



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Měření rychlostních a turbulentních profilů v podzvukovém ejektoru metodou CTA

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Jan Dědeček**

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Dědeček**
Osobní číslo: **S11000029**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Měření rychlostních a turbulentních profilů v podzvukovém ejektoru metodou CTA.**
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 podzvukových ejektorech a o metodě CTA.
2. Nastudujte měřicí ejektorovou trať v laboratořích, zapojte rozvod tlakového vzduchu.
3. Seznamte se s měřicí technikou.
4. Naměřte průběhy tlaků ve směšovací komoře a naměřte rychlostní profily metodou CTA.
5. Otestujte možnosti využití syntetizovaného paprsku v difuzoru ejektoru.
6. Naměřená data zpracujte, vynesete do diagramů a okomentujte.
7. Formulujte závěry.


Rozsah grafických prací: 10
Rozsah pracovní zprávy: 35 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

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


[2] KASÝK, M., 2014. Měření vzduchového ejektoru s divergentní směšovací komorou, bakalářská práce. Liberec: TUL.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
Katedra energetických zařízení
Konzultant bakalářské práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: 2. března 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




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

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou 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.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

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

V Doubravících 22. 6. 2015



Dědeček Jan

Poděkování:

Rád bych v první řadě poděkoval vedoucímu Katedry energetických zařízení Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci doc. Ing. V. Dvořákovi, Ph.D., za ochotné vedení mé práce.

Dále bych chtěl poděkovat konzultantce práce Ing. P. Dančové, Ph.D., která mi velmi vhodně pomáhala při plnění úloh. Mé děkovná slova tímto také míří i k Ing. O. Macháčkovi, který mi umožnil měřit na experimentální trati.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mi umožnila studium a usilovně mě po celou dobu podporovala. V poslední větě chci poděkovat mé přítelkyni, která se mi stala silnou oporou po celou dobu mé práce.

Anotace

Měření rychlostních a turbulentních profilů v podzvukovém ejektoru metodou CTA

V naší práci se zabýváme proudovými procesy v divergentní části směšovací komory. V první řadě jsme proměřili průběh statického tlaku podél směšovací komory a difuzoru. Pro určení tří režimů, které jsme po celou dobu proměřovali, jsme získali průběhy účinnosti a pracovní charakteristiky ejektoru. Poté došlo k naměření rychlostních a turbulentních profilů ve třech místech pro tři zvolené režimy. V poslední úloze jsme se pokusili popsat vliv generátoru syntetického paprsku při proudění ejektoru.

Všechny naměřené veličiny jsme zanesli do diagramů. Pokusili jsme se porovnat rychlostní profily střední a flukтуаční složky rychlosti. Porovnali jsme je buďto pro jeden režim ve třech místech nebo pro jedno místo všechny tři režimy.

Klíčové slova: ejektor, divergentní směšovací komora, CTA, syntetizovaný paprsek

Measurement of velocity profiles and turbulent subsonic ejector by CTA

In our work we deal with the current processes in divergent parts of the mixing chamber. First, we measured the static pressure along the course of the mixing chamber and diffuser. To determine the three modes, which are all the time were checked, we acquired waveforms efficiency and operational characteristics of the ejector. After that, a measurement of velocity and turbulence profiles at three locations for three modes selected. The last task we tried to describe the influence of the synthetic jet generator in the flow of the ejector.

All Measured values are Carried into diagrams. We have tried to compare the speed profiles medium and fluctuating velocity components. We matched theme for Either one or three points mode for one place all three modes.

Keywords: ejector, divergent mixing chamber, CTA, syntetic jet

Seznam použitého značení

zkratka	jednotka	veličina – popis, definiční vztah nebo vztah použití
A	m^2	plocha
A, B	-	funkce, vztah 3.9, 3.10
A, B, C, D, F	-	kalibrační konstanty
C	-	součinitel průtoku
d	m	průměr
D	m	průměr
E	V	napětí
h	J/kg	měrná entalpie
I	A	elektrický proud
I	%	intenzita turbulence
\dot{m}	kg/s	hmotnostní tok
l	m	délka
p	Pa	tlak
P	W	elektrický výkon
\dot{Q}	W	tepelný výkon
r	J/(kg.K)	měrná plynová konstanta
R	Ω	odpor
t	$^{\circ}\text{C}$	teplota
T	K	termodynamická teplota
w	m/s	celková rychlost
x	kg_v/kg_{svz}	měrná vlhkost
α	W/m^2K	součinitel přestupu tepla
ω	-	poměr rychlostí, vztah 2.3
φ	-	rychlostní součinitel.
κ	-	izoentropický exponent
κ	$\Omega.m$	měrný odpor
θ	-	poměr klidových teplot, vztah 2.4
Γ	-	ejekční poměr, vztah 2.5
ρ	kg/m^3	měrná hmotnost
η	-	účinnost
Π	-	relativní protitlak

μ	-	poměr ploch trysek
ε	-	expanzní součinitel

Operátory

d	diferenciál
Δ	změna

Význam indexů

0	klidový stav, počáteční stav
1	týkající se hnacího proudu
12	hodnoty na začátku směšovací komory
2	týkající se hnaného proudu
3	hodnoty na konci směšovací komory
4	hodnoty na konci difuzoru
atm	atmosférický
cl	týkající se clony
d	týkající se dýzy
D	týkající se difuzoru
J	Joulovo teplo
kond	kondukce tepla
konv	konvence tepla
rad	radiace
SK	týkající se směšovací komory
wire	žhavený drátek

Význam použitých zkratk

CTA	„Constant Temperature Anemometry“
HWA	„Hot Wire Anemometry“
SP	syntetizovaný paprsek

Obsah

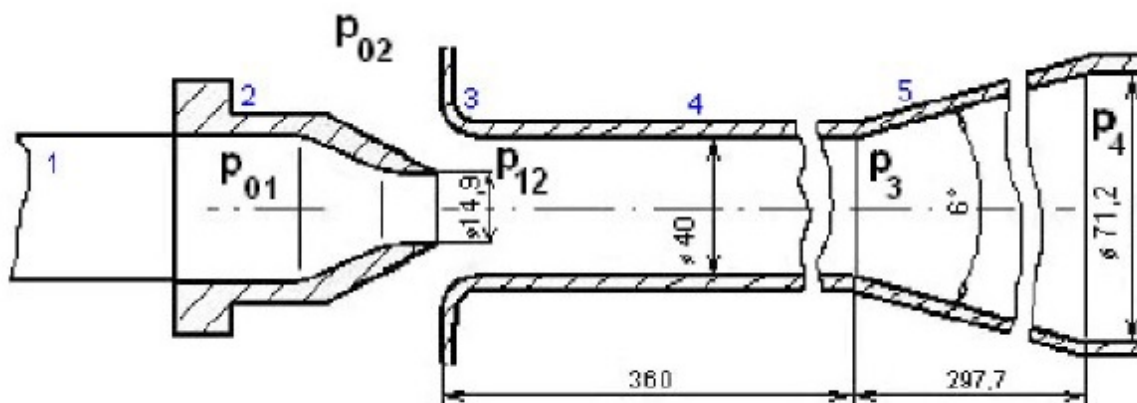
1 Úvod.....	10
1.1 Součásti podzvukového ejektoru	10
1.2 Popis procesů v ejektoru.....	10
1.3 Využití ejektorů v průmyslu	11
1.3.1 Podtlakové hlavice	12
1.3.2 Ejektor jako plynová vývěva.....	12
1.3.2 Chlazení spalovacího motoru.....	13
1.4. Rešerše stávajících prací.....	13
2 Teoretická část.....	15
2.1 Jednorozměrná metoda analýzy.....	15
2.2 Proudění v hnací a hnané trysce	16
2.3 Proces směšování.....	17
2.4 Proudění v podzvukovém difuzoru.....	17
2.5 Účinnost ejektoru a pracovní charakteristika	18
3 Experimenty	19
3.1 Schéma měřící tratě	19
3.2 Měření hmotnostních průtoků a účinností	21
3.3 Proměření statického tlaku ve směšovací komoře.....	22
3.4 Drátková anemometrie	23
3.5 Měření rychlostních profilů ejektoru se syntetizovaným paprskem.....	28
4 Výsledky měření	30
4.1 Měření charakteristických veličin ejektoru	30
4.2 Měření statického tlaku	33
4.3 Měření rychlostních profilů	33
4.4 Využití syntetizovaného paprsku v ejektoru	40
5 Závěr.....	43
Seznam použité literatury	45

1 Úvod

V úvodní části práce se seznámíme s díly, ze kterých se skládá proudový ejektor. Shrňeme základní principy činnosti a popíšeme děje, které vznikají při uvedení stroje v provoz. Dále naznačíme obory průmyslu, kde se lze setkat s jakýmkoli využitím ejektorů.

1.1 Součásti podzvukového ejektoru

Ejektor, někdy také nazývaný injektor, je řazen do skupiny proudových čerpadel. Z hlediska konstrukce je ejektor velmi jednoduše konstruován. Jeho hlavní výhodou je absence pohyblivých částí, které by předávaly energii. Na obr. 1 je vidět schéma podzvukového ejektoru. Z nádrže tlakového vzduchu o velkém objemu, v níž je pomocí kompresu udržován stálý tlak, odchází proud stlačeného vzduchu přívodním potrubím do hnací trysky o průměru $d = 19,2 \text{ mm}$. Hnací proud strhává okolní prostředí do hnané trysky a dále pokračuje do směšovací komory o průměru $D_{SK} = 40 \text{ mm}$. Nakonec po smíchání obou proudů vstupuje do difuzoru.



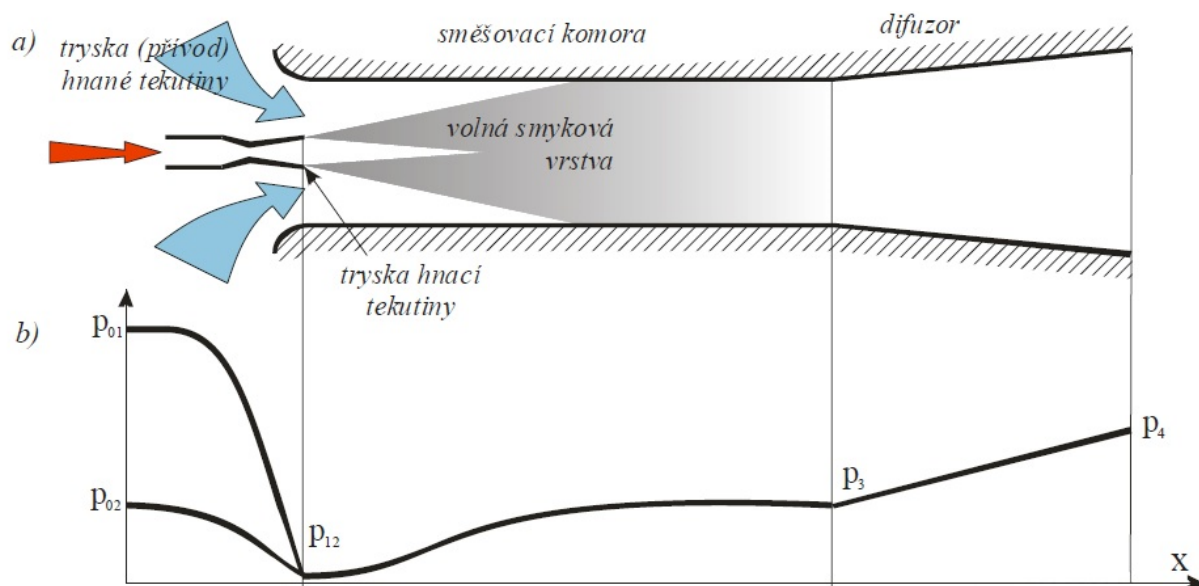
Obr. 1.1 Konstrukční schéma ejektoru

- 1- přívodní potrubí, 2 - tryska hnacího proudu, 3 - tryska hnaného proudu, 4 - směšovací komora, 5 – difuzor [4]

1.2 Popis procesů v ejektoru

Ejektor se řadí mezi proudová čerpadla, která k přenosu energie nevyužívají pohyblivé části, jakými jsou lopatky nebo písty. U ejektoru totiž dochází k nasávání nízkotlakého okolí za pomoci vysokotlakého média.

Ze zásobníku se přivádí tlakový (hnačí, primární) proud o klidovém tlaku p_{01} do hnačí trysky, ve které tento proud expanduje do vysoké rychlosti. Nasávání okolního prostředí je zapříčiněno třecími silami hnačího proudu, které jej strhávají. Tím, že je okolní prostředí ohraničené stěnami směšovací komory, způsobuje strhávání okolí pokles, čímž je zajištěn správný chod ejektoru a dochází k nasávání. Po nasátí hnaného (sekundárního, nasávaného) proudu do směšovací komory dochází v této komoře ke smíchání s primárním proudem. Oba tlaky expandují na společný expanzní tlak p_{12} .



Obr. 1.2: K popisu procesů v ejektoru; a) - pracovní schéma ejektoru, b) - průběh tlaků při podél ejektorem [1]

Ve směšovací komoře se začíná předávat kinetická energie hnačího proudu hnanému, další zlomek energie se změní v tlakovou energii a zbytek disipuje v tepelnou energii. Právě disipace největší měrou nepříznivě ovlivňuje účinnost práce ejektoru. Po smíchání obou proudů vstupuje výsledný proud do difuzoru, kde má tlak p_3 . Za pomoci difuzoru, ve kterém se přeměňuje zpět kinetická energie na tlakovou, se zvyšuje tlak na hodnotu p_4 , čímž se alespoň lehce zvyšuje už tak velmi nízká účinnost.

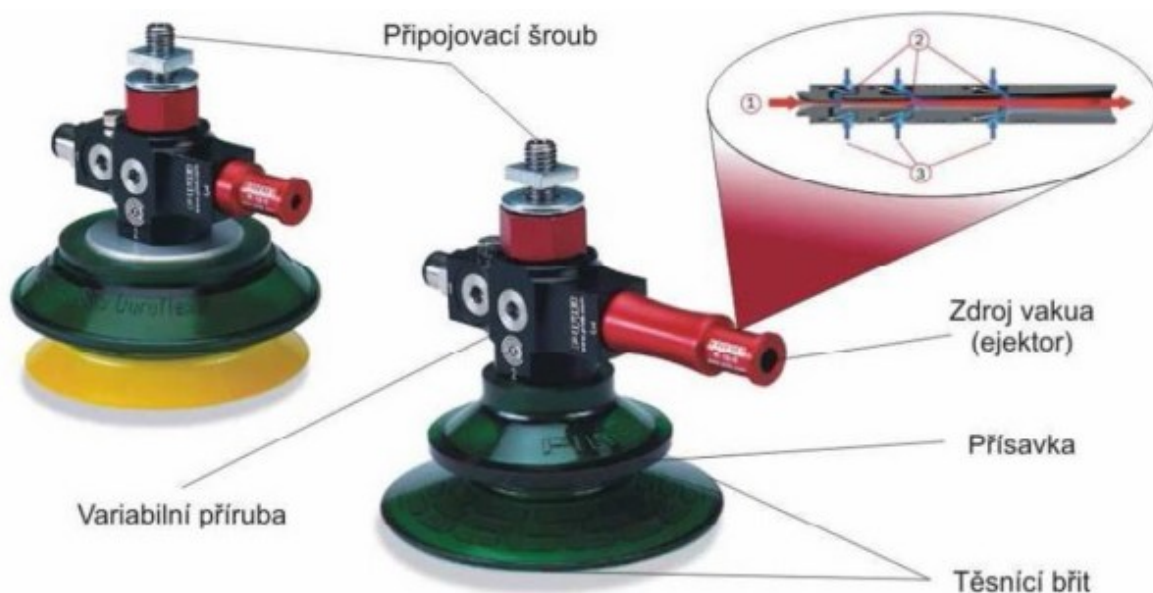
Největší nevýhodou v praxi je nízká účinnost, která je zapříčiněna vznikem ztrát při procesech uvnitř ejektoru. Rozlišujeme dva druhy ztrát, vznikající třením nebo směšováním. Hlavním ukazatelem ztrát je poměr rychlostí hnaného a hnačího proudu $\omega = w_2/w_1$. Při zvýšeném rychlostním poměru ztráty třením stoupají, oproti tomu mají ztráty vznikající směšováním klesající tendenci. Nejvyšších výsledků účinnosti lze dosáhnout při ideálním rychlostním poměru, při němž je součet obou ztrát co nejnižší.

1.3 Využití ejektorů v průmyslu

1.3.1 Podtlakové hlavice

V dnešní době se užívá k manipulaci a přemísťování často těžkých a špatně uchopitelných předmětů podtlakových hlavice. Hlavní podmínkou k uchopení je hladkost a rovnost povrchu. Nejčastěji jsou hlavice v průmyslu koncovým prvkem komplikovaných robotických manipulátorů.

Podtlaku dnes lze dosáhnout mnohými zdroji. Ovšem nejvíce se v robotice osvědčilo použití ejekční vývěvy. Využívá se zde principu Venturiho trubice. Na obr. 1.3 je vidět konstrukce podtlakové hlavice. Po přiložení a přitlačení na přemísťovaný předmět se pryžová přísavka přitiskne a utěsní vnitřní prostory hlavice. Po přivedení tlakového vzduchu dojde k nasátí vzduchu z komory, čímž vznikne podtlak. [6]



Obr 1.3: Podtlaková hlavice [6]

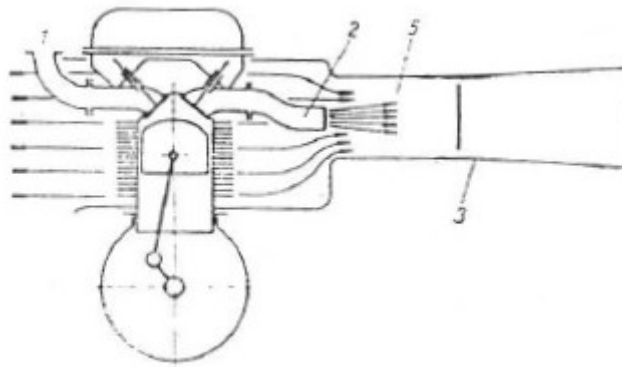
1.3.2 Ejektor jako plynová vývěva

V tomto případě se využívá ejektor u hasičských odstředivých čerpadel, která nejsou zcela zavodněna. Od větších výtlačných hloubek už nelze používat pouze samotná čerpadla. Z důvodu vytvoření většího podtlaku se zde využívá plynové vývěvy.

Pro nasávání se většinou využívá spalín spalovacího motoru, který pohání odstředivé čerpadlo. Spaliny se dostanou do trysky, kde zvýší rychlost a klesne jim tlak, a tím dojde k nasátí vzduchu a vytvoření podtlaku. Funkčnost vývěvy se manuálně ukončí v době, kdy dojde k výstřiku vody z výfukového potrubí.

1.3.2 Chlazení spalovacího motoru

Při rozsáhlém rozvoji motorů v 60. letech 20. století konstruktéři vynalezli způsob, jak poměrně dobře odvádět teplý vzduch z okolí motoru. Při vzduchovém chlazení motoru je největší prioritou dosažení silného chladicího proudu, který musí být schopen překonat aerodynamický odpor na hliníkových žebrech motoru a ještě zajistit odvod tepla.



Obr. 1.4: Ejektorové chlazení spalovacího motoru TATRA 603; 1-sací potrubí, 2- výfukové potrubí, 3- ejektor, 4- chladící vzduch, 5- výfukové spaliny [5]

Hlavním nositelem energie jsou výfukové plyny, které jsou dopravovány z výfukového potrubí do ústí ejektoru, kde strhávají teplý vzduch z okolí bloku motoru a většinou přes difuzor jsou společně se spaliny vyfukovány do atmosféry. [5] Značná jednoduchost konstrukce a nulový odběr výkonu motoru je kladnou položkou využívání, ovšem velmi negativně působí hlasitý chod. Z tohoto důvodu se ustoupilo ze sériové výroby a zůstalo se pouze u závodních automobilů.

1.4. Rešerše stávajících prací

V letech minulých se o problematiku ve výpočtech ejektoru zajímalo mnoho odborníků. V roce 2006 se Fridrich zabíral prouděním ve vzduchových ejektorech. [3] Jeho diplomová práce se zabírala experimentálním a numerickým výzkumem směšování dvou proudů ve válcové směšovací komoře podzvukového ejektoru. Pomocí metody CTA experimentálně vyšetřoval děje vznikající vně ejektoru. Pomocí softwaru FLUENT se snažil naměřená data

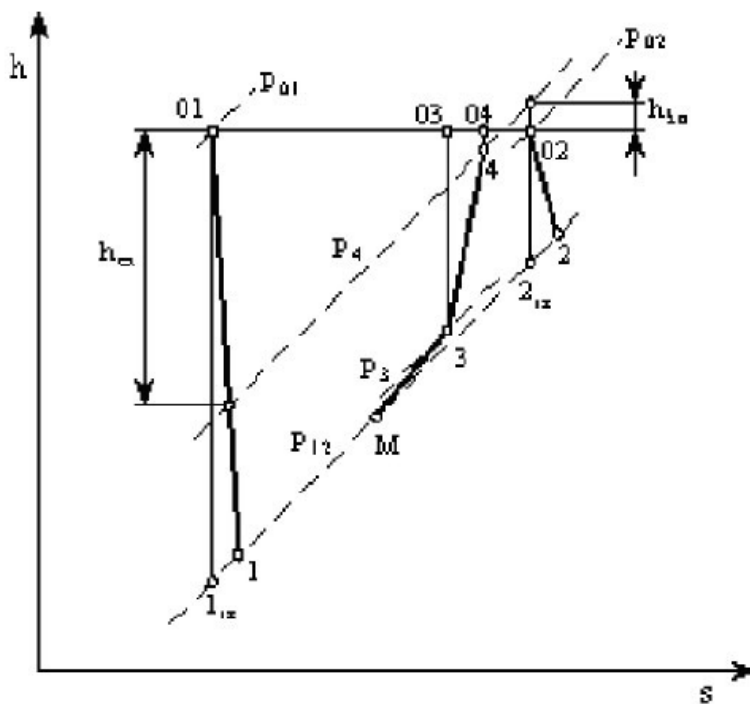
porovnat vůči numerickým modelům. Dvořák se zaměřil podrobněji na optimalizaci proudění v ejektorech v roce 2010. [1] Ve své práci se snažil shrnout teoretické základy výpočtu ejektorů. Dále shrnul experimentální metody výzkumu a změřil hmotnostní průtoky a účinnosti. Za pomoci drátkové anemometrie proměřil rychlostní profily. Svou práci také podpořil numerickými výpočty. V neposlední řadě se snažil prozkoumat a vyřešit optimalizovaný tvar směšovací komory a difuzoru. V roce 2014 se Kasýk [2] ve své práci pokusil zpracovat teoretické podklady k proudění v ejektoru s divergentní směšovací komorou. Změřil opět charakteristické parametry, které již měřili autoři před ním. V roce 2007 Sčirban zkoumal vliv geometrie hnací trysky na směšování ve vzduchovém ejektoru. Využil šesti různých druhů trysek. Byly použity tryska kruhová, laloková s 8 nebo 12 laloky, tryska s generátorem podélných vírů, tryska křížová a vícenásobná. Opět změřil charakteristické parametry a pokusil se je srovnat s numerickými výsledky.

2 Teoretická část

2.1 Jednorozměrná metoda analýzy

Základem principu analýzy je užití zjednodušených stavových veličin, které jsou aplikovány na stacionární adiabatické proudění v reálném ejektoru. Místo rovnic složitěho skutečného trojrozměrného proudění jsou použity jednoduché jednorozměrné rovnice, jež jsou demonstrovány středními hodnotami rychlosti a ostatních stavových veličin. Při popisované metodě nelze popsat děj celého směšování, ale pouze samostatné děje v různých místech ejektoru, kterými jsou na vstupech hnací trysky, hnané trysky, směšovací komory, difuzoru a taktéž na výstupního potrubí.

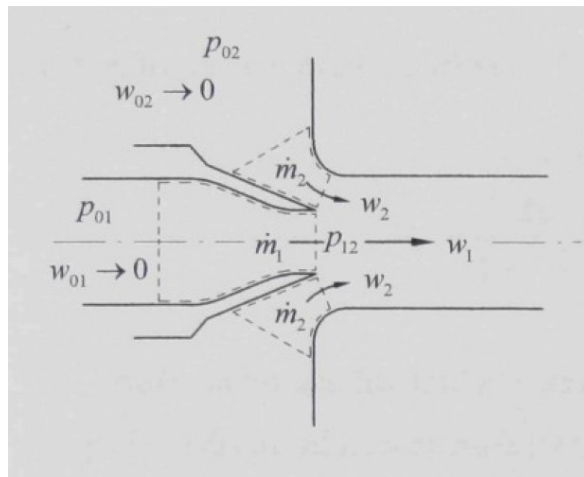
Při proudění tekutiny, jež nejlépe odpovídá vazké tekutině, dochází k hydraulickým ztrátám, tudíž je potřeba do rovnic připočíst vliv mezní vrstvy na stěnách hnací i hnané trysky, směšovací komory a difuzoru. Na obr. 2.1 jsou vidět v h - s diagramu stavové změny vznikající při činnosti ejektoru. Klidové tlaky hnacího proudu p_{01} a hnaného proudu p_{02} expandují na společnou expanzní izobaru p_{12} . V případě vazké tekutiny expandují do bodů 1 a 2 v případě ideální tekutiny do bodů 1_{iz} , 2_{iz} . Dále expanzní tlak poroste přes směšovací komoru na izobaru p_3 a v posledním kroce se zpomalí proud v difuzoru na tlak p_4 .



Obr. 2.1: Stavové děje v ejektoru [4]

2.2 Proudění v hnací a hnané trysce

Na obr. 2.2 jsou zobrazeny zužující se trysky, ve kterých expandují oba klidové proudy o stavových veličinách $p_{01}, T_{01}, p_{02}, T_{02}$ na společný expační tlak p_{12} , při kterém za vlivu trysky jsou různé výtokové rychlosti w_i a hmotnostní toky \dot{m}_i . Lze vidět na obr. 2.1, že kvůli působení hydraulických ztrát obě počáteční prostředí expandují na stav o vyšší entropii a menším klidovém tlaku.



Obr 2.2: Hnací a hnaná tryska [3]

Podle Fridricha [3], který využil integrace věty o energii a snažil se o zjištění skutečné výtokové rychlosti z trysek:

$$w_i = \varphi_i w_{iz}, \quad (2.1)$$

kde φ_i je rychlostní součinitel a w_{iz} výtoková rychlost při adiabatickém proudění, jež je dána St. Vénant – Wantzelotovu větou:

$$w_{iz} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} r T_{0i} \left(1 - \frac{p_{12}}{p_{0i}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \quad (2.2)$$

kde κ je Poissonova konstanta, r plynová konstanta, T_{0i} klidová teplota proudu, p_{12} společný expační tlak a p_{0i} klidový tlak proudu.

Pro další popis proudění vně ejektoru je záhodné si určit několik bezrozměrných veličin

$$\omega = \frac{w_2}{w_1} \quad (2.3)$$

kde w je okamžitá rychlost proudu hnacího nebo hnaného a ω rychlostní poměr.

$$\theta = \frac{T_{02}}{T_{01}} \quad (2.4)$$

kde θ je poměr klidových teplot a T_{0i} klidové teploty proudů.

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (2.5)$$

kde Γ je ejekční součinitel, který se rovná podílu hmotnostních průtoků proudů \dot{m}_2 a \dot{m}_1 .

2.3 Proces směřování

K popisu směřování uvažujme, že směřovací komora je konstantního průměru. Podle Kasýka [2] se vychází z bilančních rovnic. První ukažme rovnici kontinuity

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3, \quad (2.6)$$

jejímž rozepsáním lze získat tvar, na kterém je vidět, že $\rho \neq \text{konst}$

$$\rho_1 A_1 w_1 + \rho_2 A_2 w_2 = \rho_3 A_3 w_3. \quad (2.7)$$

Druhou využívanou rovnicí pro popis směřování je rovnice toku hybnosti ve tvaru

$$\rho_1 A_1 w_1^2 + \rho_2 A_2 w_2^2 + p_{12}(A_1 + A_2) = \rho_3 A_3 w_3^2 + p_3 A_3 + \int_{A_{sk}} p dA_{skx} \quad (2.8)$$

kde na pravé straně rovnice je integrál indikující sílu, která bude působit tlakově na průmět stěny směřovací komory A_{skx} směřující po ose x . Z analytického hlediska je rovnice neřešitelná. Z tohoto důvodu tedy chceme najít takové řešení, aby se integrál rovnal nule. Nejjednodušší jsou dva případy. V prvním případě se jedná o rovno plochou směřovací komoru a v druhém možném případě jde o směřovací komoru rovnotlakou, kde $dp(x) = 0$. Tohoto se dosáhne proměnným zužujícím se průřezem směřovací komory. Problematikou ohledně výpočtu směřování se podrobněji zabýval ve své bakalářské práci Kasýk [2].

2.4 Proudění v podzvukovém difuzoru

Difuzor plní roli měniče dynamického tlaku na statický tlak. Obr. 2.1 nám bude sloužit k popisu stavového děje v difuzoru. Je zde naznačena adiabatická komprese ze stavu p_3 o své teplotě T_3 a rychlosti w_3 na stav o konečném tlaku p_4 . Můžeme si všimnout, že v důsledku třecích ztrát se křivka kompresní adiabaty se odklání ve směru vyšších entalpií od izoentropie 3-4_{iz}. Účinnost podle Fridricha [2] je poměr entalpií ve skutečném a izoentropickém difuzoru

$$\eta_D = \frac{h_{04} - h_4}{h_{04} - h_3}, \quad (2.9)$$

Pomocí několika vhodných úprav lze psát účinnost difuzoru takto:

$$\eta_D = \frac{1 - \left(\frac{p_3}{p_{04}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left(\frac{p_3}{p_{03}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (2.10)$$

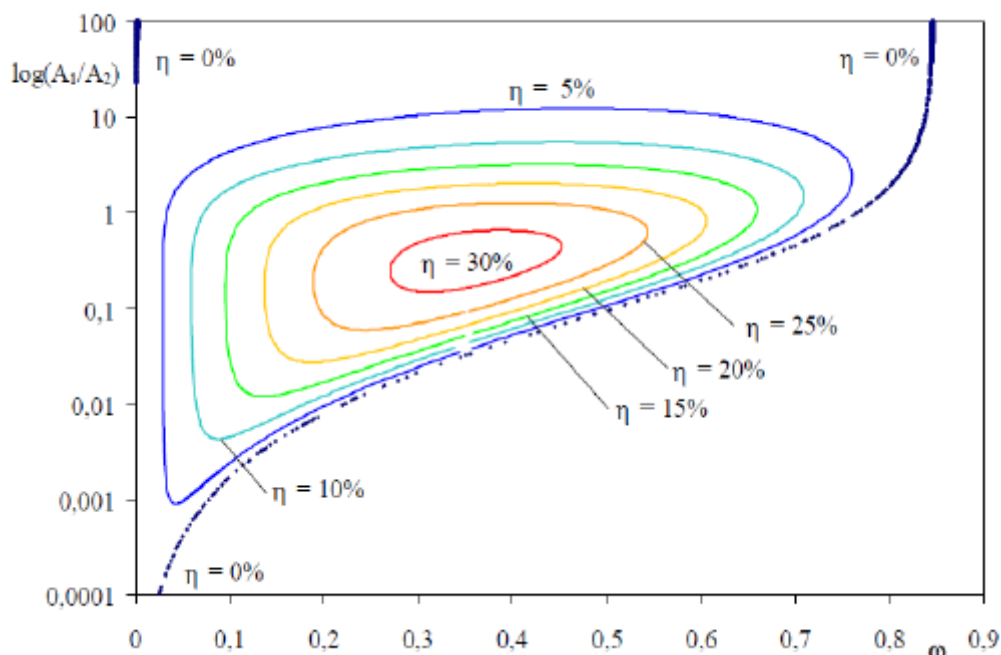
2.5 Účinnost ejektoru a pracovní charakteristika

Podílem výkonu dodaného hnacího a získaného hnaného prostředí lze získat celkovou účinnost ejektoru. Pomocí šikovních úprav lze napsat rovnici účinnosti ve tvaru

$$\eta = \frac{\dot{m}_2 h_{\text{kompresní}}}{\dot{m}_1 h_{\text{expanzní}}} = \Gamma \frac{\left(\frac{p_4}{p_{02}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{1 - \left(\frac{p_4}{p_{01}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \frac{1}{\theta} \quad (2.11)$$

Pracovní charakteristiku lze předpokládat jako podíl relativního protitlaku Π ku ejekčnímu poměru Γ . Relativní protitlak určíme ze vztahu

$$\Pi = \frac{p_4 - p_{02}}{p_{01} - p_{02}} \quad (2.12)$$



Obr. 2.3: Zobrazení účinnosti ejektoru v závislosti na poměru průřezů μ a poměru rychlosti ω [3]

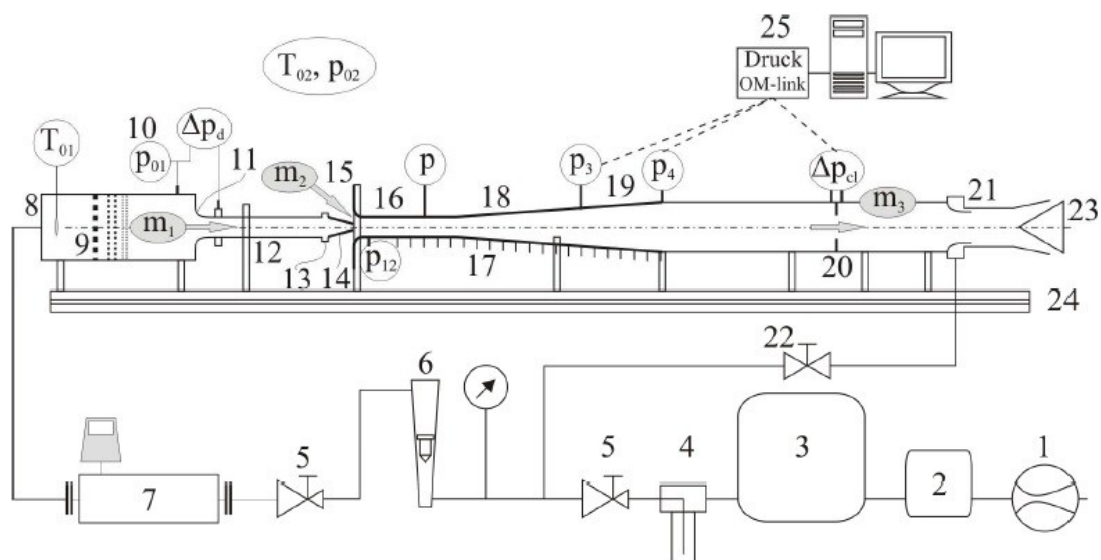
Na obr. 2.3 je zobrazováno rozložení účinnosti ejektoru v závislosti na poměrech rychlostí proudů ω a ploch trysek μ . Můžeme zde odečíst, že plocha s nejvyšším procentem účinnosti je velmi malá.

3 Experimenty

V následující části se pokusíme popsat charakteristické měřené vlastnosti, které souvisejí se zkoumáním podzvukového ejektoru.

3.1 Schéma měřící tratě

Na obr. 3.1 vidíme schéma aerodynamické měřící tratě. Vše začíná u šroubového kompresoru (1), který nasává a stlačuje okolní vzduch na tlakový vzduch, jenž postupuje do sušičky vzduchu (2), v níž se ochlazuje na $t \approx 0^\circ \text{C}$. Tato teplota přibližně odpovídá měrné vlhkosti hnacího proudu $x_1 = 3,5 \frac{g_v}{kg_{sv}}$. Dále v pořadí následují zásobníky (3) tlakového média o celkovém objemu 20 m^3 . Stlačený vzduch je dopravován do laboratoří, které jsou spravované katedrou, potrubím z vedlejší místnosti. Po vstupu proudu v potrubí do místnosti nejprve dojde k přefiltrování vzduchu ve filtrech (4), poté se redukuje tlak proudu dvěma ventily (5). Výsledného hmotnostního průtoku a tlaku hnacího proudu p_{01} dosáhneme plováчковým průtokoměrem (6), který je umístěn mezi redukčními ventily, po vstupu do uklidňovací komory (8) o rozměrech potrubí $200 \times 100 \text{ mm}$, jejíž součástí jsou uklidňovací síta s filtry (9) vyrobenými z netkané textilie. Dále obsahuje uklidňovací komora snímače klidové teploty a tlaku (10). Dále obsahuje uklidňovací komora snímače klidové teploty a tlaku (10).



Obr 3.1 Schéma měřené podzvukové tratě[8]; 1 - kompresor, 2 - sušička vzduchu, 3 - tlakové zásobníky, 4 - filtry, 5 - redukční ventily, 6 - rotametr, 7 - Coriolisův průtokoměr 8 - uklidňovací komora, 9 - uklidňovací síta, 10 - odběr klidového tlaku, 11 - měřicí dýza se snímačem, 12 - přívodní potrubí, 13 - držák hnací trysky, 14 - vyměnitelná hnací tryska, 15 - vstupní část směšovací komory - hnaná tryska, 16 - směšovací komora - válcová, 17 - měření statického tlaku, 18 - směšovací komora - divergentní, 19 - difuzor, 20 - měření tlaku na cloně, 21 - pomocný ejektor, 22 - redukční ventil, 23 - škrťací jehlan, 24 - konzola aerodynamické tratě [8]

Přes měřicí dýzu (11), přívodní potrubí (12) a držák trysky (13) se žene primární proud do vyměnitelné hnací trysky (14) o výtokovém průměru 14,9 mm. Na počáteční úrovni směšovací komory (15), mezi prostorem a zaoblenou částí směšovací komory, dochází ke vstupu hnaného proudu. Hnaný proud je definován klidovým tlakem p_{02} , klidovou teplotou T_{02} a měrnou vlhkostí x_2 . Je nasávaný přímo z okolí ejektoru v laboratoři, čímž je klidový tlak p_{02} roven atmosferickému tlaku p_{atm} . Po vstupní trysce je část směšovací komory válcová (16) o průměru 40 mm. Poté přechází směšovací komora (18) v rozšiřující se průřez. Na divergentní části komory jsou připojeny odběry statického tlaku (17). Do tří otvorů na směšovací komoře, které jsou opatřeny závitem, lze našroubovat traverzovací držák, do něhož je možné nainstalovat sondu pro termoanemometrické měření.

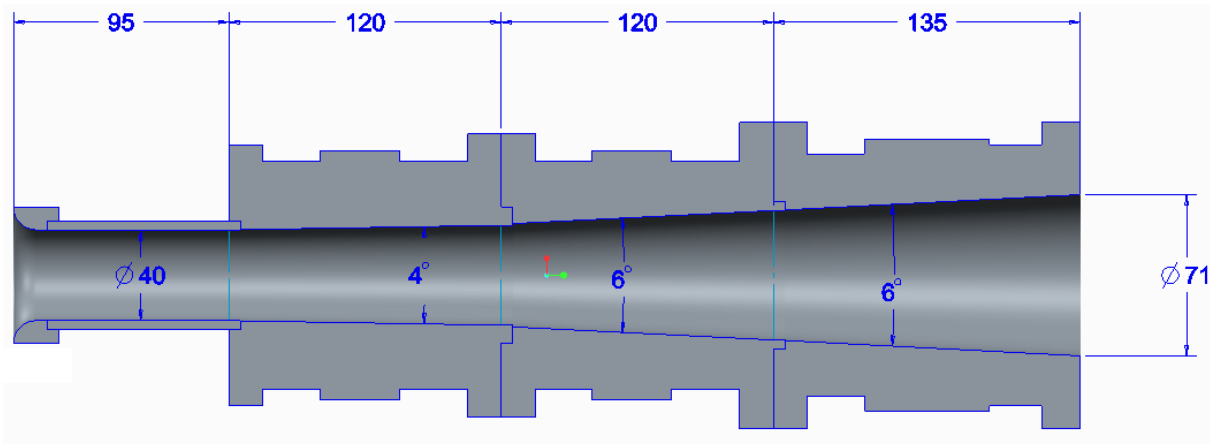
Následně proud prochází difuzorem (19), ve kterém jsou měřeny tlaky p_3 na začátku a na konci protitlak p_4 . Na cloně ve výtláčném potrubí lze měřit diferenční tlak Δp_{cl} (20). Z důvodu dosažení nulového či záporného protitlaku je na konci tratě připojen pomocný ejektor (21), který se snaží těchto parametrů dosáhnout za pomoci škrťacího ventilu (22). K dosažení co nejvyšších protitlaků je naopak využíván škrťací jehlan (23) na konci tratě. Celá experimentální aerodynamická trať je uložena na hliníkovém loži (24), které velmi jednoduše umožňuje rozebírání a sestavování všech důležitých komponentů.

Ke zkoumání proudících parametrů ve směšovací komoře je komora vyrobena z několika různých částí. Tyto kusy obsahují prvky sloužící k odběru statického tlaku (17) a otvory pro nainstalování traverzovače se sondou pro CTA měření rychlostních profilů. Dále lze nainstalovat za ústí do směšovací komory generátor syntetizovaného paprsku, který jsme měřili v podkapitole 3.5.

Pro mnoho výpočtů je potřeba si určit poměr trysek proudů.

$$\mu = \frac{S_1}{S_2} \quad (3.1)$$

Na obr. 3.2 lze vidět řez prostory směšovací komory a difuzoru. Počáteční průměr 40 mm se postupně zvyšuje až na 71 mm, což je výstupní průměr z difuzoru nebo také průměr výfukového potrubí. Divergentní komory jsou složeny ze tří duralových částí o různých velikostech rozšíření. V našem případě se jedná o kombinaci „4-6-6“.



Obr. 3.2 Řez prostory směšovací komory a difuzoru

3.2 Měření hmotnostních průtoků a účinností

Pro vyšetřování proudových procesů vně ejektoru je nutné znát charakteristiku vstupního proudu, ať už se jedná o hmotnostní průtok \dot{m}_1 , jeho klidový tlak p_{01} , nebo klidovou teplotu t_{01} . K určení průtočného množství byla využita norma dle citace Dvořáka [1] ČSN ISO 5167-1 a její změna, která popisuje dýzu, jejíž geometrie a rozměry jsou pevně definovány. Hmotnostní tok lze spočítat dle normy

$$\dot{m}_1 = \frac{C_d}{\sqrt{1-\mu_d^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d_d^2 \sqrt{2p_d \rho_1} \quad (3.2)$$

kde μ_d je poměr průměrů dýzy d_d a uklidňovací komory D_k , ε_1 expanzní součinitel počítaný ze statického tlaku před dýzou, p_d diferenční tlak na dýze, ρ_1 hustota tekutiny před dýzou a C_d součinitel průtoku. Empirické vztahy pro určení součinitelů ε_1 a C_d jsou uvedeny v citované normě. Nutné veličiny sloužící k výpočtu primárního hmotnostního průtoku a nejistoty měření jsou citovány v tabulce 3.1 podle Dvořáka [1]. Pro náš případ využíváme kruhové trysky $d = 19,2$ mm a primárního přetlaku $\Delta p_{01} = 1000$ Pa.

Z důvodu komplikovaného stanovení průtoku po vstupu do ejektoru byl zaveden výsledný tok na konci ejektoru. Za použití clonek s různými průměry dosáhneme poměrů, které rovněž odpovídají normě citované Dvořákem [1]. Za použití různých kombinací clonek lze dosáhnout větší škály měřených toků a protitlaků.

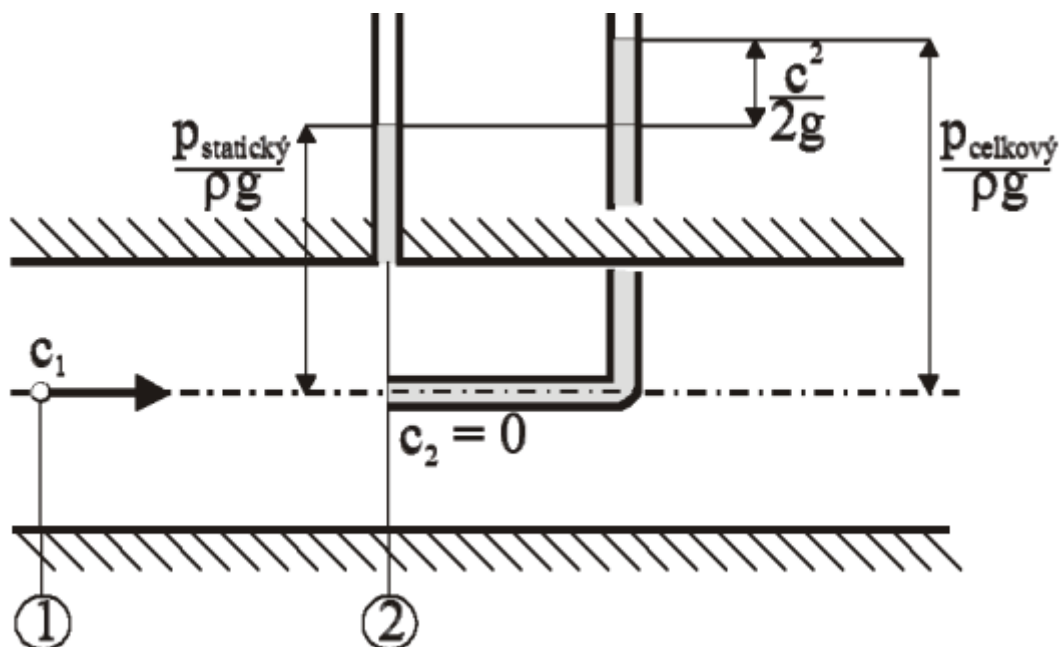
Hmotnostní tok na konci ejektoru dostaneme podobně jako ze vztahu (3.2)

$$\dot{m}_3 = \frac{C_{cl}}{\sqrt{1-\mu_{cl}^4}} \varepsilon_4 \frac{\pi}{4} d_{cl}^2 \sqrt{2\Delta p_{cl} \rho_4} \quad (3.3)$$

kde μ_{cl} je poměr průměrů clony d_{cl} a výstupního potrubí D_4 , který odpovídá průměru na konci difuzoru, ε_4 expanzní součinitel počítaný ze statického tlaku před clonou, Δp_{cl} diferenční tlak na cloně, ρ_4 hustota tekutiny před clonou a C_{cl} součinitel průtoku. Empirické vztahy pro určení součinitelů ε_4 a C_{cl} jsou uvedeny v citované normě. Nutné veličiny sloužící k výpočtu primárního hmotnostního průtoku a nejistoty měření jsou citovány v tabulce 3.2 podle Dvořáka [1].

3.3 Proměření statického tlaku ve směšovací komoře

Měření statického tlaku provádíme za pomoci ježka, který nám zjednoduší přepínání měření mezi otvory. Na povrchu směšovací komory a difuzoru jsou navrtány od sebe ve vzdálenosti 20 mm otvory, ze kterých odebíráme pomocí tlakových čidel statický tlak. Na obr. 3.2 lze vidět důvod vzniku statického tlaku. Statický tlak vzniká při proudění kapaliny. Celkový tlak je součtem statického a dynamického tlaku, a statický tlak není nijak ovlivňován rychlostí proudu.



Obr. 3.2: K vysvětlení statického tlaku [10]

3.4 Drátková anemometrie

Pro zkoumání rychlostí a její flukтуаční složky v jednom místě směšovací komory je na katedře KEZ využíváno invazivní metody CTA (Constant Temperature anemometry). Metodě měření slouží měřicí zařízení od dánské firmy Dantec.

Metoda je založena na konvektivním přenosu tepla z ohřívající se sondy do prostoru směšovací komory. Přestup tepla je dán vztahem (3.5), tedy závislostí rychlosti na teplotě proudu vzduchu. Díky využití velmi slabých drátkových sond a elektroniky se zpětnou vazbou lze měřit flukтуаční složky rychlosti o vysoké frekvenci. Elementárním prvkem měřícího obvodu je tenký drátek, který je nejčastěji vyroben z wolframu. Drátek je napnutý mezi vidlicemi sondy. Při průchodu elektrického proudu dochází ke generování Joulova tepla a sonda se žhaví. Podle Dančové [9], která pomocí Joulova zákona definovala teplo vytvářející se průchodem proudu drátkem o délce dx jako

$$d\dot{Q}_J = \frac{I^2 \kappa_{wire}}{A_{wire}} dx, \quad (3.4)$$

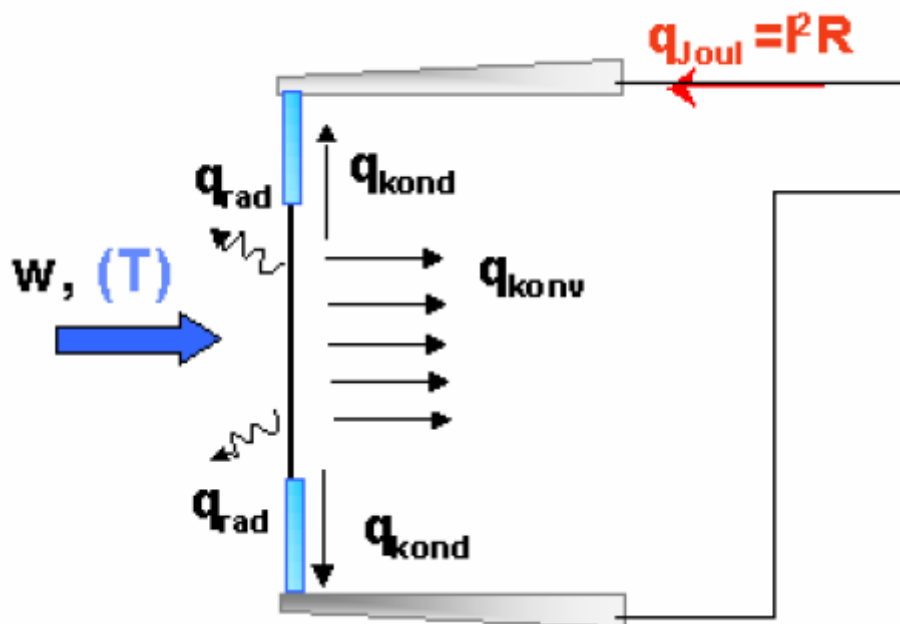
kde I je elektrický proud, κ_{wire} je měrný odpor drátku při teplotě T_{wire} a A_{wire} je průřez drátku. Dančová dále předpokládala, že při stacionárním případě musí být celkové vytvořené teplo $d\dot{Q}_J$ rovno všem teplům odvedeným do okolí. Tedy teple přenesenému konvekcí $d\dot{Q}_{konv}$, dále teple přenesenému kondukcí do držáku sondy $d\dot{Q}_{kond}$ a teple, které bylo vyzářeno do okolí sondy $d\dot{Q}_{rad}$

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{konv} + d\dot{Q}_{kond} + d\dot{Q}_{rad}. \quad (3.5)$$

Teplo, které se vyřazuje, nedosahuje takového množství, tudíž ho můžeme považovat za zanedbatelné. Teplo přenesené do držáku sondy můžeme uvažovat za nezávislé vůči parametrů proudění. Dančová [9] stanovila pomocí Newtonova zákona konvektivní teplo přenesené do proudu média jako

$$\dot{Q}_J = \pi d_{wire} \alpha l_{wire} (T_{wire} - T_t), \quad (3.6)$$

kde d_{wire} je průměr wolframového drátku, l_{wire} délka drátku, α je součinitel přestupu tepla, T_{wire} a T_t jsou teploty drátku, respektive teplota proudu tekutiny.



Obr. 3.3: K popisu přenosů tepel na žhaveném drátku[9]

Za předpokladu nekonečně dlouhého drátku můžeme zanedbat i přenos tepla do držáku a určit teplotní rovnováhu

$$I^2 R_{wire} = d_{wire} \alpha l_{wire} (T_{wire} - T_t), \quad (3.7)$$

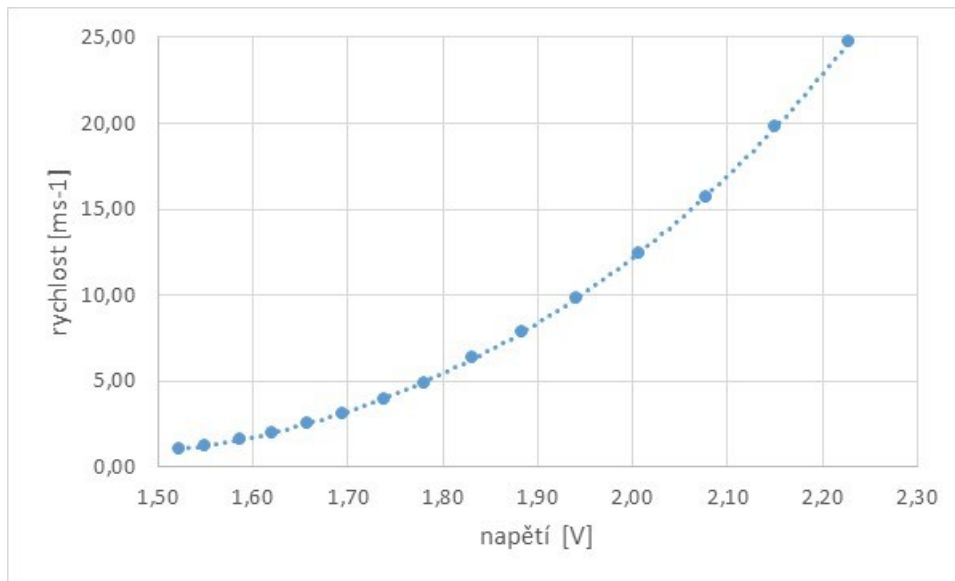
kde R_{wire} je odpor ohřátého drátku při teplotě T_{wire}

$$R_{wire} = \int_{l_{wire}} \frac{\kappa_{wire}}{A_{wire}} dx. \quad (3.8)$$

Vložení do rovnice (3.8) za odpor $R_{wire} = R_0(1 + \alpha_0(T_{wire} - T_0))$ a při existenci rovnice pro zjištění napětí $E_{wire} = IR_{wire}$ přejde vztah (3.7) do podoby

$$\frac{E_{wire}^2}{R_{wire}} = (A + BU^n)(T_{wire} - T_t), \quad (3.9)$$

kde hodnoty A, B, n jsou funkcemi získanými po kalibraci sondy na kalibrátoru Dantec 90N10. Funkce jsou závislé na průměru drátku, na parametrech materiálu drátku, či na vlastnostech okolního prostředí.



Obr. 3.4 : Kalibrační křivka sondy

Z kalibrace wolframové sondy Dantec 55P11 jsme získali kalibrační křivku zobrazenou na obr. 3.2. Dostali jsme polynom 4. stupně

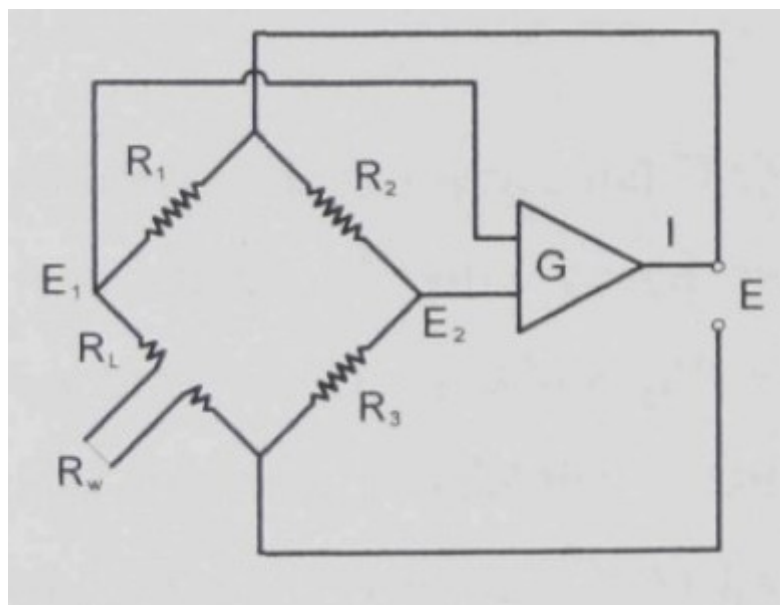
$$U = AE^0 + BE^1 + CE^2 + DE^3 + FE^4, \quad (3.10)$$

z kterého získáme rychlost proudícího vzduchu v závislosti na napětí na Wheatstonově můstku měřící sondy. Na obr. 3.3 je možné vidět hodnoty našich kalibračních konstant.

A	B	C	D	F
172.83	-355.09	276.56	-101.21	15.814

Obr. 3.5 Velikost kalibračních konstant

Kvůli udržení konstantní teploty na drátku sondy i při prudké změně rozsahu teploty proudícího média bývá sonda připojena do větve Wheatstonova můstku. Schéma Wheatstonova můstku můžeme vidět na obr. 3.4. Při změně teploty žhavého drátku dojde ke změně jeho odporu R_{wire} , čímž je zapříčiněn rozdíl napětí $E_2 - E_1$. Z tohoto důvodu je v obvodu zesilovač se zpětnou vazbou, jenž změní proud I, který vyrovná diferenci napětí a dojde k dorovnání teploty drátku T_{wire} .



Obr. 3.6. Schéma zapojení sondy v Wheatstoneově můstku [3]

Nejčastěji využívaný materiál k výrobě drátku CTA sondy je wolfram. Drátek je miniaturních rozměrů, jeho průměr dosahuje $5\mu\text{m}$ a délka 1,25 mm. Povrch drátku je povlakován platinou. Tato kombinace materiálů se vhodně doplňuje ve svých elektrických vlastnostech, v teplotní citlivosti i v mechanické pevnosti. Ovšem i tak bylo nutné dbát



Obr. 3.7: Sonda 55P11[4]

maximální bezpečnosti, aby nedošlo k destruktivnímu porušení sondy. Měření jsme prováděli přímou sondou od firmy Dantec označením 55P11 ukázané na obr. 3.5. Mezi dvěma rovnými vidlicemi je drátek natažen. Vidlice jsou vyrobeny z oceli, jsou dlouhé 5mm a jsou zapuštěny do keramického obalu o průměru 1,9 mm a délce 30 mm. Koncové konektory mají zlatý povlak z důvodu lepší elektrické vodivosti.

Sondou 55P11 lze pouze měřit jednu složku rychlosti, a to je pro popis proudění ve směšovací komoře postačující, protože vně komory zastává hlavní roli axiální složka rychlosti. Data získaná z měření převedeme na střední složku rychlosti v jednom bodě sítě dané vztahem

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i. \quad (3.11)$$

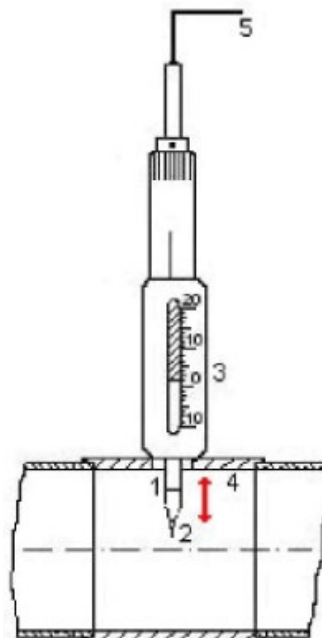
Další údaj sloužící k popisu je směrodatná odchylka, která podává informace o flukтуаční rychlosti proudu a je dána vztahem

$$U_{RSM} = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U)^2 \right)^{0,5}. \quad (3.12)$$

Podílem flukтуаční složky a střední hodnoty získáme po vynásobení 100 procentuální obsah intenzity turbulence v proudu.

$$I_T = \frac{U_{RSM}}{U} 100. \quad (3.12)$$

Metoda CTA je součástí režimu HWA (hot wire anemometry). Druhým možným režimem je CC s konstantním proudem při měření. Ovšem pro naše úlohy měření jsme využívali pouze CT. Principem metody je udržování konstantní teploty. Za předpokladu, že proud změní svoji rychlost, dojde ke změně teploty drátku a tudíž i ke změně difference napětí $E_2 - E_1$. Tento stav je přiveden do zesilovače, ve kterém dojde ke zvýšení protékajícího proudu a k opětovnému vyrovnání teploty na drátku. Oproti režimu CC, který je vhodný pro měření teploty a teplotní fluktuace, je režim CT užitečný i pro měření rychlosti proudu vzduchu a jeho flukтуаční složky.



Z důvodu proměření celého rychlostního profilu směšovací komory byl sestaven Obr. 3.8: Traverzovací držák s přímou sondou 55P11; 1 - držák sondy, 2 - přímá sonda 55P11, 3 - traverzovací mechanismus se stupnicí, 4 - směšovací komora, 5 - kabel k propojení s CTA anemometrem [4]

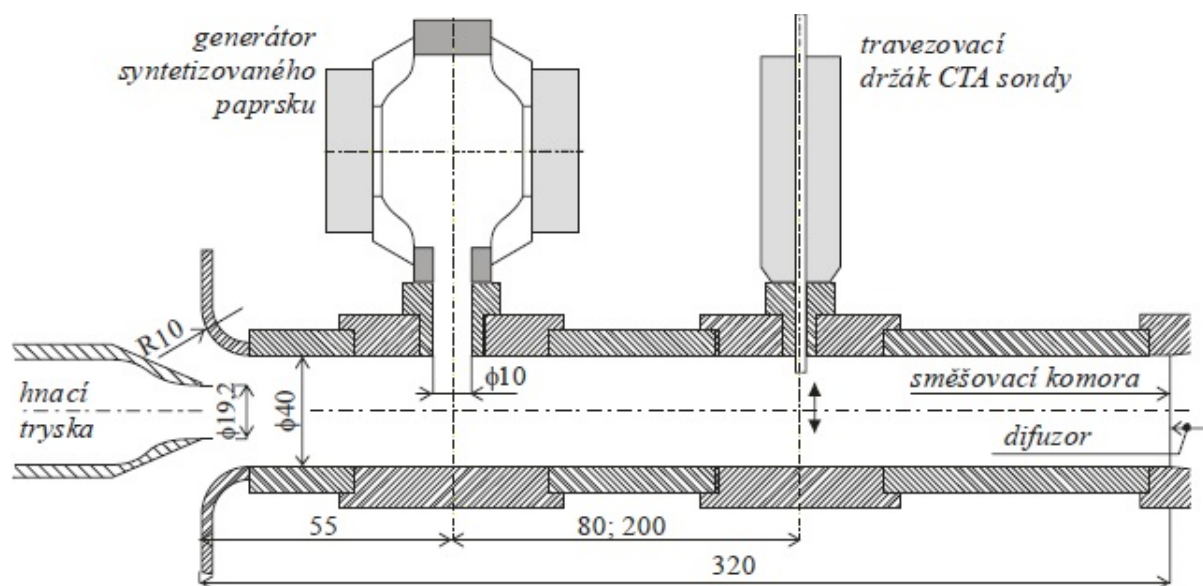
Z důvodu proměření celého rychlostního profilu směšovací komory byl sestrojen traverzovací držák sondy (obr. 3.6), který je opatřen traverzovacím závitem o rozteči 1 mm. Za pomoci otvoru, opatřeným závitem, je držák našroubován k směšovací komoře. Dále za pomoci traverzovacího šroubu je sonda zasouvána do vnitřku směšovací komory. Zde je nutné počínat si velmi opatrně z důvodu nepředvídatelné vzdálenosti druhého konce průřezu směšovací komory. Je žádoucí předejít jakékoliv deformaci sondy.

3.5 Měření rychlostních profilů ejektoru se syntetizovaným paprskem

Při měření s generátorem syntetizovaného paprsku (SP) jsme měli za úlohy proměřit rychlostní profily a zhodnotit vliv paprsku na proces ve směšovací komoře a difuzoru. Využili jsme jednoduchého zdroje syntetizovaného paprsku, který byl nainstalován na počátku směšovací komory, kde byl upnutý kolmo k ose. Předpokládá se, že syntetizovaný paprsek způsobí urychlení směšování. Na základě těchto teorií můžeme říci, že v důsledku zmenšení velikosti třecích ztrát dochází i ke zvýšení účinnosti ejektoru.

V práci Dvořáka [1] je popisována problematika směšování s SP. Směšování autor rozděluje na dvě části. První zmiňuje počáteční oblast směšování, v níž se smyková vrstva vymezuje tím, že smyková vrstva mezi hnacím a hnaným proudem nepřiléhá až ke stěně. V prvotní oblasti je změna hybnosti proudu malá, a proto se zde statický tlak mění pozvolně. V této části mluvíme o volném proudu. Z jeho výsledků optimalizace je zřejmé, že generátor SP je žádoucí připojit co nejbližší k odtokové hraně hnané trysky tak, aby měl co největší vliv na účinnost.

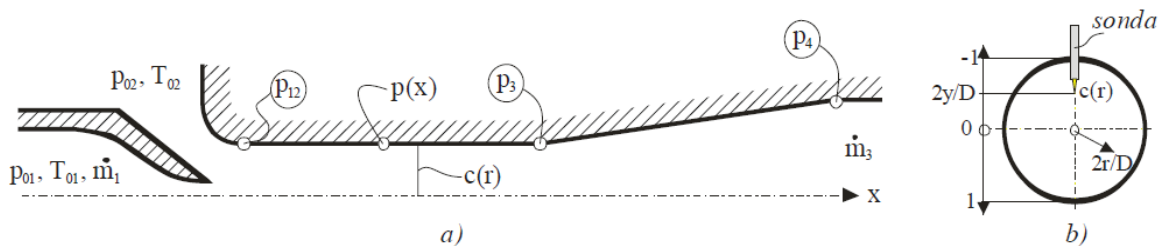
Zdroj SP je složen ze dvou reproduktorů (MONACOR SP-8/4SQ) s nominálními hodnotami 4Ω a $20 W_{max}$. Oba reproduktory mají stejné rozměrové i výkonové parametry. Generátor byl napájen sinusovým signálem s elektrickým výkonem $P = 0,071W$. Signál byl vytvořen zdrojem signálu Tektronix AFG3102 a zvětšen zesilovačem Omnitronic MPZ-180. Rychlostní profily jsme tentokrát měřili pro tři odběrová místa v režimu $\mu = 0.23$ a $\Gamma=0.983$ opět metodou CTA sondou 55P11. Generátor jsme nastavili na frekvenci 70 Hz a určili jsme, že zdroj odvádí největší výkon.



Obr. 3.9: Soustava ejektoru se zdrojem syntetizovaného paprsku [1]

4 Výsledky měření

V kapitole číslo 4 popisujeme experimentální výzkum naší práce. Zaznamenáváme charakteristické hodnoty ejektoru, konkrétně závislosti celkové účinnosti η , poměrného protitlaku π , expanzního tlaku p_{12} na ejekčním součiniteli Γ (poměr hmotnostních toků \dot{m}_2 ku \dot{m}_1). Dále proměřujeme průběh statického tlaku podél směšovací komory a difuzoru s úhlem rozšiřování 6° . Dostaneme se k měření rychlostních profilů a z nich plynoucích odpovídajících veličin. V neposlední řadě se snažíme popsat vliv generátorů syntetického paprsku na proudové procesy v ejektoru.

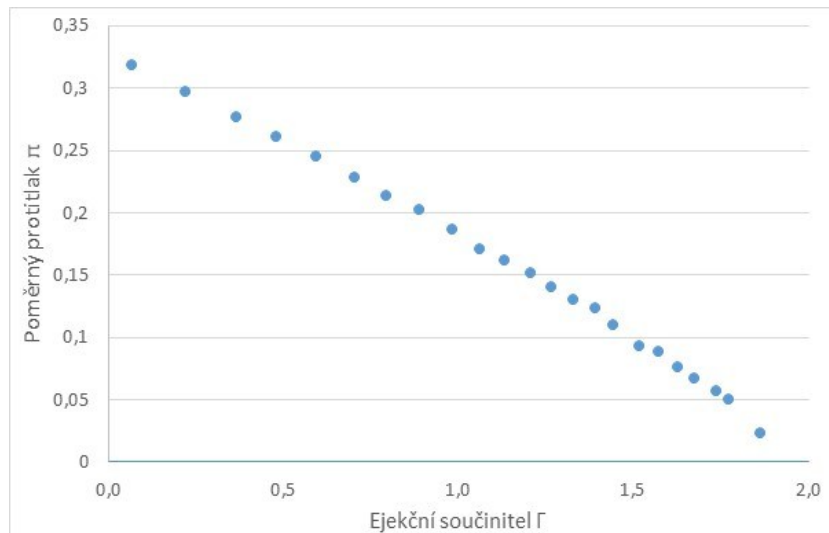


Obr. 4.1: a) Schéma určovaných veličin, b) schéma řezu vnitřkem směšovací komory s CTA sondou [1]

Ke všem zmíněným měření předpokládáme a nastavujeme konstantní přetlak hnacího proudu $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, ze staničního barometru odečítáme atmosférický tlak v místnosti odpovídající tlaku hnaného proudu Δp_{02} a dále ze snímače odečítáme expanzní tlak p_{12} za hnanou tryskou, za směšovací komorou odečítáme tlak p_3 a protitlak p_4 . Z naměřených dat lze vypočítat hmotnostní toky \dot{m}_1 a \dot{m}_3 a samotným odečtením obou toků lze dostat hmotnostní tok $\dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_1$. Nesmíme zapomenout, že na začátku všech měření odečítáme teploty hnacího a hnaného proudu t_{01} a t_{02} .

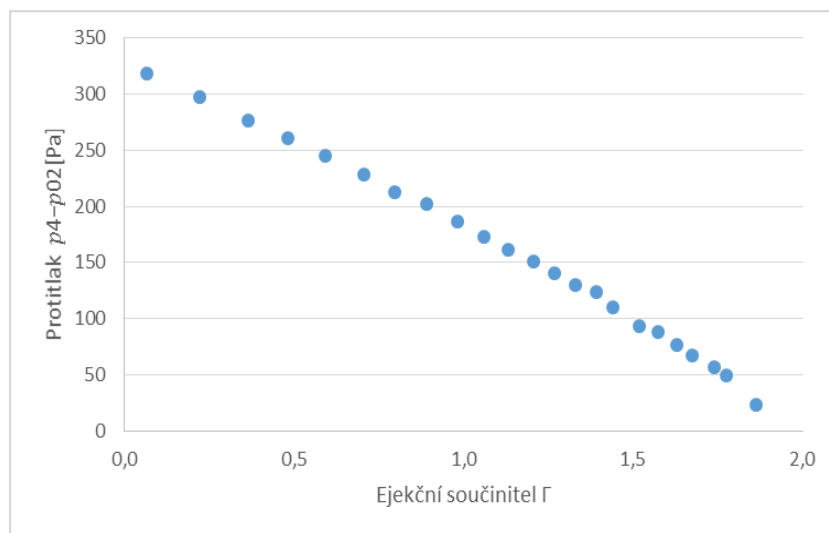
4.1 Měření charakteristických veličin ejektoru

Křivky odpovídající charakteristikám našeho ejektoru jsme měřili s průměrem hnací trysky $d = 19,2 \text{ mm}$ a průměrem vstupu do směšovací komory $D = 40 \text{ mm}$, z čehož plyne poměr průřezů $\mu = A_1/A_2 = 0,3$.



Obr. 4.2 : Naměřená charakteristika, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu=0,3$

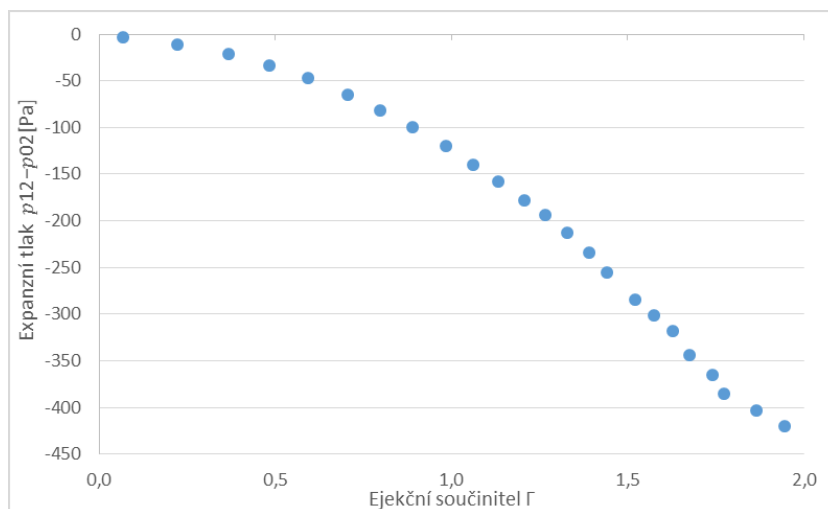
Na obr. 4.2 můžeme vidět charakteristiku ejektoru, závislost poměrného protitlaku na ejekčním poměru. Poměrný protitlak je dán vztahem 2.2. Největší hodnota poměrného protitlaku je dosažena při ejekčním poměru, kdy je hmotnostní tok \dot{m}_2 přibližně k nule. Naproti tomu však nejvyššího ejekčního poměru dosáhneme, když klesá poměrný protitlak k nule. Na obr. 4.3 je znázorněn průběh závislosti protitlaku p_4 na ejekčním poměru Γ . I zde můžeme vidět, že nejvyšší protitlak nastává při nejnižším ejekčním poměru a naopak. To může poskytovat analogické srovnání s charakteristikou na obr. 4.2.



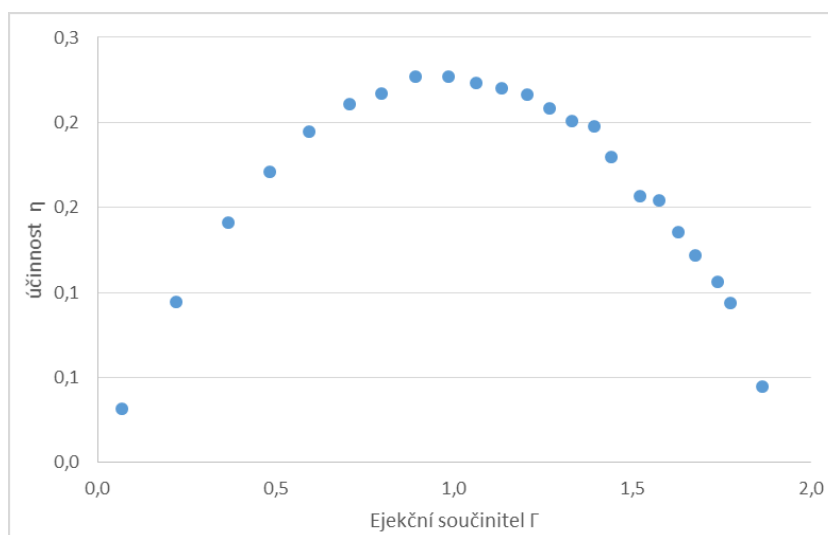
Obr. 4.3 : Naměřená charakteristika $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu=0,3$

Expanzní tlak v závislosti na ejekčním poměru je zobrazen na obr. 4.4. Expanzní tlak je měřen na počátku směšovací komory. Můžeme vidět, že se zvýšením ejekčního poměru nám klesá expanzní tlak do nejnižších záporných hodnot. Zde dosahujeme největších podtlaků.

Naopak nulového podtlaku dosáhneme při nejmenším hmotnostním průtoku \dot{m}_2 , při kterém je ejekční poměr také nulový.



Obr. 4.4 : Naměřená charakteristika $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$

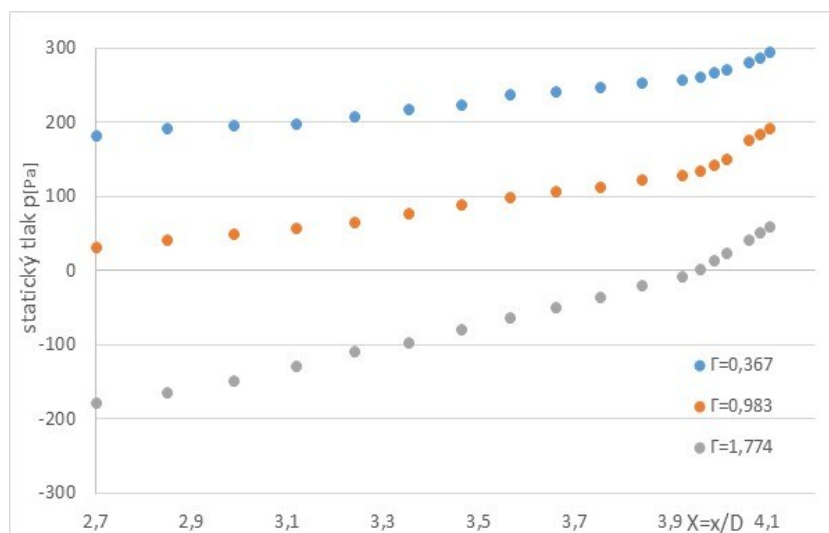


Obr. 4.5 : Naměřená charakteristika $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$

Jako nejvhodnější prostředek pro popis charakteristiky ejektoru je závislost účinnosti na ejekčním poměru. Charakteristiku udává obr. 4.4. Je možné vidět, že ejektor dosahuje nejvyšší účinnosti 0,25 při ejekčním poměru 0,97, kdy se hmotnostní toky proudu hnaného i hnacího přibližně rovnají. Z dosažených výsledků lze vyčíst, při jakých tlacích dochází k největší účinnosti celého ejektoru. Nejlepších výsledku dosáhneme při poměrném protitlaku o hodnotě 0,19, protitlaku p_4 o velikosti 187 Pa, expanzním tlaku p_{12} dávajícím podtlak 118 Pa a hmotnostních tocích $\dot{m}_1 = 0,0135 \text{ kg/s}$ $\dot{m}_2 = 0,013 \text{ kg/s}$.

4.2 Měření statického tlaku

Na obr. 4.5 je zobrazen průběh distribuce statického tlaku podél divergentní směšovací komory a difuzoru. Celkem se na ejektoru nachází 19 odběrových míst. První měřicí místo je od hnané trysky posunutá o 110 mm. Další odběrová místa jsou vždy posunuta o 20 mm od předchozího. Průběh statického tlaku je dalším způsobem, jak popsat proudové děje vně směšovací komory a difuzoru. Můžeme vidět, že rychlost nárůstu statického tlaku je závislá na ejekčním poměru.



Obr. 4.6: Průběh statického tlaku podél směšovací komory a difuzoru

4.3 Měření rychlostních profilů

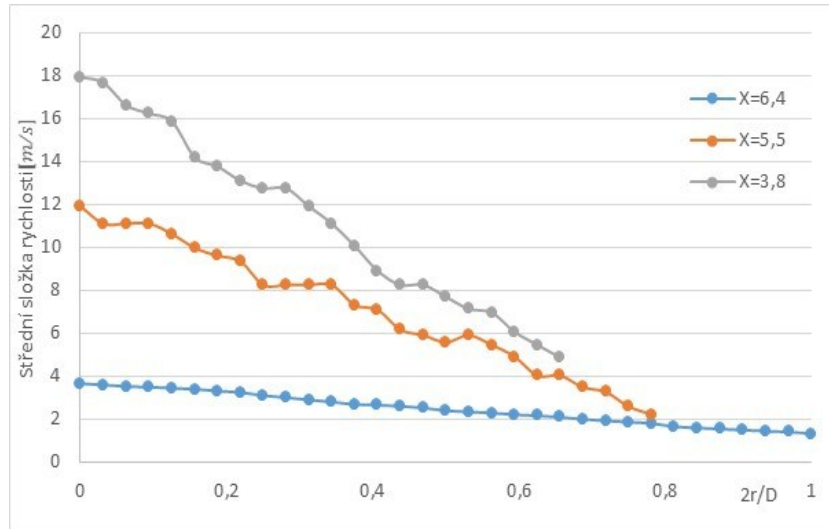
V našem případě experimentálního zkoumání jsme měřili tři různé režimy proudění, které jsme ověřovali ve třech místech směšovací komory a difuzoru. Vzdálenost otvoru od začátku směšovací komory je dána bezrozměrnou veličinou

$$X = \frac{x}{D},$$

kde x je vzdálenost otvoru, pro instalaci držáku s CTA sondou, od odtokové hrany hnací trysky a D je průměr měřené komory. Tedy jsme dostali hodnoty od 3,8 přes 5,5 až do 6,4.

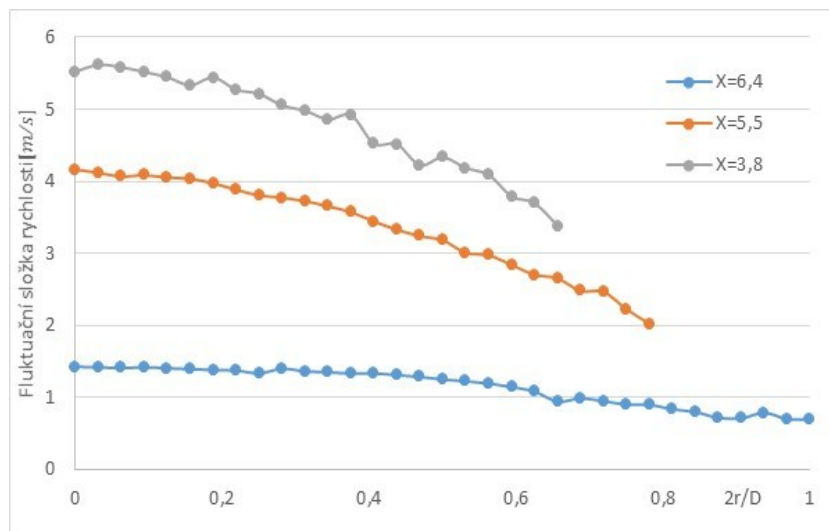
V každém bodě měření za předpokladu symetrického proudění jsme proměřili polovinu průřezu, což nám vykazuje radiální proměřená vzdálenost dána opět bezrozměrnou hodnotou $2r/D$. V prvotní fázi jsme dostali přímo syrová data z CTA sondy, které jsme museli za pomoci vztahu 3.11 převést na střední složku rychlosti. Dále jsme vztahem 3.12 dostali směrodatnou odchylku ze syrových dat, jenž udává flukтуаční složku rychlosti. V poslední řadě dostaneme

procentuální velikost intenzity turbulence při využití vztahu 3.13. Do grafů jsme zakreslovali složky středních rychlostí, které jsou uvedeny na svislé ose. Na vodorovné ose je poměr dvojnásobku odtraverzované vzdálenosti ku průměru komory. Pro názornost jsme využili při všech měření průměru $D = 64$ mm. Tudíž hodnotu 1 má největší průměr.



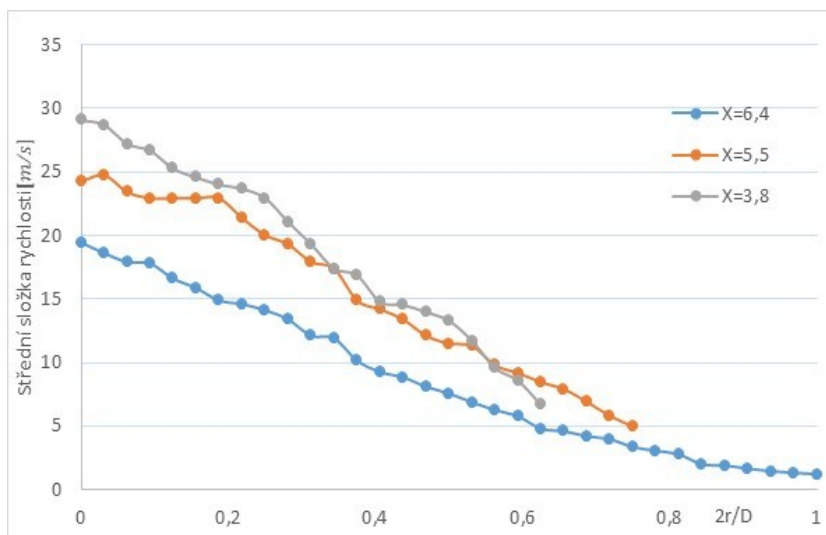
Obr. 4.7: Rychlostní profily-střední složka rychlosti pro $\Gamma = 0,367$ $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu=0,3$ $D=64$ mm

Z výsledků měření vyplývá, že nejrychlejší rychlostní profil nám vyšel pro místo měření o hodnotě $X=3,8$, ovšem je velmi nevyrovnaný, protože směrem do středu komory dosahuje střední složka rychlosti až 18 m/s. Naproti tomu směrem ke stěně dojdeme k nejnižší rychlosti až pod 5 m/s. Nejlépe vychází v ohledu vyrovnanosti profil, který byl měřen v nejbližším místě o hodnotě $X= 7,4$, kdy nejvyšší rychlost ve středu se pohybuje okolo 4 m/s a nejnižší u stěny klesá slabě pod 2 m/s. V místě měření o hodnotě $X=5,5$ se rychlostní profil už více vyrovnává, ovšem nedosahuje takové vyrovnanosti jako nejbližší profil.



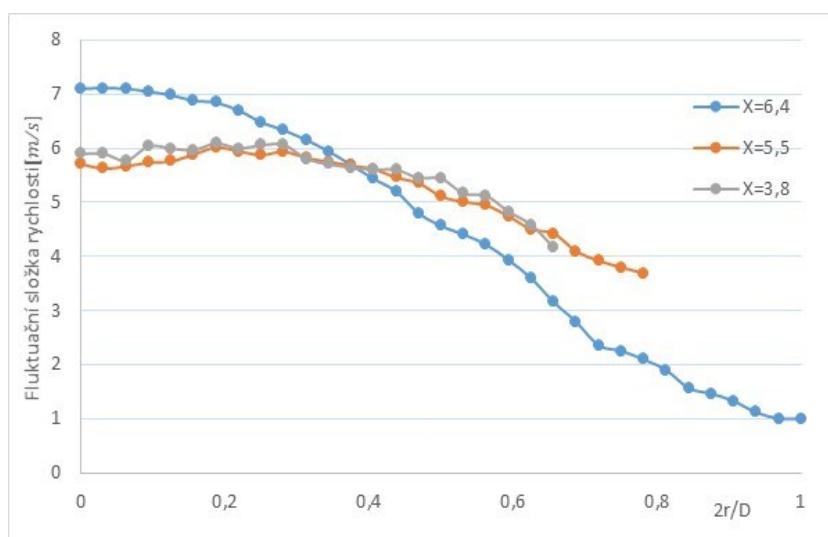
Obr. 4.8 Rychlostní profily – fluktuální složka rychlosti pro $\Gamma=0,367$, $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu=0,3$ $D=64$ mm

Na obr. 4.8 je opět viditelné, že nejvyšších fluktuací dosahujeme při měření prvního bodu popisujícího jeho polohu hodnotou $X=3,8$. Naměřená křivka má klesající tendenci z nejvyšší flukтуаční rychlosti 5,5 m/s na 3,5 m/s, která je u stěny komory. Nejlépe znovu vychází z výsledků profil naměřený pro místo o hodnotě $X=6,4$, kdy křivka klesá velmi mírně z rychlosti 1,5 m/s na 0,8 m/s. V prostředním místě měření dané $X=5,5$ flukтуаční rychlost klesne ze 4,2 m/s na 2 m/s, což vykazuje větší propad rychlostí než v místě $X=3,8$.



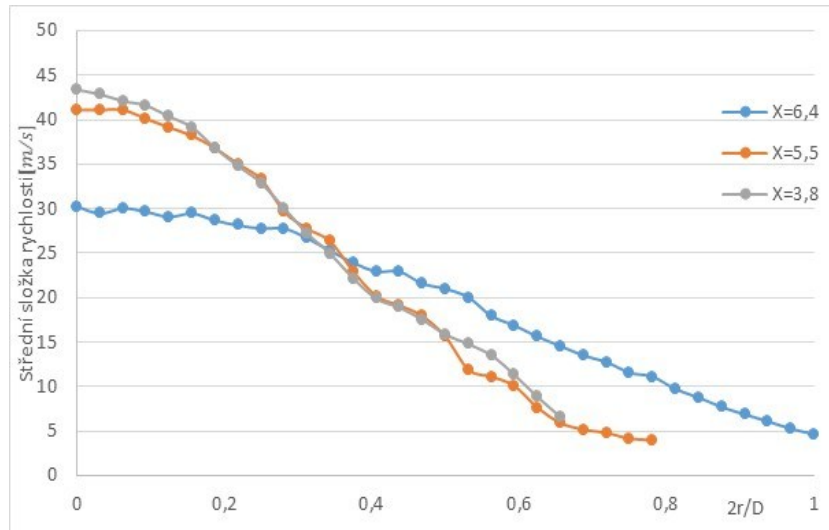
Obr. 4.9: Rychlostní profily-střední složka rychlosti pro $\Gamma=0,983$ $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu=0,3$ $D=64$ mm

Na obr. 4.9 jsou vidět rychlostní profily pro režim s ejekčním poměrem $\Gamma=0,983$. Můžeme konstatovat, že co se týče tvarů křivek mají všechny podobný trend klesání. Dosahujeme zde vyšších rychlostí než u minulého režimu. Ovšem profil v místě měření o hodnotě $X = 6,4$ nejeví takovou vyrovnanost jako profil na stejném místě minulého profilu.



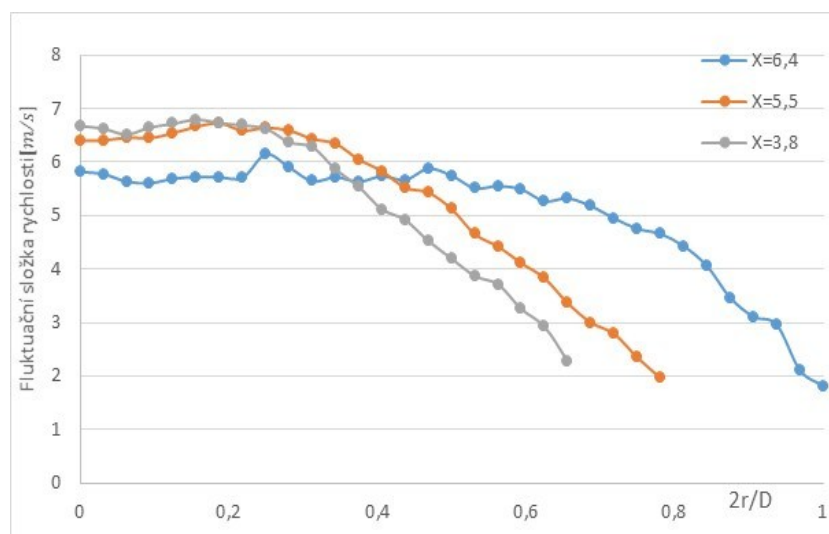
Obr. 4.10 Rychlostní profily – flukтуаční složka rychlosti pro $\Gamma=0,983$, $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu=0,3$ $D=64$ mm

Na obr. 4.10 je vidět, že profil flukтуаčních rychlostí je pro režim ejekčního poměru $\Gamma=0,983$ a pro místo měření dané $X = 3,8$ a $X = 5,5$ velmi podobný. Obě křivky se jeví jako velmi vyrovnané. Naproti tomu profil v místě $X = 6,4$ jeví velký propad fluktuací z 7m/s až na 1 m/s.



Obr. 4.11: Rychlostní profily-střední složka rychlosti pro $\Gamma=1,774$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu=0,3$ $D=64 \text{ mm}$

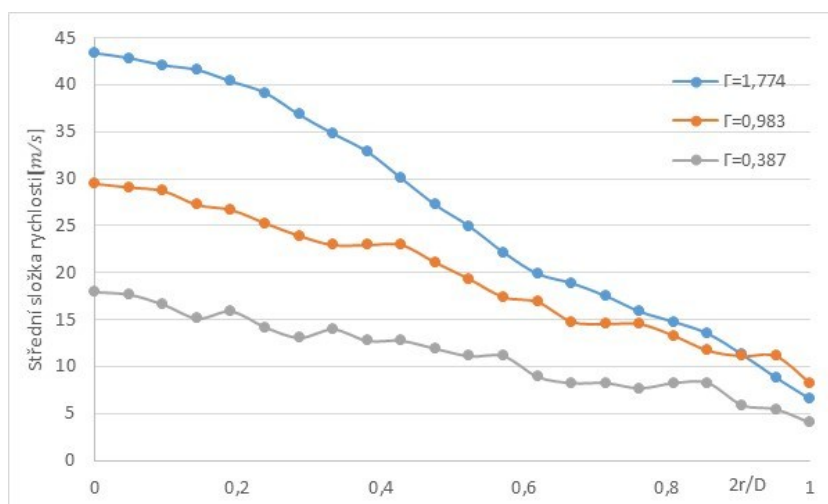
Ejekční poměr $\Gamma=1,774$ popisující poslední měřený režim se ze všech jeví jako nejrychlejší. Ve středu komory totiž změřené profily dosahují střední rychlosti hodnot pro místo $X = 6,4$ až 30 m/s nebo pro místo 5,5 přesahují 40 m/s, popřípadě místo $X = 3,8$ vykazuje nejvyšší naměřenou rychlost 43 m/s. Opět si jsou profily pro $X = 3,8$ a $X = 5,5$ velmi podobné, mají velmi podobný tvar a zhruba stejně rychle klesají. Nejméně klesající se zdá profil v místě $X = 6,4$, ovšem nedá se konstatovat jeho vyrovnanost.



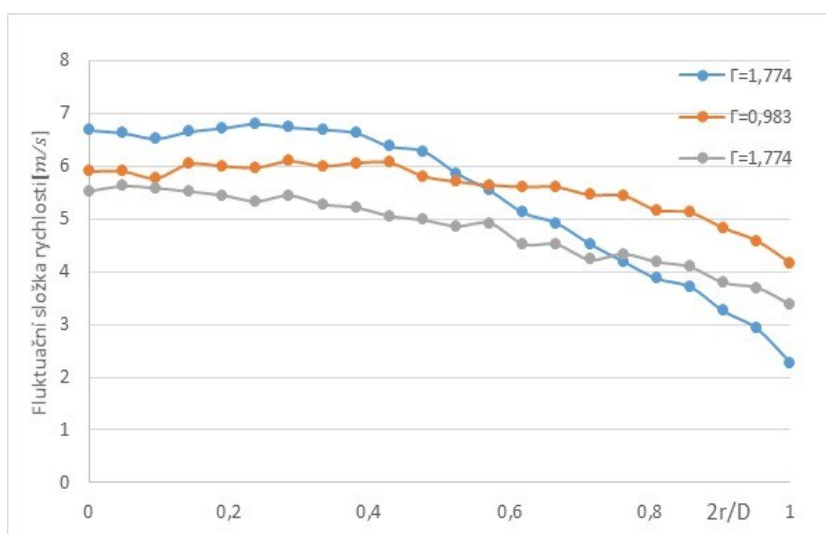
Obr. 4.12 Rychlostní profily – flukтуаční složka rychlosti pro $\Gamma=1,774$ $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu=0,3$ $D=64 \text{ mm}$

Obr. 4.12 ukazuje rychlostní profily pomocí fluktuačních rychlostí. Pro měřicí místo $X = 6,4$ je vidět profil, který je zprvu velmi vyrovnaný, avšak od hodnoty $2r/D \approx 0,6$ nastává klesání fluktuační rychlosti až pod 2 m/s u stěny komory. Podobný trend křivek lze vyčíst i pro profily v místech $X = 5,5$ a $X = 3,8$, kdy se zprvu rychlosti jeví vyrovnaně, avšak po přiblížení se ze středu více ke stěně, kdy $2r/D \approx 0,6$, začíná strmější klesání.

V minulé části kapitoly jsme porovnali rychlostní profily naměřené v různých místech našich zkoumaných komor ejektoru při stejném ejekčním poměru. Porovnání jsme provedli pro všechny tři režimy. Nyní si porovnáme rychlostní profily na jednom měřicím místě pro všechny režimy. Opět porovnání provedeme pro všechna tři měřicí místa.



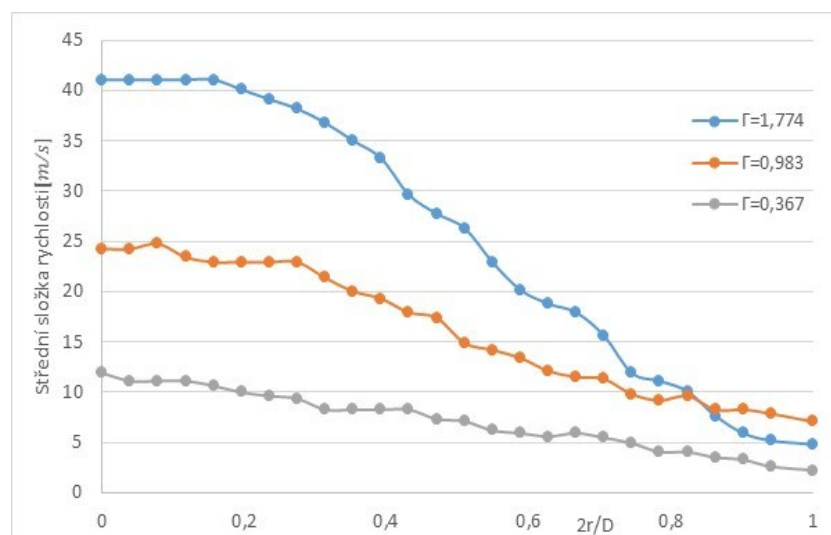
Obr. 4.13: Rychlostní profily-střední složka rychlosti $X = 3,8$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$, $D = 42 \text{ mm}$



Obr. 4.14: Rychlostní profily-fluktuační složka rychlosti $X = 3,8$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$, $D = 42 \text{ mm}$

Na obr. 4. 13 vidíme profil střední rychlosti v místě v poměrné vzdálenosti $X = 3,8$. Nejvyššího rychlostního profilu dosahuje režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 1,774$. Ten se neprojevuje jako vyrovnaný. Křivka velmi rychle klesá z nejvyšší střední rychlosti 44 m/s na 7 m/s. Zajímavostí ovšem je, že režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,983$ má vyšší rychlost u stěny komory zhruba o 1 m/s. Tento profil se jeví již vyrovnanější. Jako nejnižší se ukazuje profil režimu s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,367$, kdy největší rychlosti dosahujeme ve středu komory. Tento profil můžeme označit jako velmi vyrovnaný.

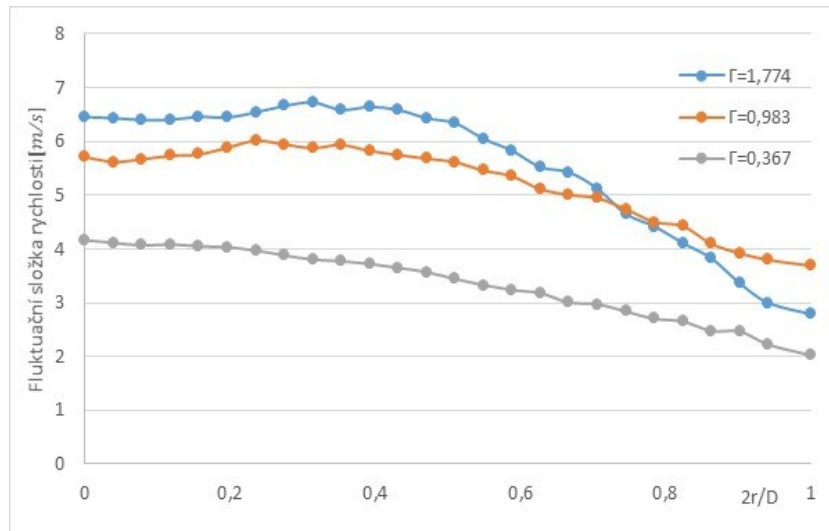
Profily z flukтуаčních rychlostí na obr. 4.15 zprvu jeví podobnou vlastnost. Od středu komory jsou vždy poměrně konstantní. Avšak po přiblížení ke stěně komory nastává klesání profilu. Režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 1,774$ má profil do vzdálenosti $2r/D \approx 0,4$ velmi vyrovnaný. Poté přichází velký pokles rychlostí, což naznačuje, že se tento režim jeví jako velmi nevyrovnaný. Nejlépe se ukazuje v tomto problému profil pro režim $\Gamma = 0,983$, kdy se do hodnoty vzdálenosti $2r/D \approx 0,55$ flukтуаční rychlost pohybuje s minimální změnou okolo hodnoty 6 m/s. Poté dochází k mírnému sestupu rychlostí. Režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,367$ můžeme popsat podobně, také vykazuje velmi dobrou vyrovnanost, avšak jeho propad rychlostí ze středu ke stěně komory je 2 m/s.



Obr. 4.15: Rychlostní profily - střední složka rychlosti $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3 \text{ D} = 51 \text{ mm}$

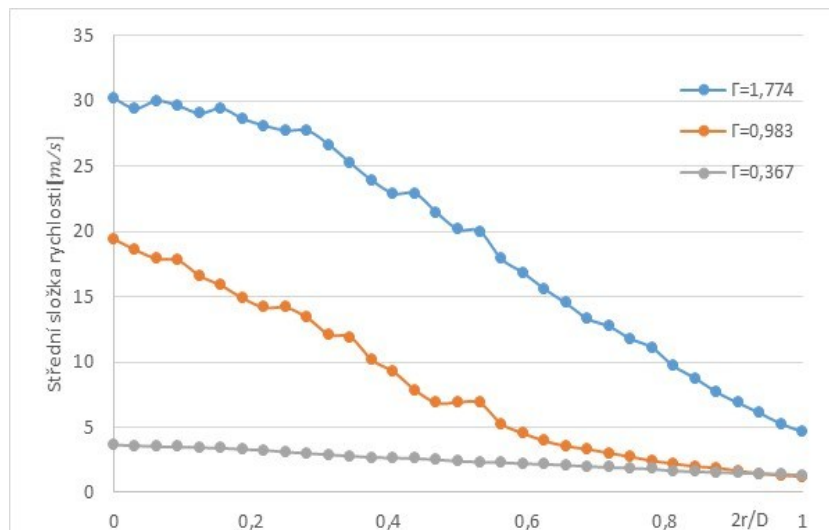
Jako další porovnáme režimy v místě $X = 5,5$. Na obr. 4.15 je vidět nejrychlejší profil, který je přiřazen k režimu $\Gamma = 1,774$. Poblíž středu vykazuje do vzdálenosti $2r/D \approx 0,2$ vyrovnaný profil, avšak poté přichází velmi prudké klesání. Nejmenších hodnot středních rychlostí dosahuje profil daný režimem $\Gamma = 0,367$. Trend klesání křivky profilu je velmi pomalý.

Profil pro režim $\Gamma = 0,983$ klesá také mírně. Za zmínku stojí, že opět u stěny směšovací komory je střední rychlost nejvyšší pro režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,983$.



Obr. 4.16: Rychlostní profily-fluktuuační složka rychlosti $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 51 \text{ mm}$

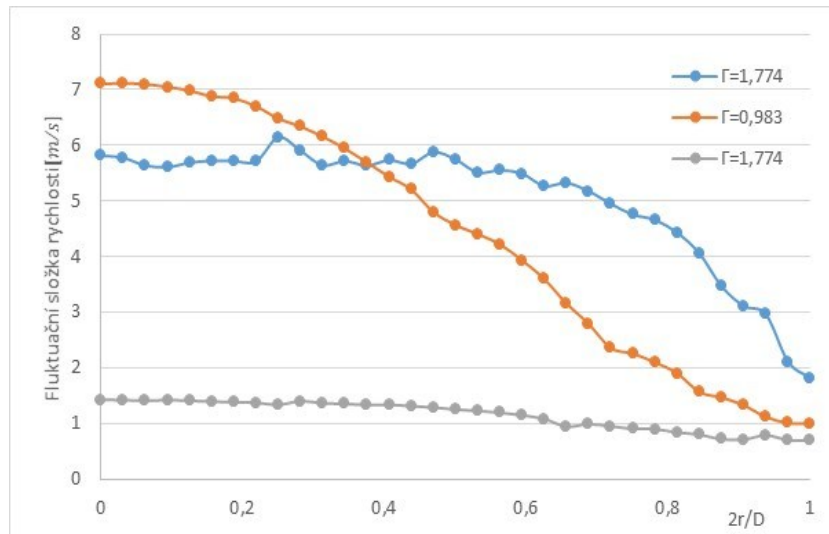
Na Obr. 4.16 je vidět poměrně vyrovnaný profil režimu $\Gamma = 0,367$. Křivka profilu fluktuuačních rychlostí klesá velmi pozvolna. Další dva profily režimů pro $\Gamma = 1,774$ a $\Gamma = 0,983$ sice vykazují směrem od středu komory do $2r/D \approx 0,4$ minimální změny svých fluktuuačních rychlostí, avšak po překonání tohoto bodu začíná profil klesat. Pro režim $\Gamma = 1,774$ je klesání významně větší.



Obr. 4.17: Rychlostní profily-střední složka rychlosti $X = 6,4$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 64 \text{ mm}$

Na obr. 4.17 lze vidět profily pro místo, které je nejdále od odtokové hrany, což popisuje poměrná souřadnice $X = 6,4$. Minimální změny středních rychlostí vykazuje režim $\Gamma = 0,367$, ve kterém od středu ke stěně změnila rychlost přibližně o 1,5 m/s. Nejvýraznější pokles rychlostí ukazuje režim pro $\Gamma = 1,774$, v němž podél průřezu komory se rychlost změní o 25 m/s.

I pro prostřední měřený profil, kdy je $\Gamma = 0,983$, vidíme velmi výrazné klesání. Ovšem po přiblížení ke stěně komory se profil více vyrovnává.

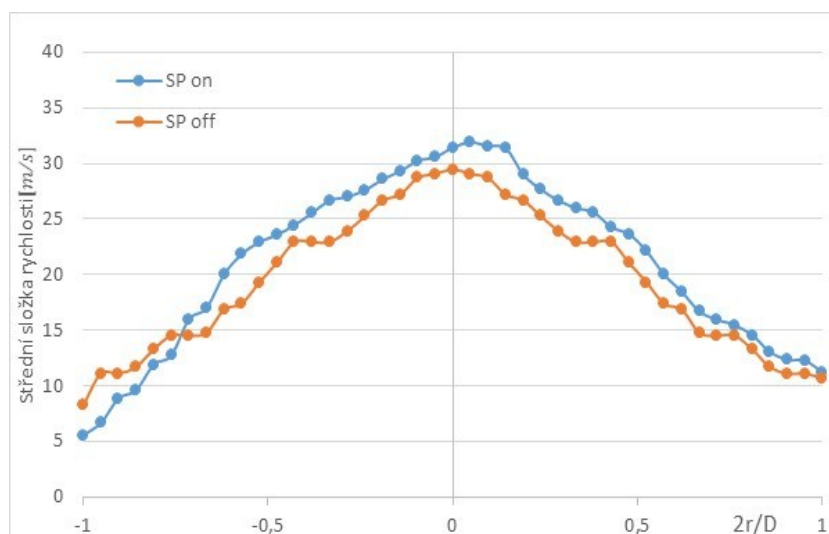


Obr. 4.18: Rychlostní profily-fluktuuační složka rychlost $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 51 \text{ mm}$

Jako u profilu ze středních rychlostí, tak i pro fluktuuační rychlosti, se profil pro režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,367$ jeví jako nejvyrovnanější ze tří měřených režimů. I režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 1,774$ se jeví velmi vyrovnaně, avšak blíže ke stěně komory nastává klesání křivky. Největší klesající tendenci má křivka profilu pro prostřední režim s ejekčním poměrem $\Gamma = 1,774$.

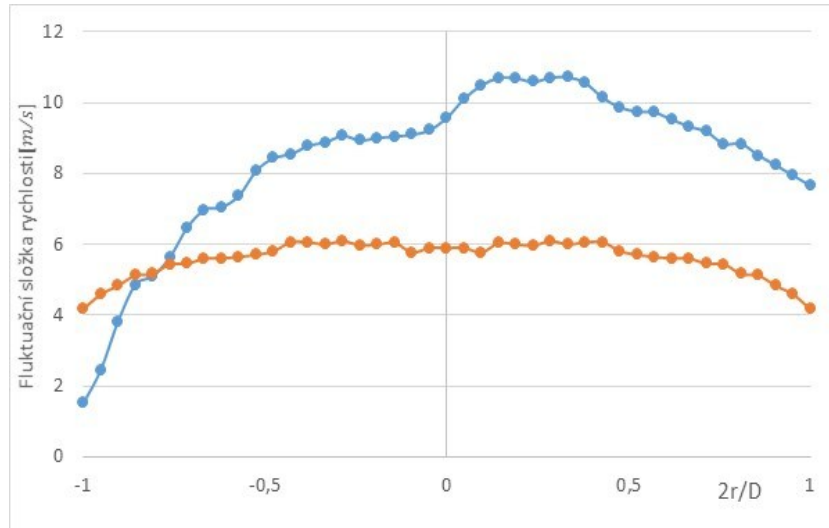
4.4 Využití syntetizovaného paprsku v ejektoru

Při posledním měření jsme se snažili popsat vliv generátoru syntetického paprsku na proudění ve směšovací komoře a difuzoru v našem ejektoru. Využili jsme zde pouze jednoho



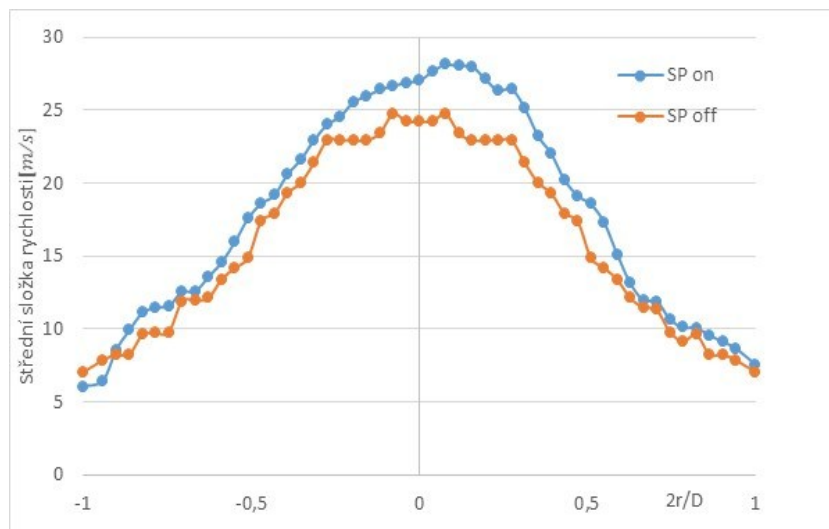
Obr. 4.19: Rychlostní profily-střední složka rychlost $X = 3,8$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 42 \text{ mm}$

režimu s ejekčním poměrem $\Gamma = 0,983$, který jsme proměřili na všech měřicích místech. Na obr. 4.19 můžeme vidět rychlostní profil středních rychlostí, kdy modrá křivka udává profil při zaplém generátoru SP. Pro všechna měření byl elektrický výkon $P = 0,071$ W a nominální frekvence byla nastavena na 70 Hz. Je vidět jasně rozdílný průběh profilu se zaplým zdrojem oproti vypnutém, avšak nikdy rozdíl mezi dvěma profily nebyl více než 14%.



Obr. 4.20: Rychlostní profily-fluktuuační složka rychlosti $X = 3,8$, $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu = 0,3$ $D = 42$ mm

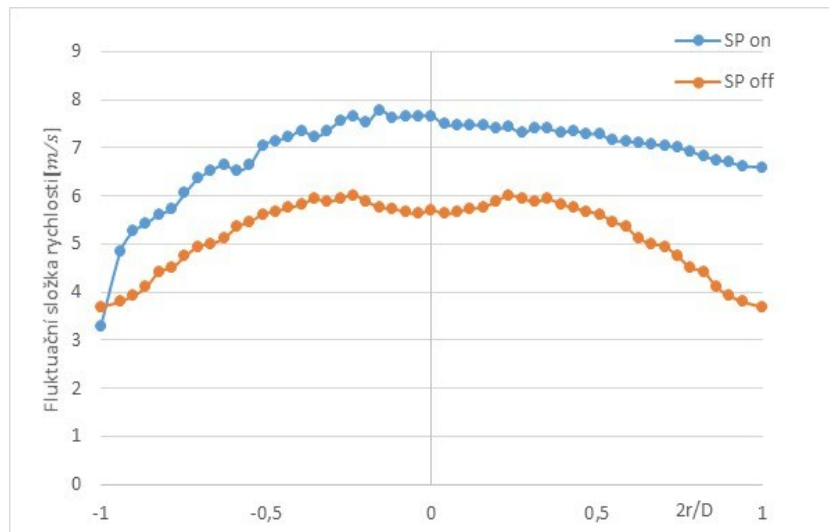
U rychlostních profilů z fluktuuačních rychlostí na obr. 4.20 je vidět vcelku významná odlišnost obou křivek. Profil při vypnutém generátoru je, jak jsme výše již popsali, poměrně vyrovnaný. Naopak při zaplém generátoru je velmi nestálý a jistě je vidět, že vrcholy obou profilů středních i fluktuuačních složek rychlostí při zaplém generátoru neleží ve středu komory.



Obr. 4.21: Rychlostní profily-střední složka rychlost $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000$ Pa, $\mu = 0,3$ $D = 51$ mm

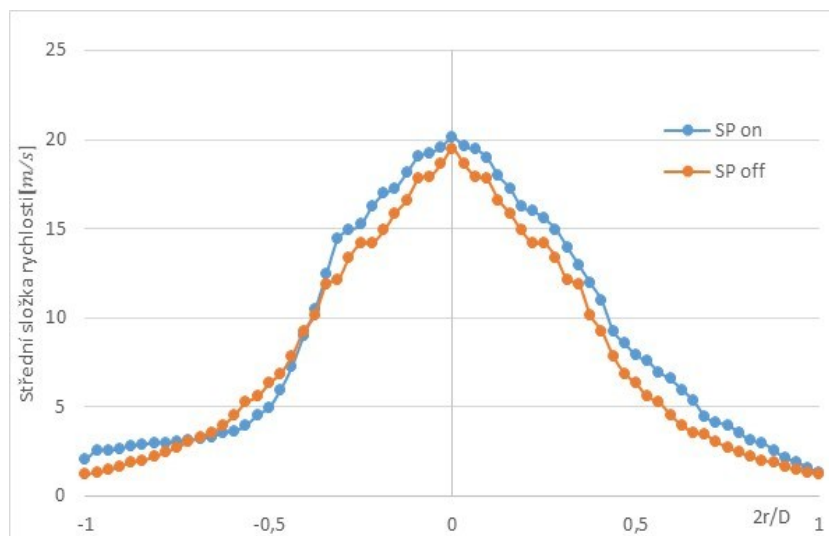
Na obr. 4.21 je vidět poměrně velká odlišnost profilů v místě $2r/D \approx 0,2$, kdy se rozdíl blížil až 17 %. Ovšem vždy směrem ke stěnám komory není rozdíl mezi profilem při zapnutém

a vypnutém zdroji SP není vyšší než 8%. Opět můžeme vidět, že vrcholy profilů flukтуаčních i středních při zapnutém generátoru neleží na středu komory, ale jsou posunuté mimo.



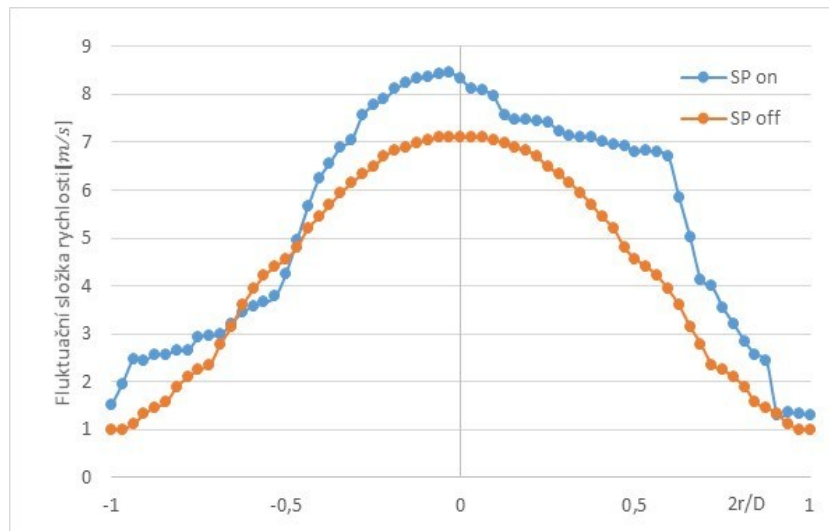
Obr. 4.22: Rychlostní profily-flukтуаční složka rychlosti $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 51 \text{ mm}$

Obr. 4.22 opět poukazuje na syntetický paprsek, který velmi ovlivňuje flukтуаční rychlostní profil. Při nejvyšších rozdílech dosahuje profil i zvýšení o 35%.



Obr. 4.23: Rychlostní profily-střední složka rychlosti $X = 6,4$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 64 \text{ mm}$

Největší shody dosahujeme při měření rychlostních profilů v místě $X = 6,4$, jak je vidět na obr. 4.23. Opět velmi nestálý se jeví profil při zaplém zdroji na obr. 4.24.



Obr. 4.22: Rychlostní profily-fluktuuační složka rychlosti $X = 5,5$, $\Delta p_{01} = 1000 \text{ Pa}$, $\mu = 0,3$ $D = 51 \text{ mm}$

5 Závěr

V první části naší práce jsme se seznámili s nejdůležitějšími částmi podzvukového ejektoru. Dále jsme se pokusili obeznámit s proudovými procesy od tlakové nádrže až po škrťací ventil. Lehce jsme nastínili možné aplikace ejektoru v průmyslu. Jednalo se o podtlakové hlavice, které jsou velmi využívány pro sklářský průmysl. Ve velké míře se setkáme s využitím ejektoru také v hasičském odvětví. Jako poslední byl jmenován obor, v dnešní době již méně využívaný, chlazení spalovacího motoru, které je například vidět u vozu Tatra 603.

Ve druhé kapitole jsme nahlédli do teorie. Popsali jsme jednorozměrnou analytickou metodu výzkumu. Dále jsme přiblížili proudění v hnací a hnané trysce. Popsali jsme také směšovací procesy a proudění v difuzoru. V poslední části kapitoly jsme se seznámili s celkovou účinností ejektoru a s charakteristikami popisující fungování ejektoru.

S experimenty jsme se obeznámili v kapitole třetí. Nejprve jsme ukázali schéma měřící experimentální tratě. Poté jsme vylíčili měření hmotnostních toků pomocí tlaků na dýze a na cloně. Vysvětlili jsme měření účinnosti a charakteristik ejektoru. Proměřili jsme statický tlak v komorách směšovací komory a difuzoru. Hlavní náplní naší práce bylo proměření rychlostních a turbulentních profilů pomocí metody CTA. Popsali jsme si měřící zařízení této metody. Dále jsme se zaměřili na druh i materiál sondy, elektrické zapojení sondy a také na parametry, které jsou pro nás nejlépe popisující kýžene profily. V poslední části třetí kapitoly jsme popsali připojení zdroje SP do proudění ejektoru.

V předposlední v kapitole jsme shrnuli všechny naměřené hodnoty. Získali jsme průběh závislosti účinnosti na ejekečním poměru. Stanovili jsme nejlepší účinnost o velikosti 0,25 při ejekečním poměru 0,97. Zjistili jsme, že poměrný protitlak Π i protitlak p_4 je nejvyšší při nejmenších dosažitelných ejekečních poměrech. Při zvýšení ejekečního poměru dochází k poklesu obou protitlaků. Dále jsme vyhodnotili také závislost expanzního tlaku na ejekečním poměru, z čehož můžeme soudit, že nejvyššího podtlaku dosahujeme při nejvyšším ejekečním poměru. Po proměření rychlostních a turbulentních profilů jsme ukázali, že nejvyšších profilů bylo dosahováno při režimu $\Gamma = 1,774$. Naopak nejnižších logicky u režimu s ejekečním poměrem $\Gamma = 0,367$. Při užití zdroje SP jsme dostali rychlostní a turbulentní profily při zapnutém a vypnutém generátoru. Byl vždy vidět vcelku značný rozdíl obou profilu, oproti práci Dvořáka [1], který udává minimální rozdíly. To vede k myšlence, že v budoucnu by mohla být více prozkoumána problematika užití SP ve směšovací komoře a difuzoru. Prozkoumat by jsme mohli rychlostní profily pro různé energetické nastavení generátoru SP. Dále by se mohlo jít směrem, který by vylepšil konstrukce různých součástí měřící tratě, ať už se jedná o zlepšení uchycení škrťacího kužele nebo lepší utěsnění součástí.

Seznam použité literatury

- [1] **Dvořák, Václav.** *Výzkum a optimalizace proudění v ejektorech.* Liberec, 2010. 130 s. Habilitační práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci
- [2] **Kasýk, Jiří.** *Měření vzduchového ejektoru s divergentní směšovací komorou.* Liberec, 2014. 41 s. Bakalářská práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [3] **Fridrich, Jiří.** *Proudění ve vzduchových ejektorech.* Liberec, 2006. 78 s. Diplomová práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [4] **Ščirban, Petr.** *Vliv tvaru hnací trysky na proudění ve vzduchových ejektorech* Liberec, 2007.80 s. Diplomová práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [5] **Zejska, Vojtěch.** *Ejektory a jejich průmyslové využití.* Brno, 2013. 57 s. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vondál, Ph.D.
- [6] **Jelínek, Tomáš.** *Podtlakové úchopné hlavice.* Brno 2010. 6 s. Semestrální práce. Fakulta elektrotechniky a informačních technologií. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] **Archalous Jakub.** *Zvýšení sací schopnosti hasičské stříkačky.* Brno, 2011. 68 s. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí diplomová práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [8] **Dvořák, Václav.** *Air to air ejector with divergent mixing chambers.* Liberec, 2006. 6 s. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci.
- [9] **Dančová, Petra.** *Studie proudění typu „Syntetic jet“.* Liberec 2005. 89 s. Diplomová práce. Fakulta strojní. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
- [8] **Dvořák, Václav.** *Přednáška 5 – Příklady užití Bernoulliho a kontinuity.* [kez.tul.cz](http://www.kez.tul.cz) [online]. © 2011-2013. Dostupné z : <http://www.kez.tul.cz/cs/stahni-soubor/915?hash=v4ijfodgiaagvlksgdxbr5p8232dwl>