcích šroubů za jiný typ.

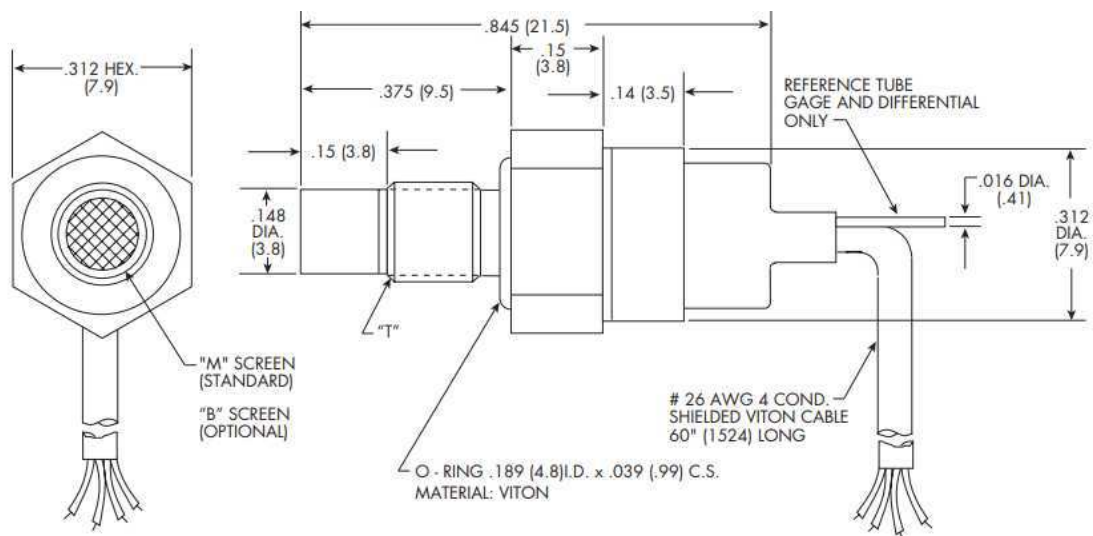
### 3.3 Měření veličin

Měření statických tlaků je realizováno pomocí odběrů statických tlaků ze stěny směšovací komory a difuzoru.



Obr. 8: Řez modelem ejektoru v CAD

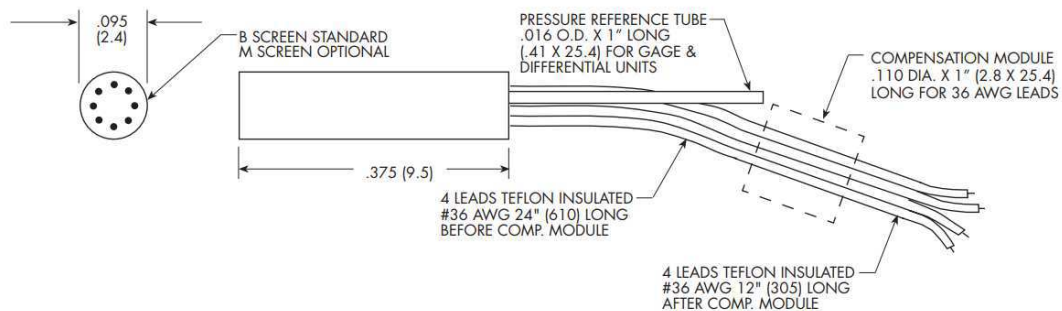
Snímače tlaku s potřebným rozsahem byly připojeny gumovou hadičkou na redukci, která byla v odběrech (oranžová místa na obr. 5) zašroubována a utěsněna.



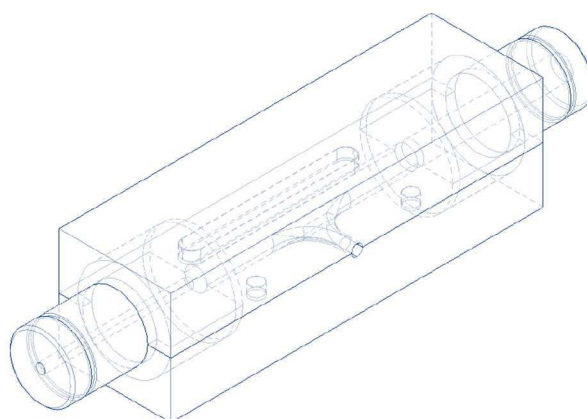
Obr. 9: Výkres snímače tlaku

### 3.4 Ověření použitelnosti diferenčních snímačů tlaku

V současné době je měření statického tlaku a tlakové difference měřeno pomocí dvou softwarů. Aby bylo možné používat jeden software – DEWEsoft bylo zapotřebí najít způsob, kterým by se daly diferenční snímače od této firmy využít. Přímou pro tento typ snímače bylo navrženo pouzdro, které by umožňovalo jeho praktičtější použití. Pouzdro bylo vyrobeno pomocí 3D tisku přímo na TU v Liberci.



Obr. 10: Diferenční snímač tlaku



**Obr. 11:** Sestava pouzdra v CAD

Hlavním důvodem, proč by bylo výhodnější využívat snímače v jednom softwaru, je usnadnění práce při třídění dat a také frekvence snímání snímačů je vyšší, tudíž by při měření nedocházelo ke ztrátě dat.

Snímače od této firmy, které jsou dostupné na Katedře energetických zařízení, mají vyšší rozsah, než měřicí centrála uvedena v kapitole 6 a tudíž menší citlivost. Tento důležitý aspekt ovlivňuje naše měření natolik, že použití těchto snímačů by do výsledků vnášelo značné chyby a proto budou tlakové difference měřeny pomocí měřicí centrály. Data získaná z porovnávání snímačů jsou uvedena v tabulce níže spolu s porovnáním s teoretickým hmotnostním tokem dle Fliegnerova vztahu. Relativní chyba uvedena v tabulce č. 5 je vztažena k hodnotě teoretického hmotnostního toku vypočteného dle Fliegnerova vztahu, který je považován za stěžejní.

<b>Hmotnostní toky v porovnání se snímači a teoretickou hodnotou</b>					
<b>Absolutní tlak [kPa]</b>		205,5	299	387	464
<b>Hmotnostní tok [g/s]</b>	<b>OM - Link</b>	4,589	6,75	8,582	10,642
	<b>DEWEsoft</b>	4,465	6,802	10,861	11,066
	<b>Fliegner</b>	4,676	6,803	8,806	10,558
<b>Relativní chyba [%]</b>	<b>OM - Link</b>	1,86%	0,78%	2,54%	0,80%
	<b>DEWEsoft</b>	4,51%	0,01%	23,34%	4,81%

**Tab. 2:** Data získaná porovnáním diferenčních snímačů tlaku

Měření tlakové difference bylo realizováno pouze na výtlačném potrubí, abychom byli schopni stanovit přesnou hodnotu hmotnostního toku, který by měl odpovídat hmotnostnímu toku tryskou, tzn. hodnotě vycházející z Fliegnerova vztahu (20).

Tyto snímače by bylo vhodnější používat při měření vyšších hmotnostních toků, respektive vyšších tlakových diferencí.

### 3.5 Výpočet hmotnostního toku

Pro porovnání správnosti naměřených experimentálních dat a dat vypočtených v numerické simulaci je potřeba přesně určit velikost hmotnostního toku. Hmotnostní tok vypočteme z následujících rovnic.

Rovnice kontinuity uvedená v kapitole 2.1,

$$\rho_1 c_1 A_1 + \rho_2 c_2 A_2 = \rho_3 c_3 A_3.$$

Další z rovnic jsou Poissonovy vztahy mezi poměrem hustot, teplot a tlakem při izoentropické změně

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\kappa = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (18)$$

a rovnice pro rychlost po izoentropické expanzi plynu,

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} r T_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}. \quad (19)$$

S využitím těchto tří rovnic lze sestavit rovnici pro výpočet hmotnostního toku:

$$\dot{m} = A \sqrt{2 p_0 \rho_0 \psi}. \quad (20)$$

Tento vztah se nazývá Fliegnerův vzorec.

Při kritickém proudění v hrdle trysky ( $M = 1$ ) dosadíme do rovnice (20) kritický průřez, tedy průřez hrdla trysky  $A_T = A_{kr}$  a za součinitel stlačitelnosti plynu  $\psi$  dosadíme z rovnice

$$\psi_{max} = \sqrt{\frac{\kappa}{2} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}, \quad (21)$$

kde  $\psi_{max}$  je pro vzduch, tedy  $\kappa = 1,4$ , rovna hodnotě  $\psi_{max} = 0,4842$ .

Tímto způsobem jsme schopni určit hmotnostní tok tryskou při kritickém proudění v hrdle trysky.

Z experimentálně naměřených dat lze provést výpočet hmotnostního toku pomocí tlakové difference, která byla naměřena na škrťacím tělese umístěném v potrubí na sání nebo výtlaku ejektorové trati. Škrťací těleso (clona) je kalibrováno a umístěno v potrubní síti dle normy ISO 5167 [7].

Vztah pro výpočet hmotnostního toku z naměřené tlakové difference je

$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d_c^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1}, \quad (22)$$

kde  $C$  je součinitel průtoku, definovaný vztahem

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,7} + \left[0,0188 + 0,0063 \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0,8}\right] \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3}, \quad (23)$$

$\beta$  je definována jako poměr průměru clony a průměru potrubí, v němž je umístěna,

$$\beta = \frac{d_c}{D} \quad (24)$$

a  $Re_D$  je Reynoldsovo číslo vztahené k průměru potrubí

$$Re_D = \frac{cD}{\mu}. \quad (25)$$



V rovnici (22) je dále obsažen součinitel stlačitelnosti  $\varepsilon_1$ ,  $\Delta p$ , což je tlaková diference naměřená na cloně a  $\rho_1$  je hustota proudícího média.

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{(0,41 + 0,35\beta^4 \Delta p)}{\kappa p_c} \quad (26)$$

$$\rho_1 = \frac{\kappa}{rT}, \quad (27)$$

kde  $r$  je měrná plynová konstanta a  $T$  je termodynamická teplota.

### 3.6 Postup výpočtu hmotnostního toku

Při výpočtu hmotnostního toku pomocí tlakové diference, je důležité správné nastavení a seřízení tlakových snímačů a polohy škrťacího elementu vůči směru proudění. K měření tlakové diference bylo možno použít dva typy snímačů, kde po ověření jejich přesnosti nebyly snímače použitelné v softwaru DEWEsoft přesné, jak vyplývá z kapitoly 3.4.

V samotném výpočtu hmotnostního toku je nejproblematictější získání správného Reynoldsova čísla.

Z naměřených tlaků před clonou, tlakové diference na cloně a dalších známých hodnot ( $T, r$ ), vypočteme ze stavové rovnice hustotu plynu a dále pak součinitel stlačitelnosti dle vztahu (26). Tyto hodnoty vložíme do vztahu pro součinitel průtoku, ve kterém nyní zanedbáme členy obsahující  $Re$ . Pomocí takto upraveného součinitele průtoku  $C$  vypočteme hmotnostní tok potrubím a jelikož známe velikost potrubí, můžeme vypočítat rychlost, která je vztažena na průměr potrubí. Z této rychlosti lze vypočítat Reynoldsovo číslo vztažené na průměr potrubí  $Re_D$ , ve kterém je vložena clona.

Takto vypočtené Reynoldsovo číslo vložíme do kompletního vzorce pro součinitel průtoku. Tímto způsobem vypočteme několik „iterací“ dokud se Reynoldsovo číslo neustálí [8] [7].

### 3.7 Metodika měření na ejektorové trati

Stanovení správné metodiky, dle které by se mělo při experimentálním měření postupovat, je velmi důležité. Pokud by byla metodika měření nesprávná, mohlo by docházet ke vzniku zbytečných chyb při měření. Hlavním důvodem proč se metodiky měření stanovují, je ten, aby nedocházelo k hromadění zbytečných chyb při měření a aby bylo možné zopakovat měření se stejnými výsledky.

Před samotným měřením na ejektorové trati je zapotřebí zajistit dostatečné množství tlakového vzduchu, aby nedocházelo ke kolísání tlaku hnacího proudu. Tento aspekt zajišťuje výkonný šroubový kompresor spolu s kondenzační sušičkou vzduchu a dostatečným rezervoárem tlakového vzduchu. Rozvod tlakového vzduchu v laboratoři je chráněn redukčním ventilem nastaveným na hodnotu  $0,4MPa$ . Samotná ejektorová trať má ve svém rozvodu tlakového vzduchu zařazen vlastní redukční ventil, kterým lze jednoduše nastavovat tlak hnacího proudu. Nastavenou hodnotu tlaku hnacího proudu  $p_{01}$  je možné sledovat na manometru redukčního ventilu nebo na kontrolním analogovém manometru, který je zařazen do rozvodu za redukčním ventilem. Nastavovaný tlak ( $200kPa$  a  $300kPa$ ) je navýšen o tlakovou ztrátu v potrubní síti mezi redukčním ventilem a ejektorem. Směrodatná hodnota tlaku hnacího proudu je sledována pomocí tlakovému senzoru umístěného v hnacím potrubí. Protitlak je regulován pomocí přípravku, který je připevněn na výtlačném potrubí, od  $0 kPa$  do  $60 kPa$  s krokem  $5 kPa$ . Velikost protitlaku je sledována senzorem, který je umístěn za difuzorem.

Záznam dat se provádí pomocí dvou softwarů, DEWEsoft a OM – Link. Před každým měřením je potřeba správně nastavit citlivosti jednotlivých senzorů, jejich polohu a správné zapojení v portu měřicí karty. Před každým měřením je vhodné všechny senzory softwarově vynulovat. Záznam dat spouštíme jen tehdy, pokud není zařízení uvedeno do chodu.

### 3.8 Nejistoty měření

V praxi se nelze setkat s měřením, které by bylo absolutně přesné, vždy se do měření vnáší jistá nepřesnost. Tyto nepřesnosti mohou být do měření vneseny některými zjednodušeními, které se při experimentech provádí, nebo při samotném měření jednotlivých veličin.

Zdroje nejistot se rozdělují do několika skupin. Hlavními skupinami jsou chyby „systematické“ a „nahodilé“, které se dále dělí do skupiny nejistot typu *A* a *B*. Systematické chyby jsou snadno odhadnutelné a jejich vliv lze z podstatné části odstranit např. korekcemi. Nahodilé chyby jsou chyby nepředvídatelné, nelze je snadno odhalit a vždy se podílí na experimentálním měření a jsou součástí výsledku.

Typ nejistoty *A* se považuje za nejistoty vzniklé chybami, které jsou zcela nahodilé a které se vyskytují s předpokladem Gaussova normálního rozdělení. Stanovují se z opakovaných měření stejné veličiny za stejných podmínek. S počtem opakování měření se vliv nejistoty typu *A* zmenšuje.

Nejistoty typu *B* jsou způsobovány známými a odhadnutelnými chybami, kde jejich příčinu a vliv určuje experimentátor. Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota se určuje jejich součtem. U nejistoty typu *B* nezáleží na počtu opakování měření daných veličin [9].

Další zásadní informací je to, zdali se jedná o nejistotu přímo měřené nebo vypočtené veličiny. Tyto dva údaje se velmi liší. Nejistota přímo měřené veličiny je udávána výrobcem měřicího zařízení, kdežto nejistota vypočtené veličiny je dána vztahem [9]

$$u = \sqrt{\sum_{i=a} \left( \frac{\partial F}{\partial i} u_i \right)^2}. \quad (28)$$

Veličina	Snímač	Relativní nejistota [%]
$T$	digitální teploměr	0,2
$p_0$	digitální barometr	0,25
$p$	piezo snímač	0,3
$\Delta p$	centrála OM-Link	0,5

Tab. 3: Relativní nejistoty měřicích přístrojů v %

Veličina		Stanoveno	Dílčí nejistota [%]	Celková nejistota [%]
$\dot{m}$	$C$	Norma [6]	0,5	1,23
	$\varepsilon$	Norma [6]	1	
	$\rho$	ze stavové. rce	0,15	
	$\Delta p$	dle výrobce	0,5	

**Tab. 4:** Nejistota hmotnostního toku

Veličina		Stanoveno	Dílčí nejistota[%]	Celková nejistota [%]
$\Gamma$	$\dot{m}_1$	z (5)	1,25	1,77
	$\dot{m}_2$	z (5)	1,25	

**Tab. 5:** Nejistota vypočteného ejekčního součinitele

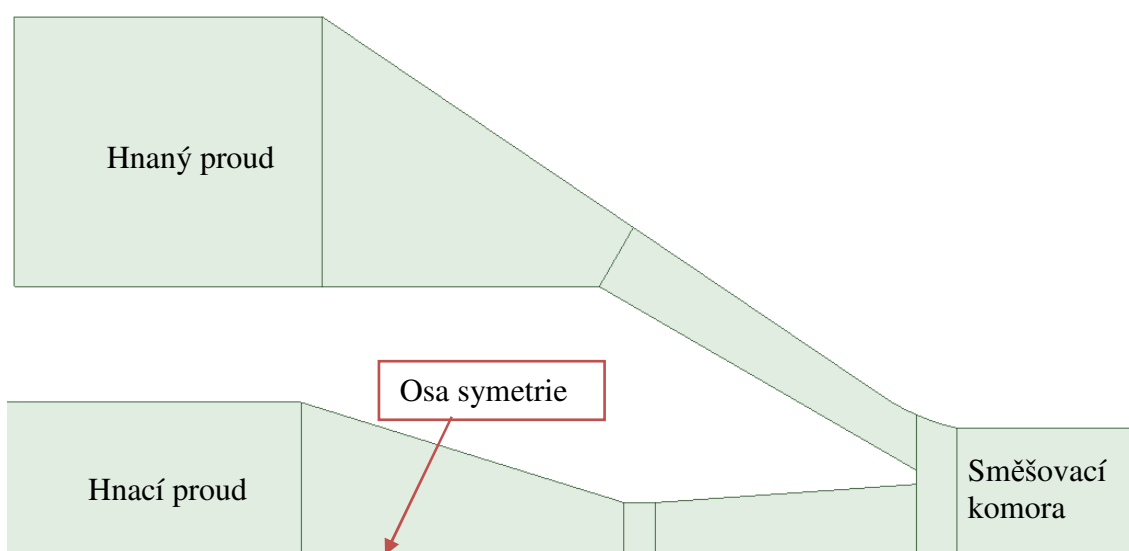
## 4 Numerický výpočet

V této diplomové práci bude mimo jiné prezentován také numerický výpočet, abychom výsledky experimentálního měření mohli porovnat i s jinou než teoretickou metodou výpočtu. Numerický výpočet byl proveden v programu AnsysFluent. Výpočtová síť byla vytvořena v programu AnsysMeshing.

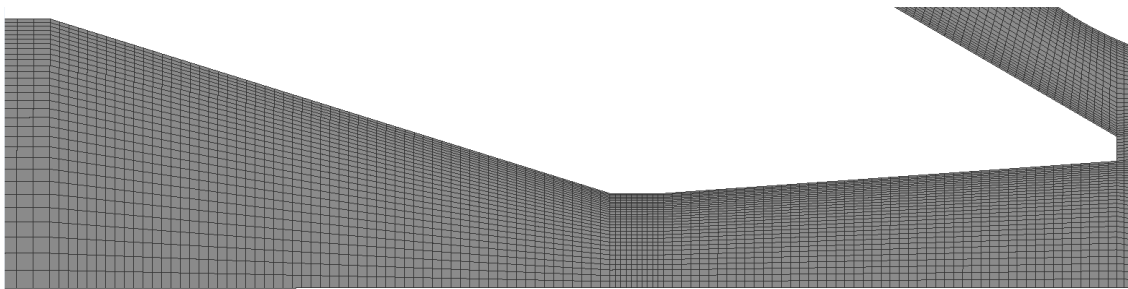
Byly provedeny simulace pro nastavení vzdálenosti divergentní části trysky od rovnoploché směšovací komory s hodnotami  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$  a  $3\text{mm}$ . Hnací médium bylo vháněno do trysky s tlaky  $200\text{kPa}$  a  $300\text{kPa}$ . Jednalo se tedy celkem o 6 konfigurací, kde pro každou z nich byly nastaveny protitlaky od  $0\text{kPa}$  do  $60\text{kPa}$  s krokem  $10\text{kPa}$ . Celkem se tedy jednalo o 42 numerických simulací.

### 4.1 Tvorba sítě

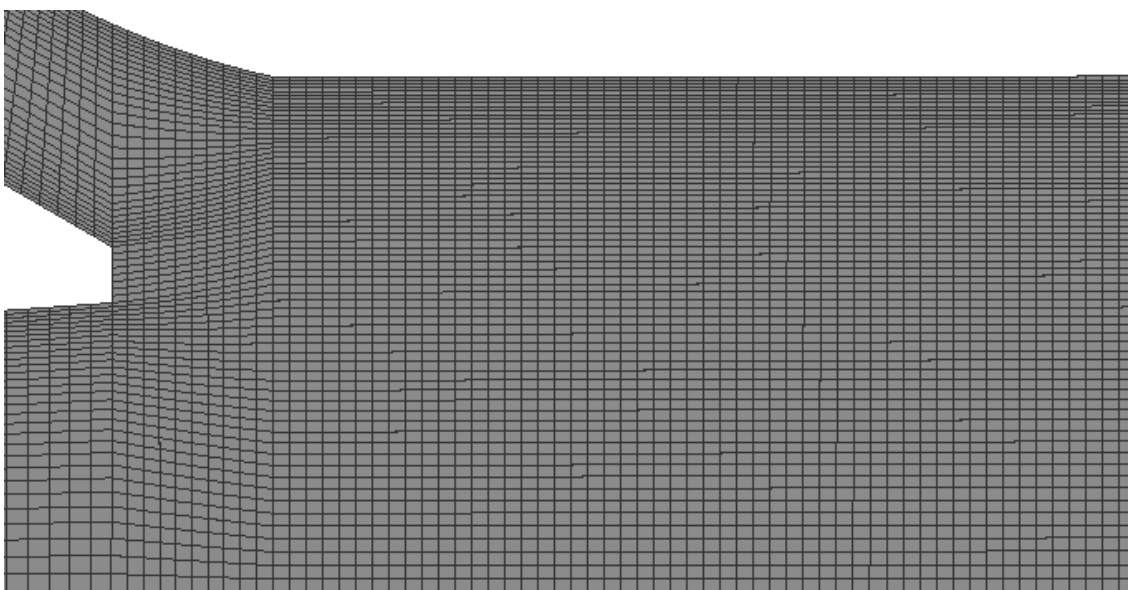
Síť byla vytvořena pro každou vzdálenost divergentní části trysky od směšovací komory. Celkem byly vytvořeny tři výpočtové sítě, modelovány pro použití axisymetrického modelu. Kolem stěn byla modelována mezní vrstva. Počty buněk jednotlivých sítí se pohybovaly od  $95\text{tis.}$  do  $100\text{tis.}$  buněk.



**Obr. 12:** Dělení jednotlivých částí geometrie ejektoru při modelování sítě (konfigurace pro  $3\text{ mm}$ )



**Obr. 13:** Detail výpočtové sítě v trysce



**Obr. 14:** Detail výpočtové sítě napojení trysky, sání a směšovací komory

## 4.2 Nastavení výpočtového softwaru

Numerická simulace byla nastavena pro výpočet stlačitelné tekutiny (*Density-Based*) s nestacionárním průběhem, což napomáhá konvergenci výpočtu. Při výpočtu byla použita rovnice energie a turbulentní model *k- $\omega$  SST*, který je pro numerické simulace ejektorů vhodný [11] [12]. Numerická simulace byla provedena na vzduchu s nastavením ideálního plynu.

Dalším krokem je správné nastavení okrajových podmínek, na kterých nejvíce závisí výsledek numerické simulace. Vstup hnacího média před tryskou je definován jako „*pressure – inlet*“ s hodnotami *200 kPa* a *300 kPa*, jak je uvedeno výše. Okrajová podmínka pro vstup hnaného proudu je opět definována jako „*pressure – inlet*“ s tlakem

0 kPa. Výstupní průřez za difuzorem má okrajovou podmínku „*pressure – outlet*“. Hodnoty na této okrajové podmínce se mění dle stanovených protitlaků (200kPa a 300kPa). Všechny tyto uvedené hodnoty jsou zadávány přírůstkově. Okolní tlak „*operatingconditions*“ je stanoven na 97 kPa.

Na kartě „*solution*“ je v první záložce možné nastavit možnosti výpočtu použitých rovnic. Pro naši potřebu necháme nastavení, které nabízí výpočtový software a upravíme řád rovnice pro výpočet toků „*flow*“ na první řád „*first order upwind*“. Následující záložka „*controls*“ nabízí nastavení Courantova čísla a hodnot některých veličin. Při simulacích bylo *Courantovo číslo* měněno v závislosti na konvergenci od hodnoty 5 – 0,01. V dalších kartách bylo nastaveno vykreslování sledovaných veličin, aby bylo možné sledovat, zda řešení konverguje či nikoliv.

Spuštění samotného výpočtu předcházela hybridní inicializace. Nastavení nestacionárního výpočtu vyžaduje zadání časového kroku, počet časových kroků a počet jednotlivých iterací v každém časovém kroku. Časový krok byl ve většině případů nastaven na hodnotu 0,01s. Počet časových kroků odpovídal rychlosti konvergence jednotlivých řešení a počet iterací pro každý časový krok byl nastaven na hodnotu 15.

Po dokončení výpočtu v režimu rovnic „*first order upwind*“ přepneme režim na „*second order upwind*“. Řešení v režimu druhého řádu rovnic je přesnější. Všechny výsledky, které jsou prezentovány v této práci, jsou vypočítány s druhým řádem rovnic [11] [16].

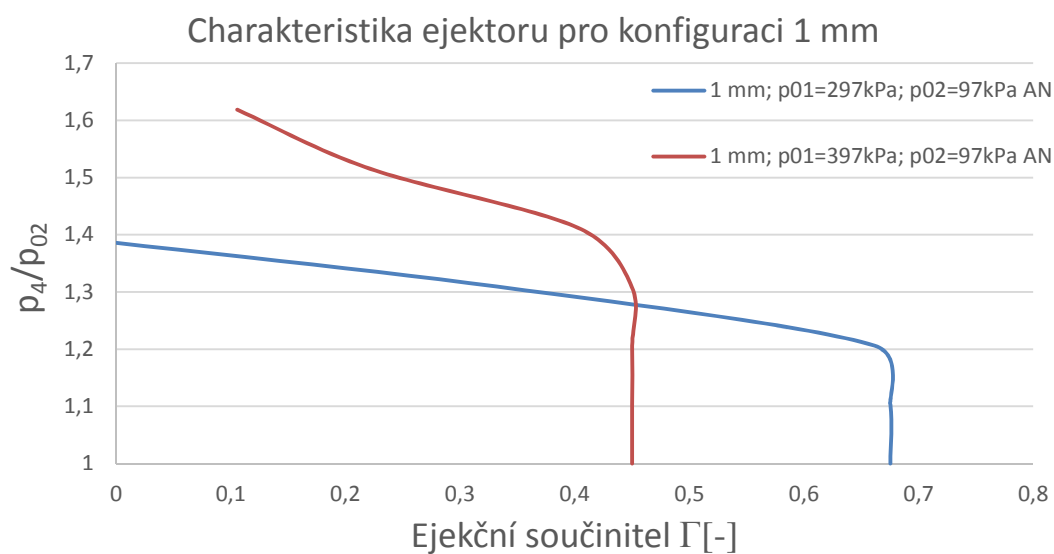
## 5 Výsledky

V této kapitole budou prezentovány veškeré výsledky. Jednotlivé podkapitoly budou obsahovat konfigurace nastavení vzdálenosti trysky od směšovací komory a poslední podkapitola je věnována porovnání jednotlivých metod výpočtu a jejich výsledků.

### 5.1 Analytická metoda

-	1 mm; $p_{01} = 297\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$			1 mm; $p_{01} = 397\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$		
$p_4/p_{02}$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$
1,0	0,6753	0,0067	0,0045	0,4502	0,0089	0,0040
1,1	0,6753	0,0067	0,0045	0,4502	0,0089	0,0040
1,2	0,6615	0,0067	0,0044	0,4502	0,0089	0,0040
1,3	0,3321	0,0067	0,0022	0,4497	0,0089	0,0040
1,4	-0,1155	0,0067	-0,0008	0,4027	0,0089	0,0036
1,5	-0,5216	0,0067	-0,0035	0,2214	0,0089	0,0020
1,6	-0,6753	0,0067	-0,0045	0,1055	0,0089	0,0009

Tab. 6: Hmotnostní toky vypočtené analytickou metodou – konfigurace 1 mm

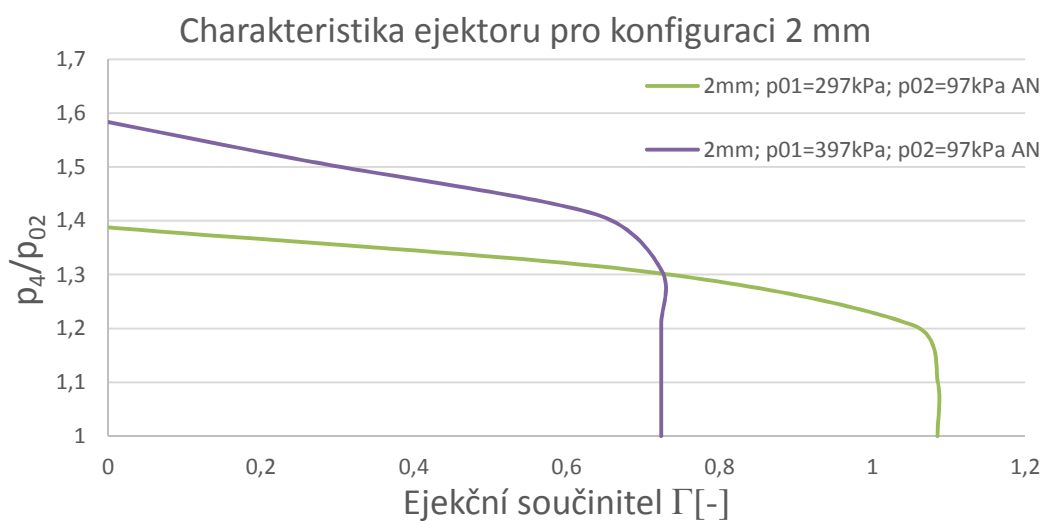


Obr. 15: Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK 1 mm



-	2 mm; $p_{01} = 297\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$			2 mm; $p_{01} = 397\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$		
$p_4/p_{02}$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$
1,0	1,0853	0,0067	0,0072	0,7235	0,0089	0,0064
1,1	1,0853	0,0067	0,0072	0,7235	0,0089	0,0064
1,2	1,0531	0,0067	0,0070	0,7235	0,0089	0,0064
1,3	0,6821	0,0067	0,0045	0,7235	0,0089	0,0064
1,4	-0,1857	0,0067	-0,0012	0,6373	0,0089	0,0057
1,5	-0,5879	0,0067	-0,0039	0,2439	0,0089	0,0022
1,6	-0,7488	0,0067	-0,0050	-0,1238	0,0089	-0,0011

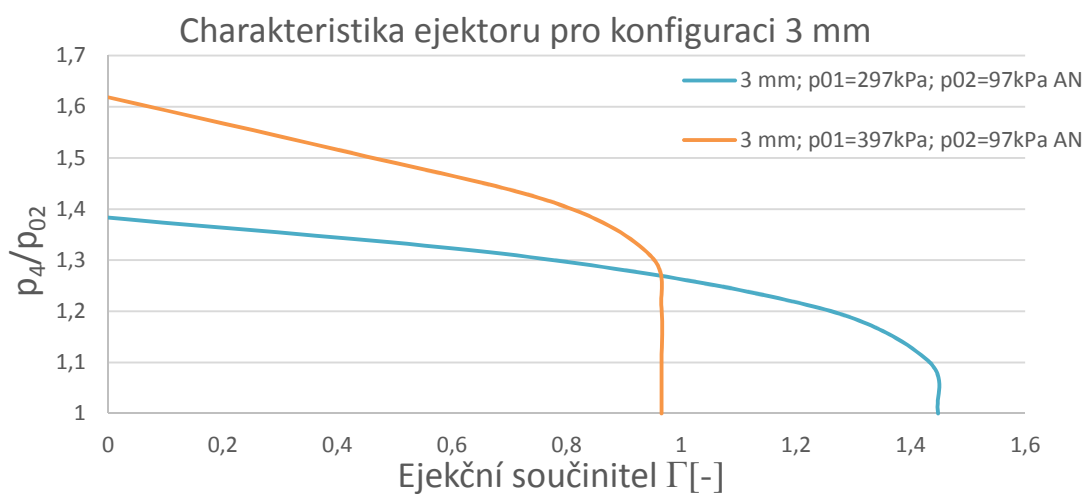
Tab. 7: Hmotnostní toky vypočtené analytickou metodou – konfigurace 2 mm



Obr. 16: Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK 2 mm

-	2 mm; $p_{01} = 297\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$			2 mm; $p_{01} = 397\text{kPa}$ ; $p_{02} = 97\text{kPa}$		
$p_4/p_{02}$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\Gamma[-]$	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$
1,0	1,4480	0,0067	0,0097	0,9653	0,0089	0,0086
1,1	1,4306	0,0067	0,0095	0,9653	0,0089	0,0086
1,2	1,2417	0,0067	0,0083	0,9653	0,0089	0,0086
1,3	0,7121	0,0067	0,0047	0,9457	0,0089	0,0084
1,4	-0,2477	0,0067	-0,0017	0,7783	0,0089	0,0069
1,5	-0,7121	0,0067	-0,0047	0,4015	0,0089	0,0036
1,6	-1,3630	0,0067	-0,0091	0,0000	0,0089	0,0000

Tab. 8: Hmotnostní toky vypočtené analytickou metodou – konfigurace 3 mm

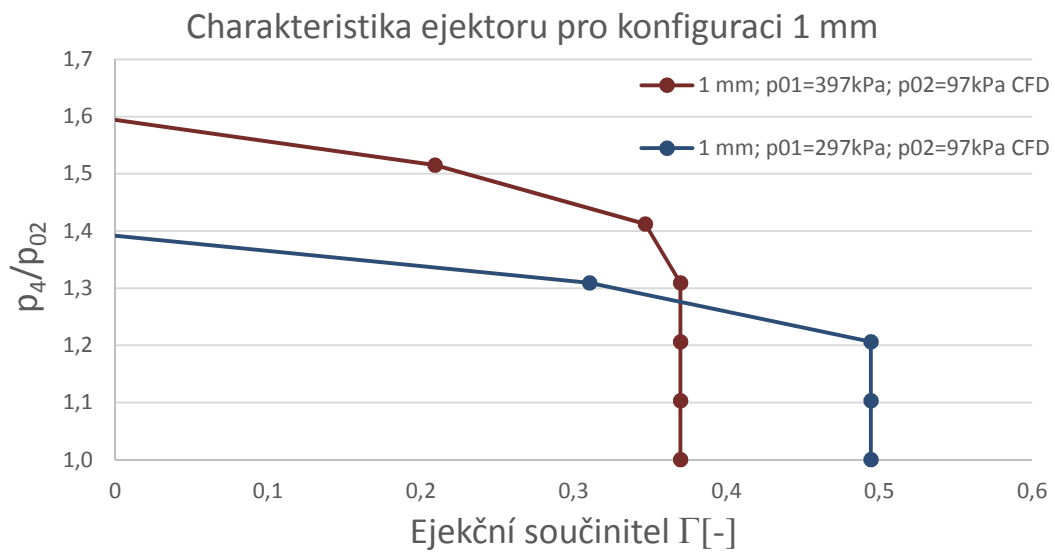


Obr. 17: Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK 3 mm

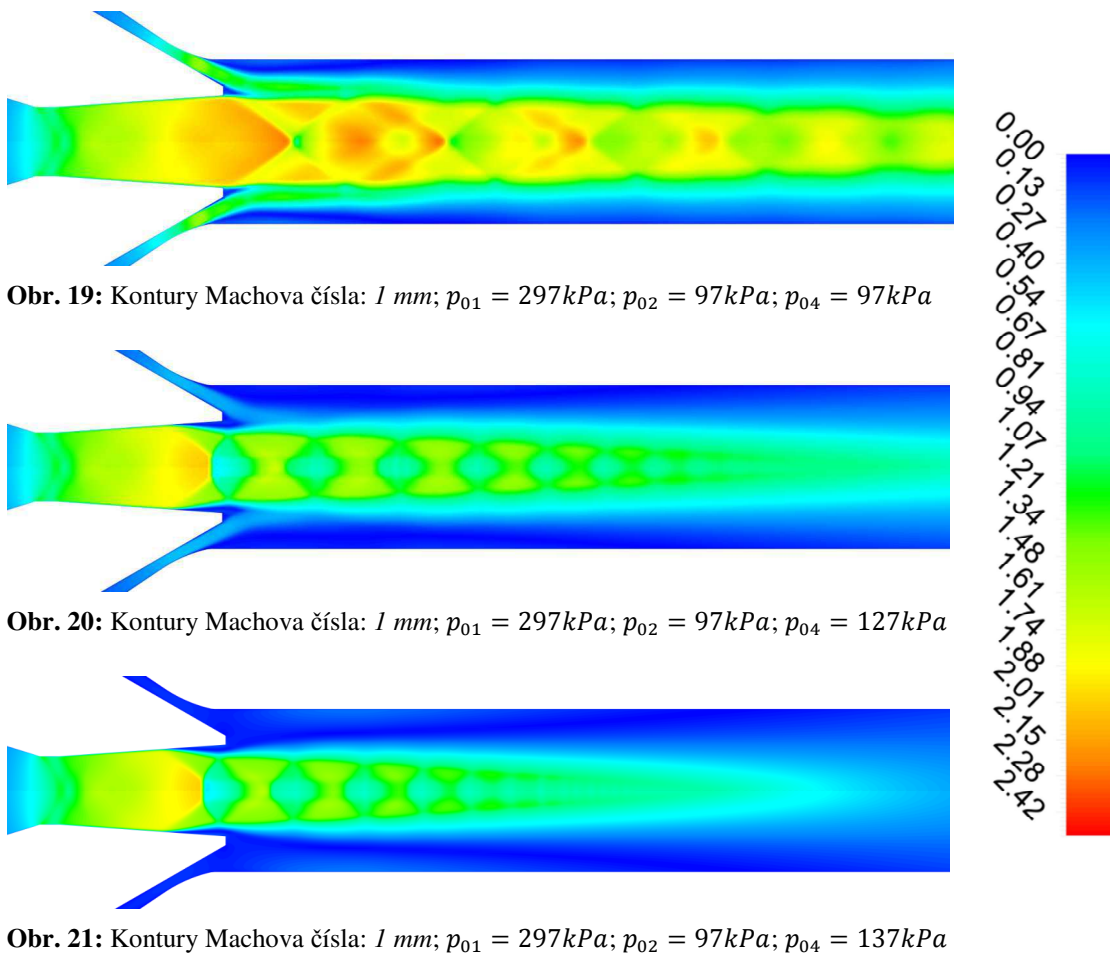
Z kapitoly 2 a 2.1 je patrné, že při analytickém řešení nebyly do výpočtu zahrnuty ztráty. Lze proto předpokládat, že výsledky uvedené v této kapitole budou oproti výsledkům z CFD a hlavně oproti výsledkům experimentálního měření značně nadhodnoceny.

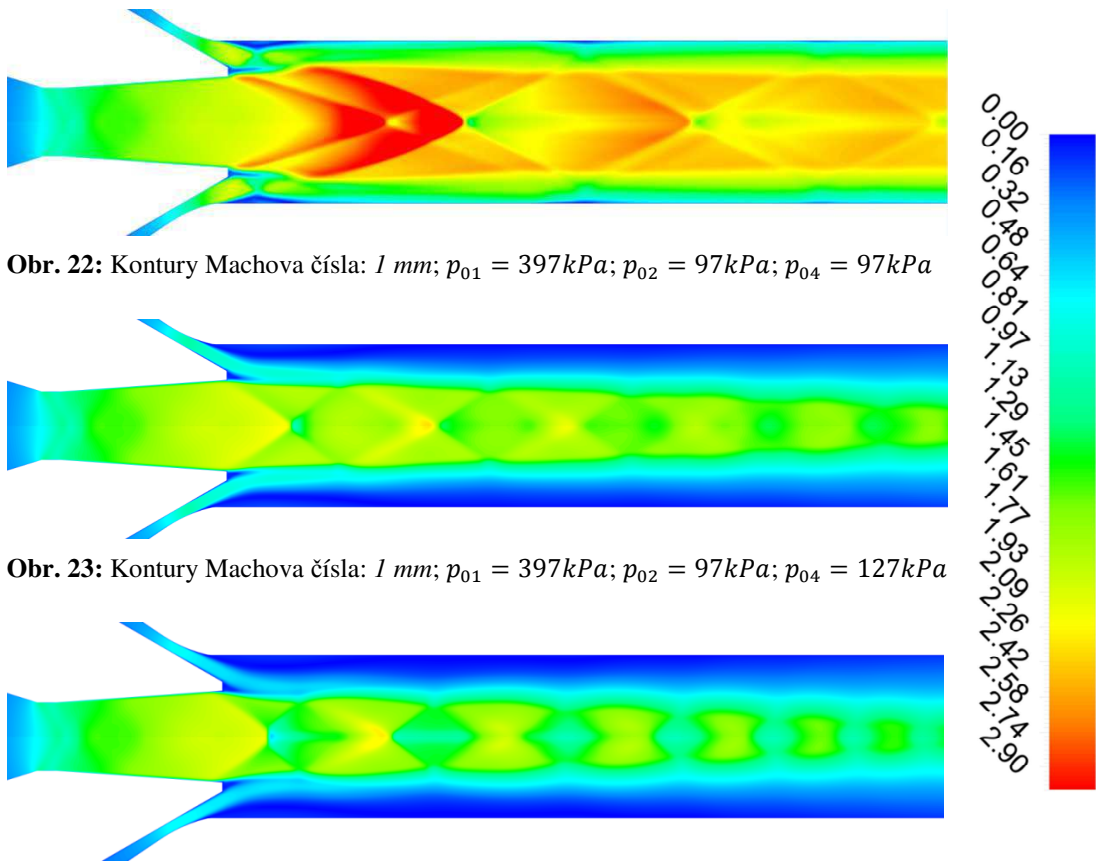
Jednotlivé výsledky uvedené v této kapitole nebudou komentovány zvlášť, komentář bude uveden v kapitole 5.4.

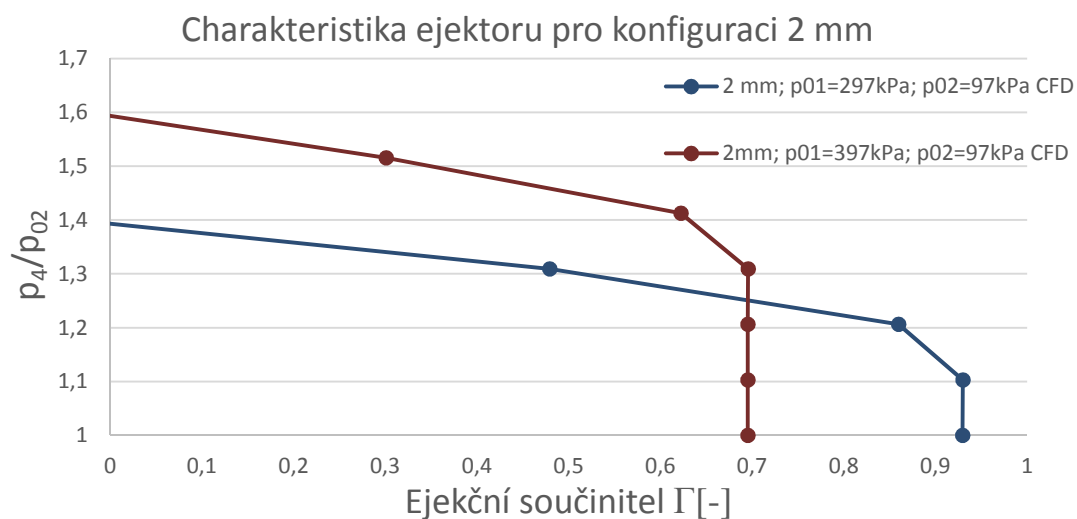
## 5.2 CFD



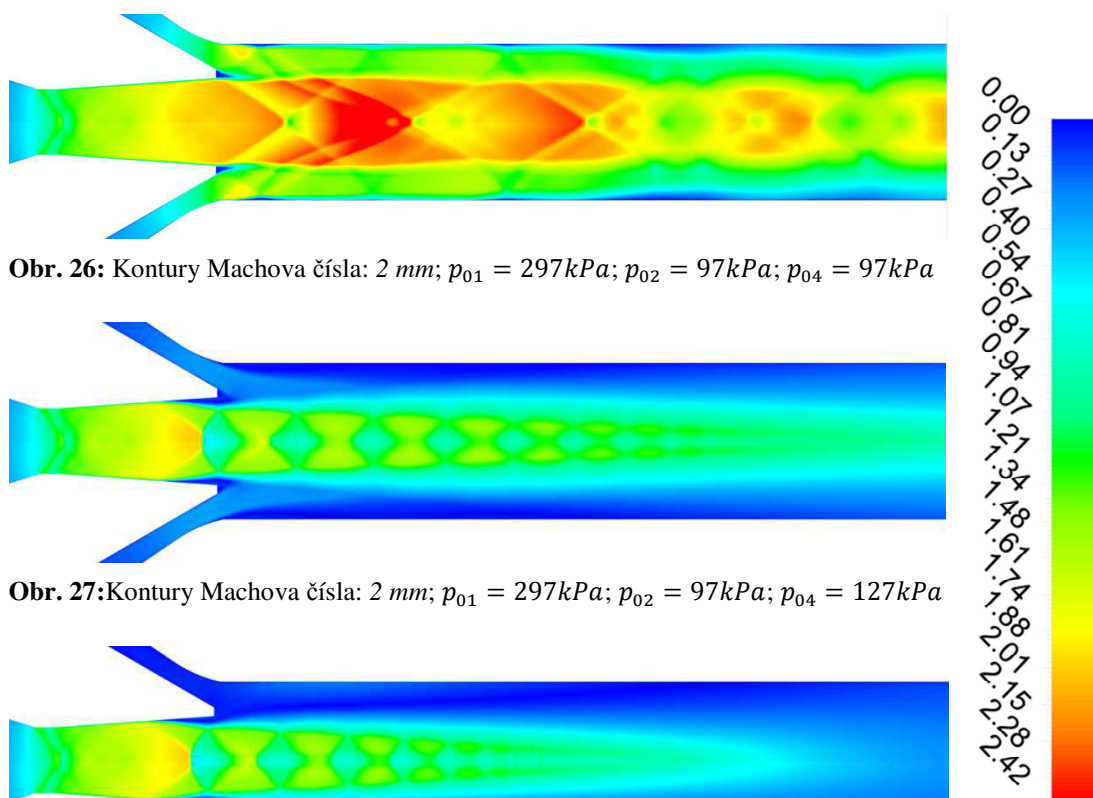
Obr. 18: Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK 1 mm







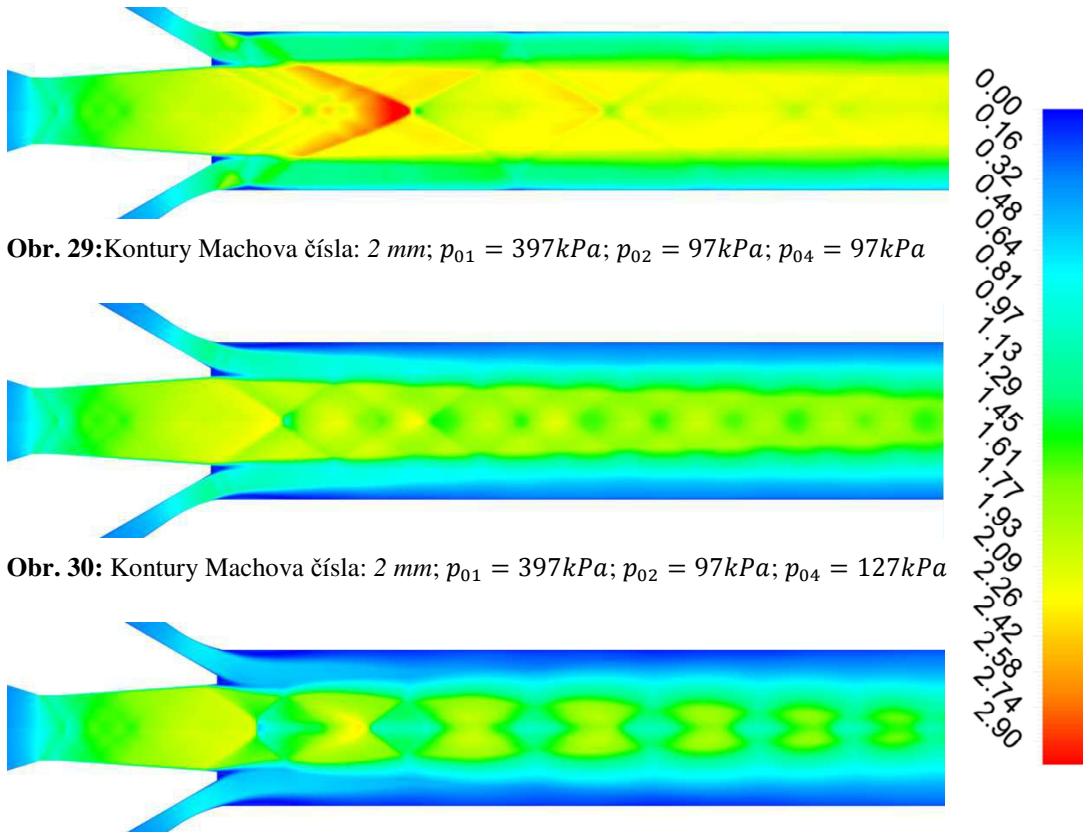
**Obr. 25:** Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK2 mm



**Obr. 26:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 97kPa$

**Obr. 27:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 127kPa$

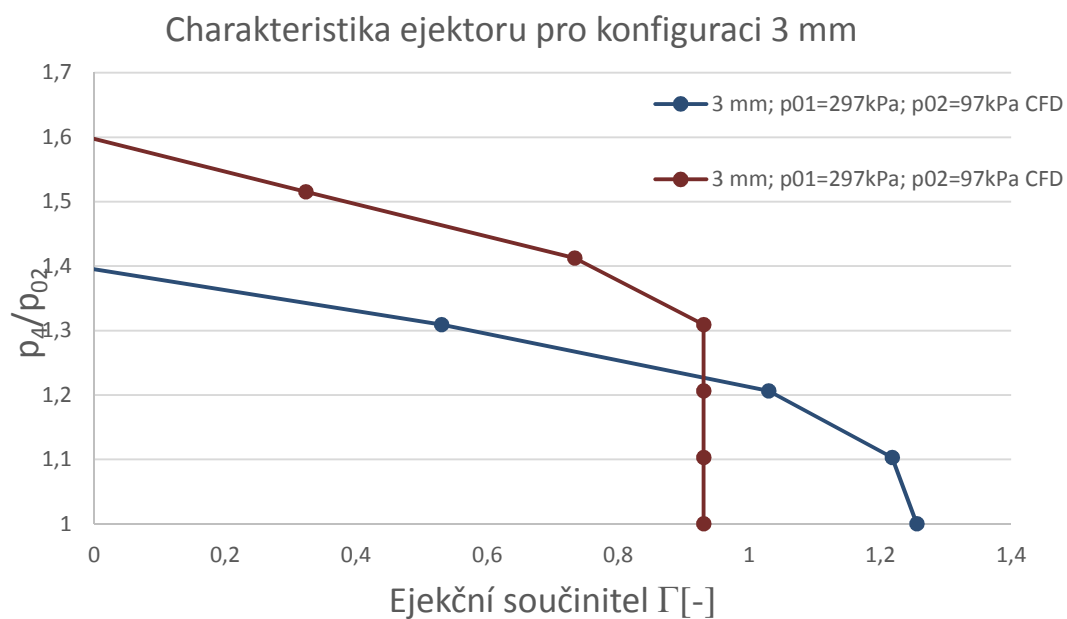
**Obr. 28:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 137kPa$



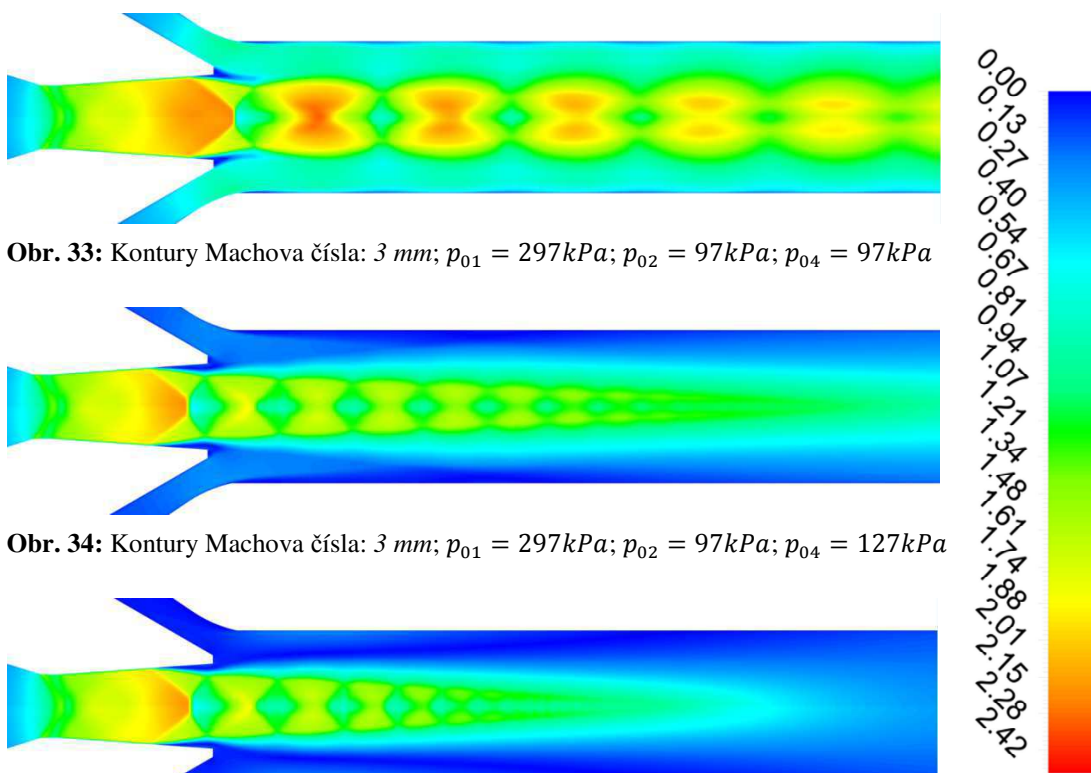
**Obr. 29:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 97kPa$

**Obr. 30:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 127kPa$

**Obr. 31:** Kontury Machova čísla: 2 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 137kPa$



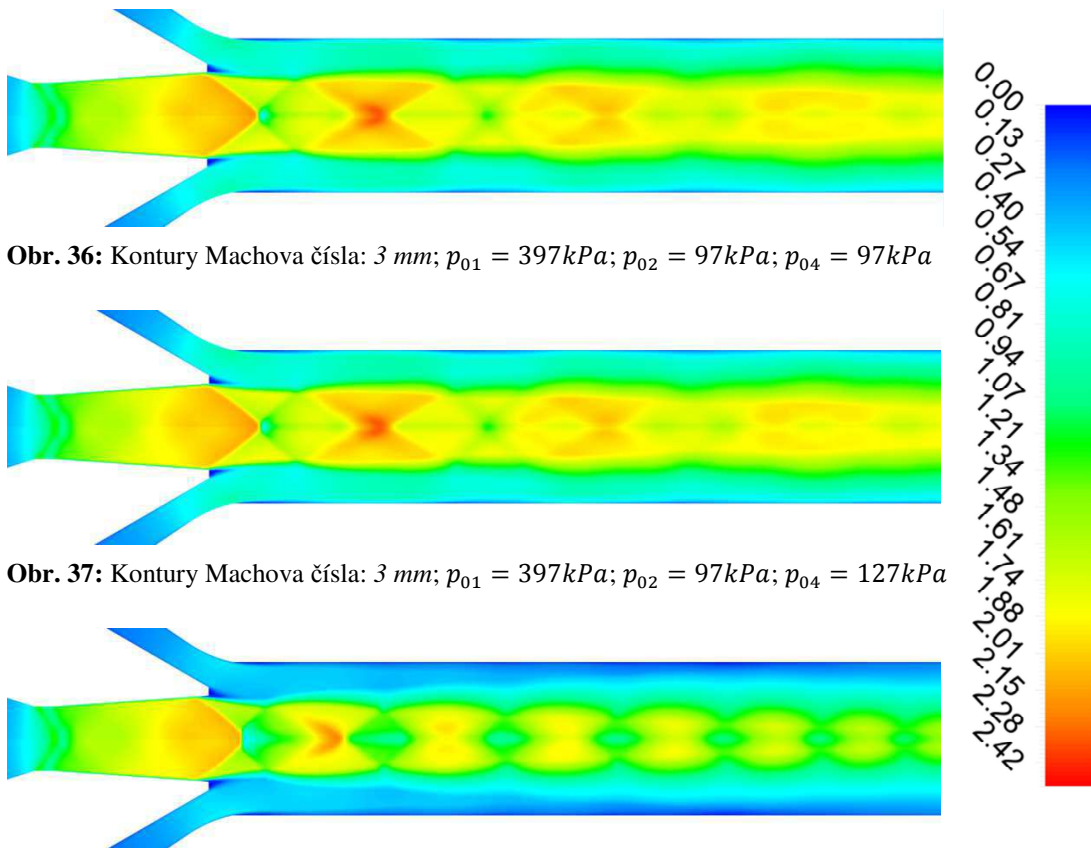
**Obr. 32:** Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od SK 3 mm



**Obr. 33:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 97kPa$

**Obr. 34:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 127kPa$

**Obr. 35:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 297kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 137kPa$



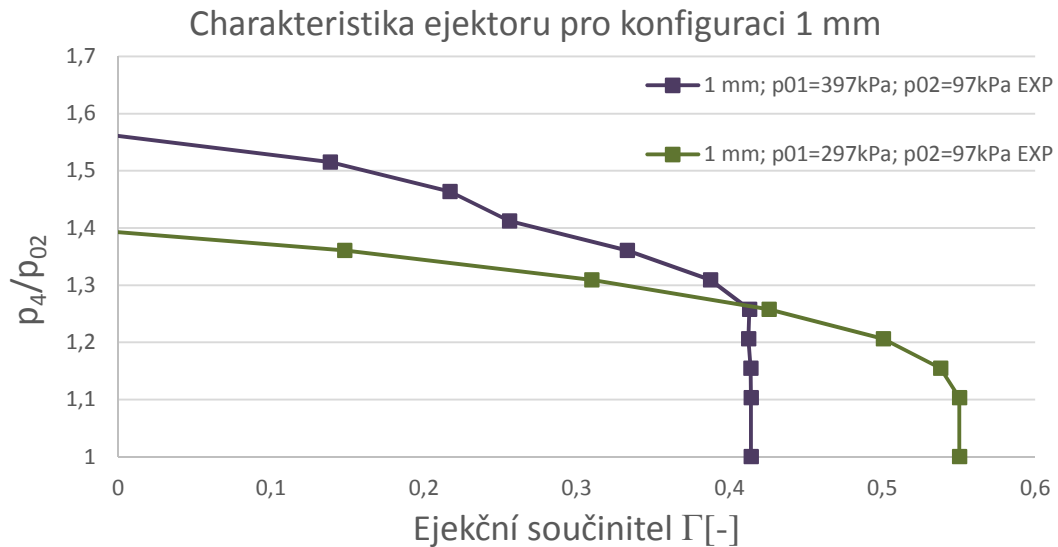
**Obr. 36:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 97kPa$

**Obr. 37:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 127kPa$

**Obr. 38:** Kontury Machova čísla: 3 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 137kPa$



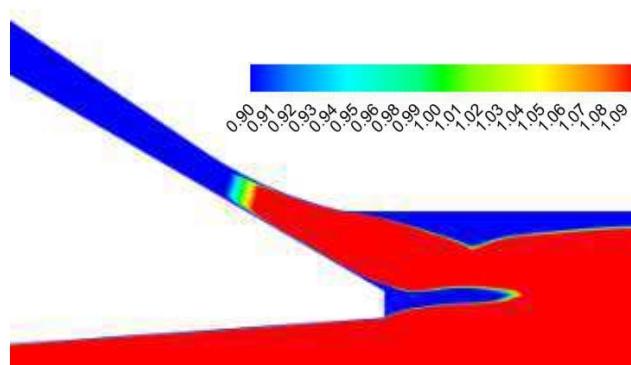
### 5.3 Experimentální měření



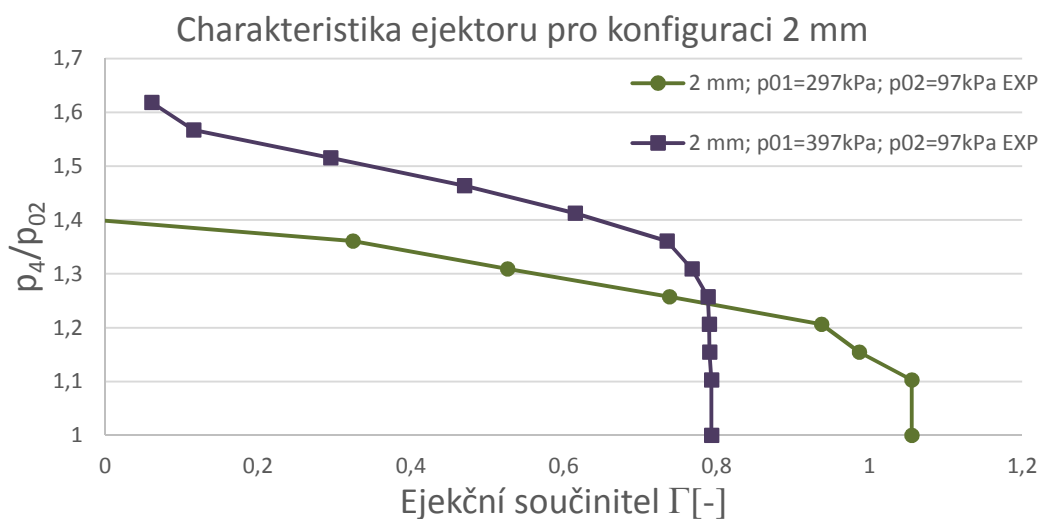
**Obr. 39:** Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti trysky od směšovací komory 1 mm

Jak je vidět z charakteristiky pro 1 mm (obrázek č. 37) dosahuje se při tlaku hnacího média  $p_{01} = 397\text{kPa}$  nižšího ejekčního součinitele než při nastavení tlaku hnacího média na hodnotu  $p_{01} = 297\text{kPa}$ . To je způsobeno tím, že při vyšších hodnotách tlaku hnacího média a nízkých protitlacích se v hrdle hnaného potrubí proud urychlí až na  $M = 1$  a nastane ucpání. V takovém stavu už nelze nasávat větší množství hnaného média.

Naopak vyšší tlak hnacího média přináší výhodu překonávat vyšší protitlaky na výstupu z ejektoru, čímž dovoluje širší použití v praxi nebo případné zapojení s dalšími zařízeními.



**Obr. 40:** Zobrazení ucpání hnaného proudu: 1 mm;  $p_{01} = 397\text{kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{kPa}$ ;  $p_{04} = 97\text{kPa}$ ; CFD

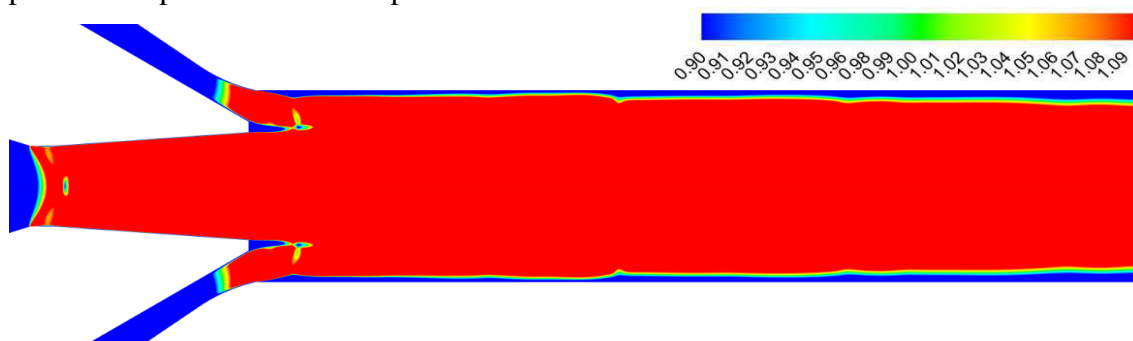


**Obr. 41:** Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti trysky od směšovací komory 2 mm

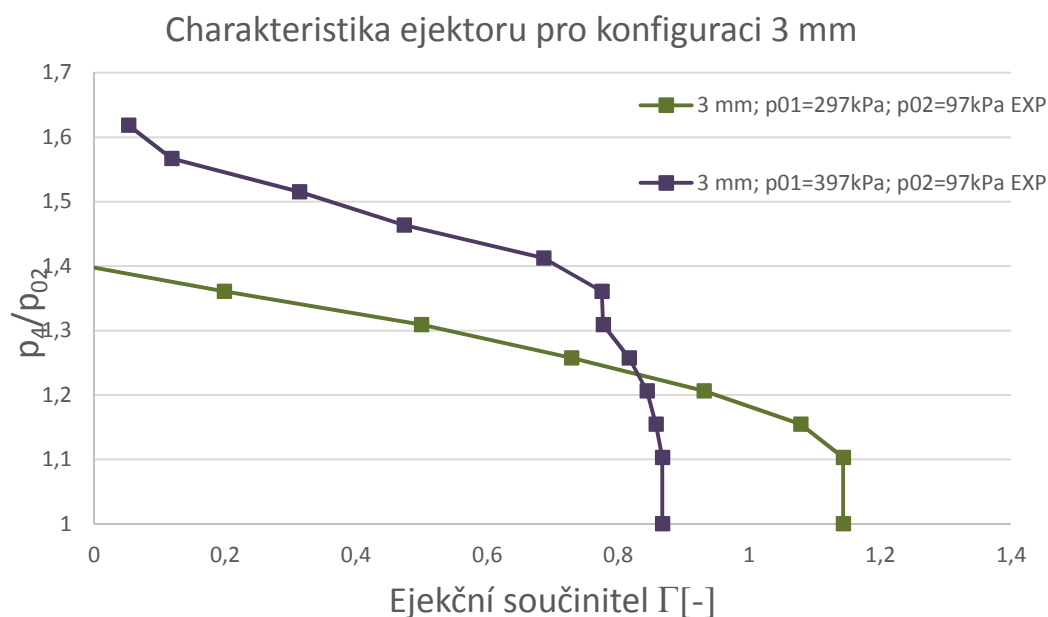
Charakteristika pro nastavení vzdálenosti výstupní části trysky od směšovací komory 2 mm ukazuje lepší ejekční součinitel než tomu je u předchozího nastavení (1 mm). Lze tedy říci, že tato konfigurace bude dosahovat lepší účinnosti než 1mm, případně srovnatelné účinnosti s některou z konfigurací 3 mm.

Opět vyššího ejekčního součinitele dosahuje ejektor při nastavení hnacího tlaku  $p_{01} = 297kPa$  oproti tlaku  $p_{01} = 397kPa$ . Ejekční součinitel dosahující hodnoty větší jak 1 je velmi žádaný. Ovšem použití s nižším tlakem hnacího proudu přináší problém s překonáváním vyšších protitlaků.

Při použití vyššího tlaku hnacího média dojde k poklesu ejekčního součinitele, respektive hmotnostního toku hnaného proudu. Tento jev je způsoben ucpáním hnaného proudu a ucpáním smíšeného proudu ve směšovací komoře.



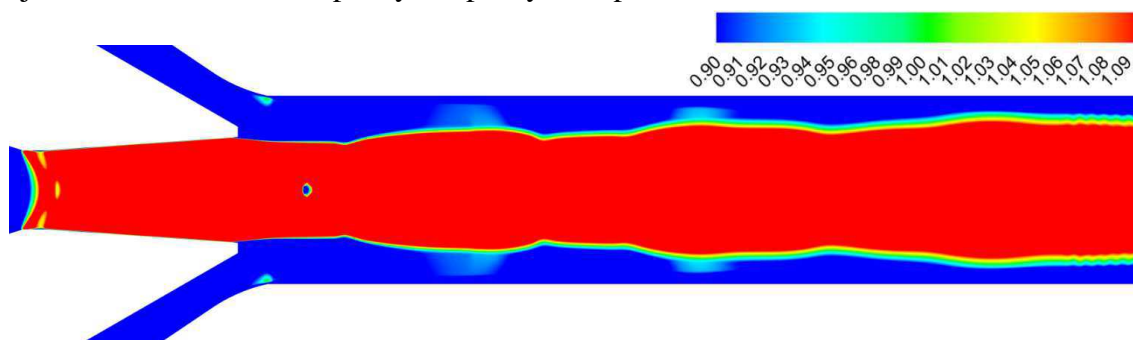
**Obr. 42:** Zobrazení ucpání směšovací komory a hnaného proudu: 2 mm;  $p_{01} = 397kPa$ ;  $p_{02} = 97kPa$ ;  $p_{04} = 97kPa$ ; CFD



**Obr. 43:** Charakteristika ejektoru pro nastavení vzdálenosti trysky od směšovací komory 3 mm

U nastavení 3 mm;  $p_{01} = 297\text{kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{kPa}$  je ejekční součinitel vyšší přibližně o 8% ejekčního součinitele při nastavení 2 mm;  $p_{01} = 297\text{kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{kPa}$ . Toto navýšení by bylo v našem případě zanedbatelné, ovšem při některé aplikaci, jako jsou chladírenská zařízení, může být při vysokých výkonech velmi žádoucí a může přinést značnou úsporu energie.

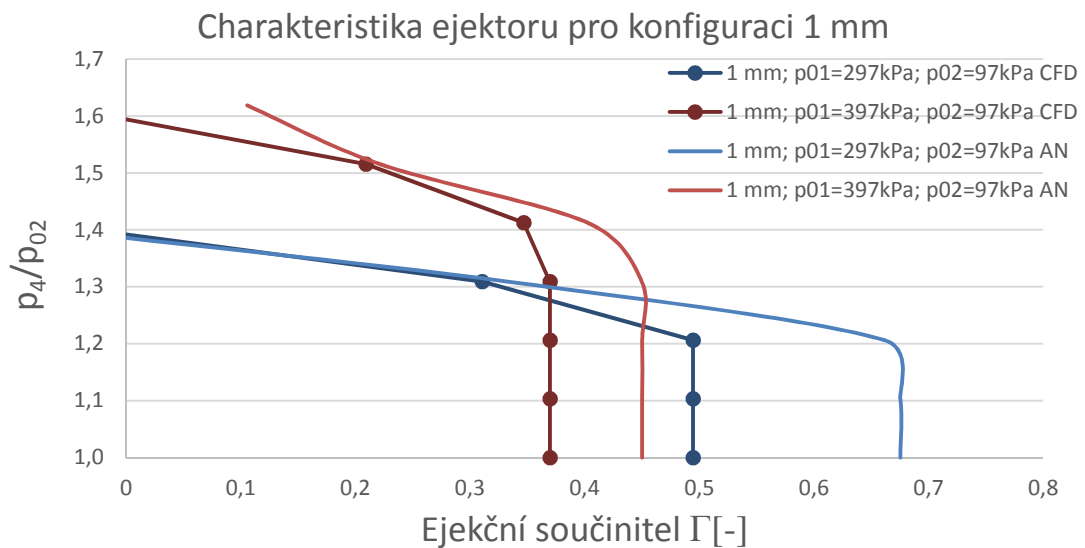
Při zvýšení tlaku hnaného proudu na hodnotu  $p_{01} = 397\text{kPa}$  dojde opět ke snížení ejekčního součinitele a lepší výkon při vyšších protitlacích.



**Obr. 44:** Zobrazení Machova čísla (0,9 – 1,1): 3 mm;  $p_{01} = 397\text{kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{kPa}$ ;  $p_{04} = 97\text{kPa}$ ; CFD

Jak lze vidět z obrázku č. 44, nedochází zde k ucpání hnaného proudu ani směšovací komory.

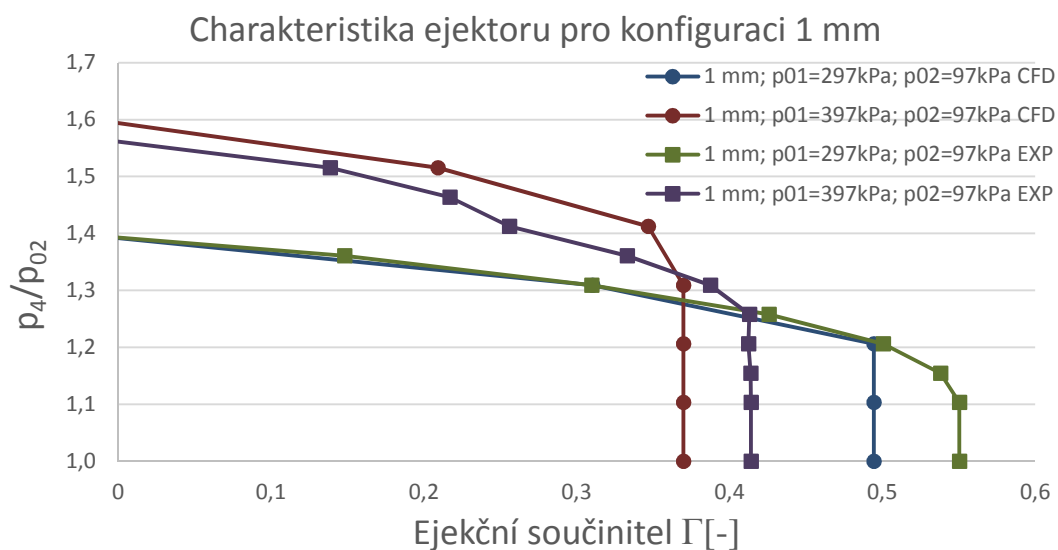
## 5.4 Porovnání jednotlivých výsledků



**Obr. 45:** Charakteristika ejektoru vypočtena analyticky a pomocí CFD v porovnání

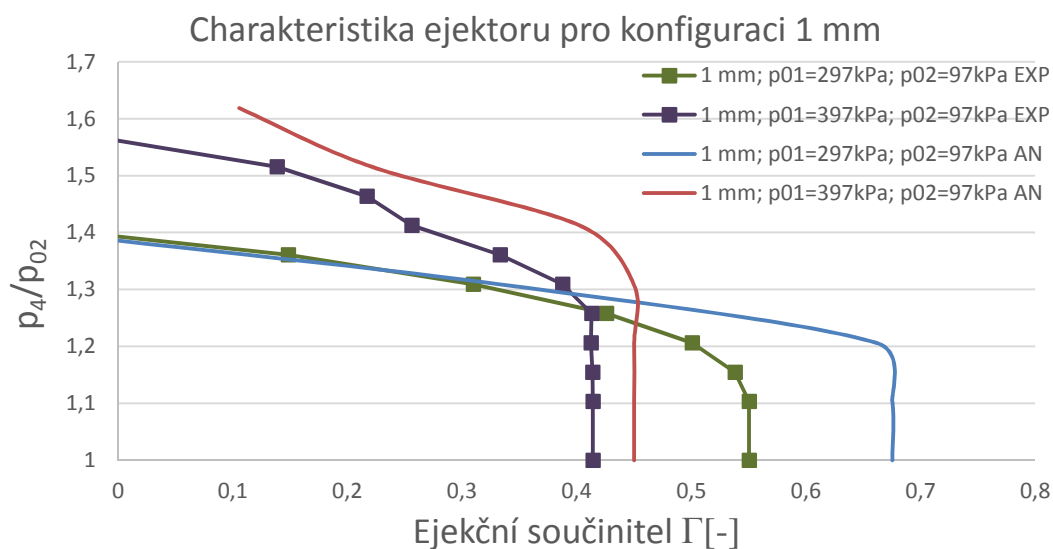
Průběhy ejekčního součinitele na poměrném protitlaku, vypočtené pomocí analytické metody, ukazují příznivější výsledky než je tomu u numerické metody. Je to způsobeno již zmíněným zjednodušením analytické metody, kdy v použitých rovnicích nebyly zahrnuty ztráty. Pokud bychom chtěli analytickou metodu přiblížit více skutečnosti, museli bychom při úpravě rovnic využít jistých koeficientů, které by rovnice patřičně upravily pro lepší shodu se skutečnými hodnotami.

Numerická metoda použitá při našich výpočtech zahrnuje alespoň některé ztráty, a tudíž by se měly výsledky získané touto metodou více blížit skutečnosti. Při numerickém výpočtu byl použit model ideálního plynu (vzduch), který by mohl mít také do jisté míry vliv na výsledky z CFD.

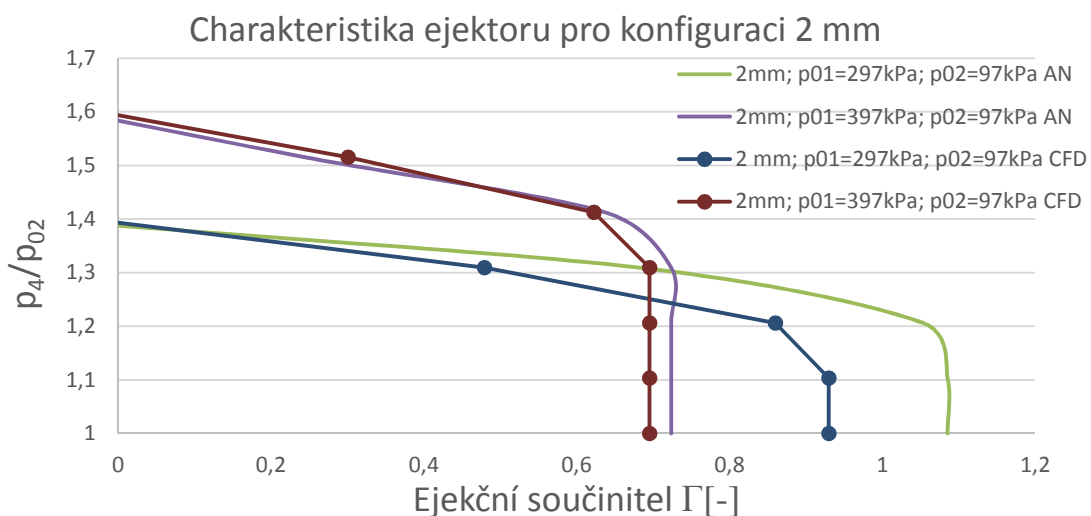


**Obr. 46:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí CFD v porovnání

Z této charakteristiky vyplývá, že výsledky experimentálního měření jsou příznivější než ty hodnoty vypočtené metodou numerickou. Ačkoliv je reálný experiment ten nejlepší, je možné, že některé děje, které ovlivňují proudění a směšování proudů v ejektoru, mají při numerické simulaci větší vliv, než by měly mít. Tento problém, může být způsoben použitým turbulentním modelem ( $k - \omega SST$ ).

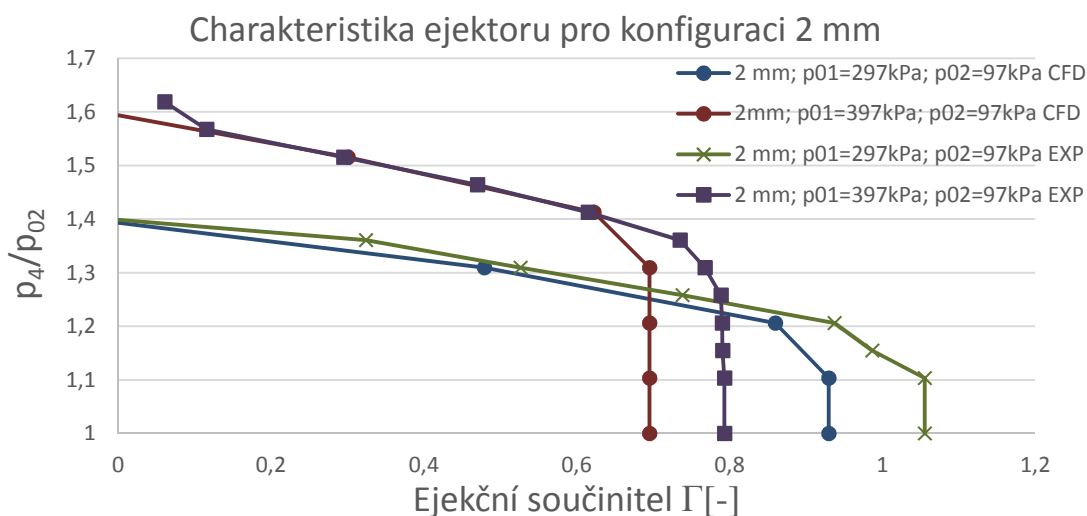


**Obr. 47:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí analytické metody v porovnání



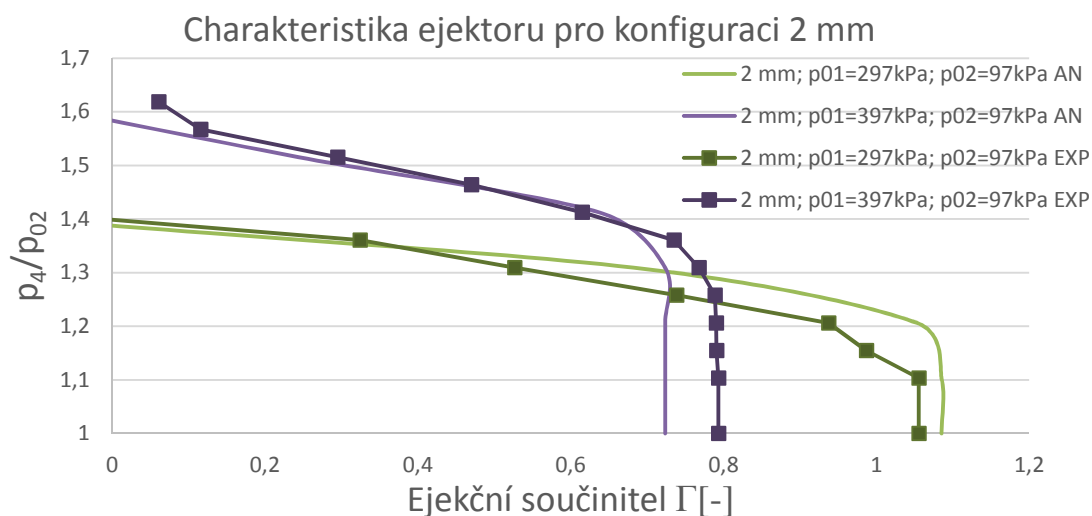
**Obr. 48:** Charakteristika ejektoru vypočtena analyticky a pomocí CFD v porovnání

V tomto průběhu ejekčního součinitele je zřejmé, že výsledky vypočtené pro konfiguraci ( $2\text{ mm}$ ;  $p_{01} = 397\text{ kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{ kPa}$ ) analytickou a numerickou metodou jsou téměř shodné.



**Obr. 49:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí CFD v porovnání

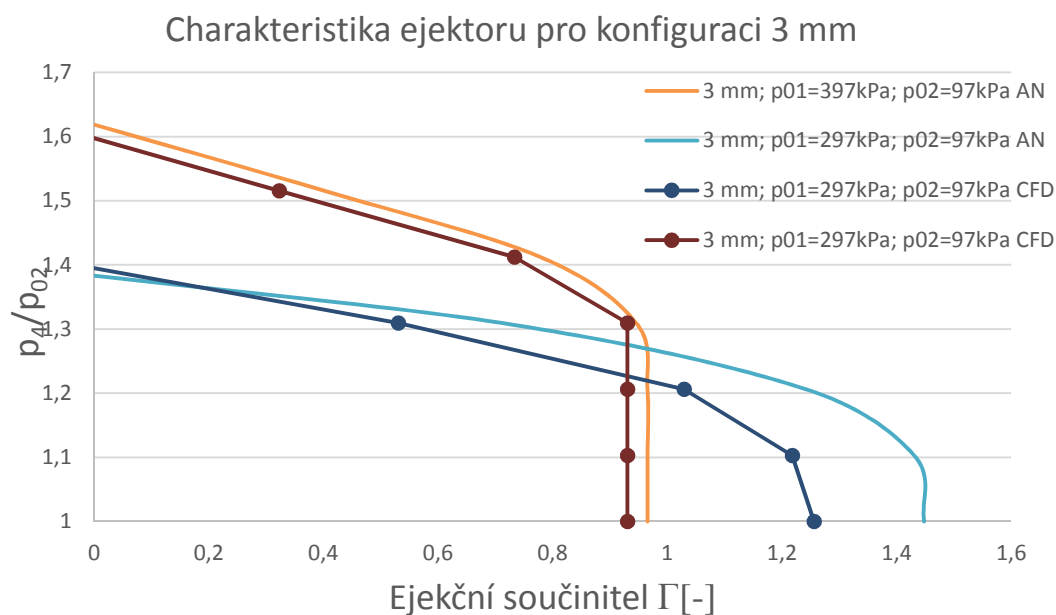
Na charakteristice uvedené na obrázku č. 49 se vypočtená a naměřená data velmi dobře shodují, hlavně v oblasti vyšších protitlaků. Může to být způsobeno snížením rychlosti ve směšovací komoře vlivem zvýšeného protitlaku.



**Obr. 50:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí analytické metody v porovnání

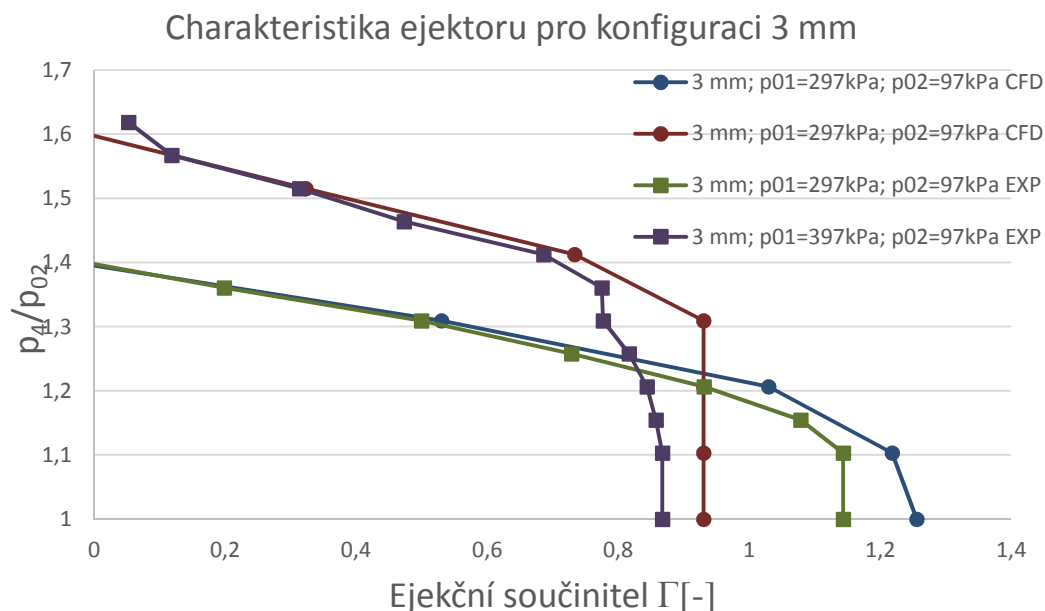
V tomto porovnání jsou výsledky, v oblasti konstantního ejekčního součinitele, analytické metody pro konfiguraci 2 mm;  $p_{01} = 397 \text{ kPa}$ ;  $p_{02} = 97 \text{ kPa}$  méně příznivé než výsledky z experimentálního měření. V oblasti zvýšeného protitlaku jsou opět výsledky téměř shodné.

Pro konfiguraci 2 mm;  $p_{01} = 297 \text{ kPa}$ ;  $p_{02} = 97 \text{ kPa}$  jsou výsledky experimentálního měření méně příznivé než je tomu u analytické metody, což by odpovídalo předpokladům.



**Obr. 51:** Charakteristika ejektoru vypočtena analyticky a pomocí CFD v porovnání

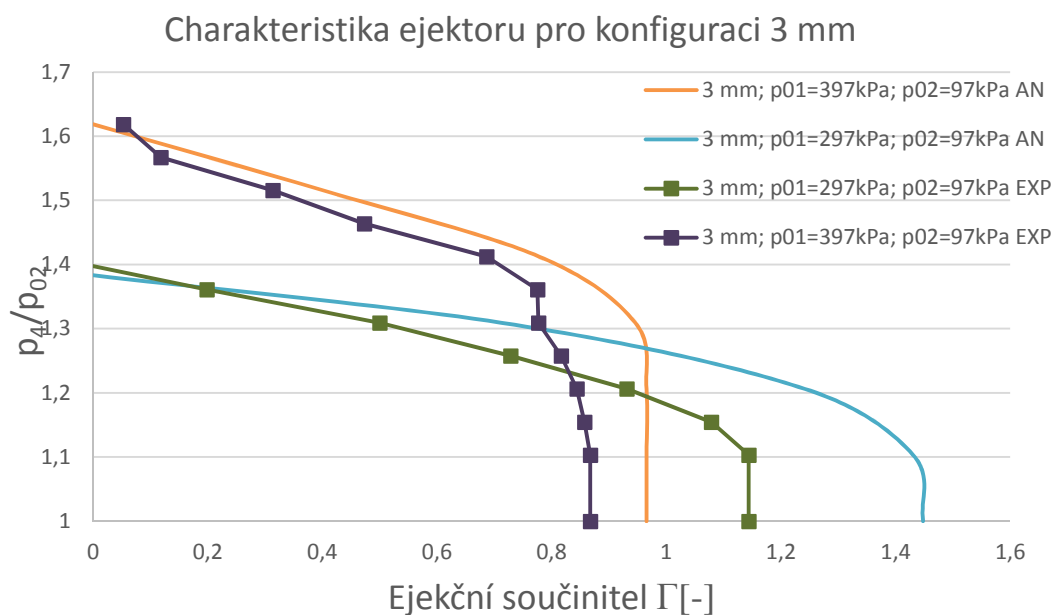
Při srovnání výsledků z analytické metody a CFD pro konfiguraci 3 mm;  $p_{01} = 397\text{kPa}$ ;  $p_{02} = 97\text{kPa}$  si můžeme všimnout, jak zavedené předpoklady ovlivňují výsledky. Mírný posun křivky výsledků z CFD oproti analytické metodě směrem k méně příznivým výsledkům ukazuje, jak zavedená zjednodušení v analytické metodě ovlivnila výsledky.



**Obr. 52:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí CFD v porovnání



Také na v tomto porovnání (obrázek č. 52) můžeme najít shodu výsledků CFD a experimentálního měření, zvláště v oblasti vyšších protitlaků. Můžeme si také všimnout, že výsledky numerické metody jsou příznivější než výsledky experimentálního měření.



**Obr. 53:** Charakteristika ejektoru vypočtena z experimentu a pomocí analytické metody v porovnání

## 6 Diskuze

Z výsledků, které jsou uvedeny a okomentovány v kapitole 5.4, vyplývá, že nejučinnější měřenou konfigurací je konfigurace pro 3 mm.

Výsledky pro tuto konfiguraci získané ze všech tří výpočtových metod se shodují jen do určité míry. Například výsledky z numerické metody a metody analytické s nastavením hnacího tlaku  $p_{01} = 397kPa$  se shodují velmi dobře. Naopak u experimentálního měření pro toto nastavení došlo pravděpodobně k chybě při zaznamenání nebo vyhodnocení dat.

Zajímavou konfigurací, která by se dala využít při dalším výzkumu, je konfigurace pro 2 mm. Kdybychom chtěli u této konfigurace zvýšit ejekční součinitel, mohli bychom využít jednu z trysek s menším průřezem hrdla. Poté by nemuselo docházet k ucpávání hrdla hnaného proudu ani směšovací komory. Snížili bychom nároky na množství hnacího média možná s lepším výsledkem. Z časových důvodů nebyly tyto variace nastavení s jinou tryskou provedeny.

Použití konfigurace s nastavením vzdálenosti trysky od směšovací komory 1 mm je pro praktické využití nepoužitelné. Pro toto nastavení dochází při nízkých protitlacích k tomu, že výstupní proud z trysky je v podexpandovaném režimu. Při měření s nižším tlakem hnacího proudu bylo naopak zjištěno, že při použití tlaku  $p_{01} = 197kPa$  dochází v trysce k rázové vlně, což není pro naši aplikaci žádoucí.

Pro výzkum, který nyní probíhá, by bylo vhodné navrhnout trysku, respektive ejektor s proměnlivou geometrií. Takovýto ejektor by měl široké využití ve všech odvětvích průmyslu. Nejvyššího uplatnění by se mu dostalo v aplikacích alternativních chladicích systémů, čímž by se odstranila náročná regulace chladicího výkonu. V takovém případě by stačilo regulovat průřez trysky nebo samotný tvar ejektoru.

## 7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo seznámení s nadzvukovou ejektorovou trati, měření na ejektorové trati a porovnání výsledků s jinými výpočtovými metodami. V jednotlivých kapitolách jsou shrnuty teoretické poznatky o ejektorech, analytické řešení směšování beze ztrát, experimentální výzkum a numerický výpočet. Všechny cíle diplomové práce byly tedy splněny.

Při práci s nadzvukovou ejektorovou trati bylo zjištěno několik výrobních chyb, které předpokládala i předchozí diplomová práce. Směšovací komora byla pravděpodobně při výrobě poškozena vrypem na vnitřní stěně, což způsobovalo nestabilitu nadzvukového proudu. Tato nepřesnost byla opravena. Další nepřesnosti, které mohly mít vliv na průběh směšování, byly spíše drobného rázu.

Praktickým vylepšením při měření tlakových diferencí na ejektorové trati se jevílo zaznamenávání dat ve společném softwaru, což by umožnilo přesnější záznam dat a jejich následné kompaktnější třídění. Bohužel snímače, které byly k dispozici, neměly dostatečnou citlivost pro naše použití. Spolu s tím bylo navrženo a odzkoušeno pouzdro pro tyto diferenční snímače. Tyto snímače by se daly využít pro další měření, ale pouze při vyšších hmotnostních tocích (tlakových diferencích).

Pro zpracování a naměření dat bylo získáno 42 kombinací nastavení ejektorové trati. Byly použity 2 tlaky hnacího média ( $200kPa$  a  $300kPa$ ) a 3 vzdálenosti trysky od směšovací komory ( $1$ ,  $2$  a  $3\text{ mm}$ ). Pro všechny tyto konfigurace bylo provedeno experimentální měření, analytické řešení a numerická simulace. Všechny výsledky jsou uvedeny v předchozí kapitole č. 5.

## Literatura

- [1] J. Kracik, V. Dvorak, and J. Kolar, “*Development of air to air ejector for supersonic wind tunnel,*” EFM13 - Exp. Fluid Mech. 2013
- [2] Jaroslav BBOUŠEK, *Vakuová technika*, 2011
- [3] J. Kracik and V. Dvorak, “*Preliminary study of the primary nozzle position of a supersonic air ejector with a constant-area mixing chamber,*” EPJ Web Conf., 2017
- [4] Václav DVOŘÁK, *Výzkum a optimalizace ejektorů, habilitační práce.* TUL 2010
- [5] Václav DVOŘÁK, *Proudové procesy v ejektorech, disertační práce.* TUL 2013.
- [6] Michal PAVLAS, *Návrh a ověření supersonických ejektorů, diplomová práce,* TUL 2017
- [7] Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - část 2: Clony, ČSN ISO 5167-2. 2001
- [8] Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – část 1: Obecné principy a požadavky, ČSN ISO 5167-1, 2018
- [9] VŠCHT Praha: *Nejistoty měření a zpracování výsledků* [online]. [cit. 2018-05-12]. <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [10] Měření průtoku tekutin, ČSN ISO 5168, 2006
- [11] Fluent, “*ANSYS FLUENT User ’ s Guide,*” 2011
- [12] J. Kolář and V. Dvořák, “*Verification of K- $\omega$  SST Turbulence Model for Supersonic Internal Flows,*” Waset.Org, 2011
- [13] TOS Varnsdorf, *Měrové středisko*

- [14] Ing. Václav Dvořák Ph.D., *Úvod do proudění stlačitelných tekutin*. Liberec: 2009, ISBN 978-80-7372-458-0
- [15] Ing. Václav Dvořák Ph.D., *Proudění v tryskách a difuzorech*. Liberec: 2009 ISBN 978-80-7372-457-3
- [16] *Konzultace s pracovníky Katedry energetických zařízení*