

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**Vliv tvaru a pozice trysky na provozní
parametry vodou hnaného ejektoru**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Bc. JAKUB ČECH

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čech** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **491491**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv tvaru a pozice trysky na provozní parametry vodou hnaného ejektoru

Název diplomové práce anglicky:

Effect of nozzle shape and position on operating parameters of a water-driven ejector

Pokyny pro vypracování:

V rámci vlastní rešerše popište obvyklá řešení tvaru a pozice trysky používané v ejektorech hnaných kapalným médiem. Pro vybrané varianty tvarů trysek zpracujte numerické simulace, jejichž cílem bude popsat, jaký vliv má úprava tvaru trysky a jejího polohování na provozní parametry ejektoru. Správnost výsledků numerických simulací se pokuste ověřit experimentálně. Diskutujte získané výsledky jak z hlediska vlastního porovnání numerických a experimentálních dat, tak i z hlediska porovnání výsledků s informacemi získanými z literární rešerše.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše a doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Moravec, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Jiří Moravec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jakub Čech

Poděkování

Rád bych vyjádřil svou vděčnost všem, kteří mě podporovali a pomáhali mi během mého studia a při psaní této diplomové práce.

Anotační list

Jméno autora:	Jakub
Příjmení autora:	Čech
Název práce česky:	Vliv tvaru a pozice trysky na provozní parametry vodou hnaného ejektoru
Název práce anglicky:	Effect of nozzle shape and position on operating parameters of a water-driven ejector
Rozsah práce:	počet stran: 95 počet obrázků: 80 počet tabulek: 21
Akademický rok:	2023/24
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství – Procesní technika
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Moravec, Ph.D.
Klíčová slova:	Ejektor, proudové čerpadlo, tvary trysek, CFD simulace, sání vzduchu
Klíčová slova anglicky:	Ejector, jet pump, nozzle shape, CFD simulation, air intake
Anotace česky:	Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání a optimalizaci nových průtočných ploch a polohování sekundárního toku u ejektorů. Hlavním cílem je zvýšení účinnosti a výkonu ejektorů prostřednictvím inovativních geometrických konfigurací, optimalizace polohy sekundárního toku a optimalizace průtoku primárního toku. V rámci práce byly použity jak experimentální metody, tak numerické simulace. Experimentální část zahrnovala testování různých návrhů v laboratorních podmínkách, zatímco numerické simulace byly využity k modelování chování toku a predikci výkonnosti ejektorů.
Anotace anglicky:	This thesis focuses on the investigation and optimization of new flow paths and the positioning of secondary flow in ejectors. The main objective is to increase the efficiency and performance of ejectors through innovative geometric configurations, optimization of the secondary flow positioning, and optimization

of the primary flow path. Both experimental methods and numerical simulations were used in this work. The experimental part involved testing various designs under laboratory conditions, while numerical simulations were employed to model flow behavior and predict ejector performance.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Zařazení ejektoru	11
2.1	Proudová čerpadla	11
2.1.1	Injektor	11
2.1.2	Mamutové čerpadlo.....	13
2.1.3	Vodní trkač	14
3	Využití ejektorů	15
3.1	Ejektory kapalina-kapalina.....	15
3.2	Ejektory plyn-plyn.....	15
3.3	Ejektory kapalina-plyn	16
3.3.1	Ejektory hnané kapalinou.....	16
3.3.2	Ejektory hnané plyny	16
3.4	Ejektory hnané vodní párou	16
3.5	Příklady použití ejektorů	17
3.5.1	Požární ejektory.....	17
3.5.2	Pěnový přiměšovač	18
3.5.3	Míchací ejektory.....	18
3.5.4	Samonasávací čerpadla	19
3.5.5	Čerpání z velkých hloubek.....	19
3.5.6	Plynová vývěva	20
3.5.7	Ejektorové chlazení spalovacích motorů.....	21
3.5.8	Čerpání exhalací ze zásobníků	21
3.5.9	Aerační ejektory	21
3.5.10	Nanášení barev a laků	22
3.5.11	Vakuová technika	23
3.5.12	Ejektorový chladicí systém	23

3.5.13	Termokompresory	24
3.5.14	Záložní kalová čerpadla	25
4	Konstrukce ejektoru	26
4.1	Vstupní dýza (tryska)	28
4.2	Směšovací komora	28
4.3	Výstupní dýza – difuzor	30
4.4	Vstup sekundární látky	30
5	Teoretický návrh ejektoru	30
5.1	Potřebné veličiny pro návrh ejektoru	31
5.1.1	Charakteristická křivka	32
5.2	Analytický výpočet charakteristiky ejektoru.....	33
5.3	Analytický výpočet ejektoru pomocí ztrátových součinitelů.....	36
5.3.1	Vztahy pro výpočet ztrátových součinitelů.....	38
5.3.2	Odvození rovnice pro tlakové poměry v ejektoru.....	39
5.3.3	Vypočet ztrátových koeficientů pomocí geometrie ejektoru	41
5.3.4	Další možnosti získání ztrátových koeficientů.....	42
6	Praktická část	44
6.1	Ejektor pro experimenty	44
6.2	Úprava trysky stávajícího ejektoru.....	45
6.3	Volba průtočných desek pro trysku.....	47
7	Numerická simulace.....	50
7.1	Základní metody modelování turbulence	50
7.1.1	RANS modely turbulence ve FLUENTu	50
7.2	Popis tvorby modelu pro CFD simulaci	51
7.3	Program ANSYS	52
7.3.1	ANSYS workbench	52
7.3.2	Geometrie	52

7.3.3	Tvorba sítě (mesh).....	52
7.3.4	Nastavení numerické simulace v programu Fluent	57
7.4	Citlivostní analýza na velikost sítě.....	62
7.5	Výsledky simulací.....	64
7.5.1	Výsledky prvních simulací.....	64
7.5.2	Výsledky simulací – vliv průtoku	67
7.5.3	Výsledky simulací – vliv tvaru trysky.....	68
7.5.4	Výsledky simulací – vliv pozice trysky sekundárního toku.....	74
8	Experimentální část.....	75
8.1	Výsledky měření	77
8.1.1	Výsledky měření – Uzavření sání vzduchu.....	78
8.1.2	Výsledky měření – Charakteristické křivky.....	80
8.2	Ověření simulací a porovnání s numerickou částí	83
8.2.1	Porovnání charakteristických křivek.....	83
8.2.2	Ověření simulace při uzavření sání vzduchu.....	84
8.2.3	Ověření simulace při otevření sání vzduchu	85
9	Závěr	87
10	Seznam zdrojů a použité literatury	88
11	Seznam symbolů	91
12	Seznam obrázků	92
13	Seznam tabulek	95

1 Úvod

Ejektory, známé také jako tryskové pumpy, jsou zařízení široce využívaná v průmyslu pro své schopnosti přepravovat a komprimovat kapaliny nebo plyny bez pohyblivých částí. Jejich efektivní fungování závisí na přesné geometrii průtočných ploch a optimálním polohování sekundárního toku, což ovlivňuje výkon a účinnost celého systému. S rostoucími požadavky na energetickou účinnost a optimalizaci technologických procesů je zkoumání nových průtočných ploch a metod polohování sekundárního toku u ejektorů klíčové pro jejich další vývoj a aplikace.

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat a analyzovat nové koncepty průtočných ploch a polohování sekundárního toku, které mohou přinést inovace a zlepšení.

V rámci této práce byly použity jak experimentální metody, tak numerické simulace k analýze a hodnocení nových návrhů průtočných ploch a polohování sekundárního toku. Numerické simulace byly využity k modelování a predikci chování toku za různých podmínek, což umožnilo detailní analýzu a optimalizaci návrhů před jejich praktickým testováním. Experimentální část zahrnuje testování v laboratorních podmínkách s cílem získat konkrétní data o výkonnosti a účinnosti navržených řešení.

V úvodní části lze najít základní seznámení s ejektory, možnosti jejich využití a základní součásti. Dále v teoretické části práce je seznámení s teoretickým návrhem ejektoru.

2 Zařazení ejektoru

Ejektor je proudové čerpadlo, které je poháněno médiem a slouží k přepravě vzduchu, páry nebo kapaliny. Využívá kinetickou energii hnací látky k pohybu přisávané látky přímým smícháním. Může přenášet kapalné nebo plynné látky, případně látky obsahující pevné částice. Typy ejektorů zahrnují kombinace plyn-plyn, kapalina-plyn a kapalina-kapalina. Jejich parametry se liší dle použití.

Ejektory jsou oblíbené v průmyslu pro svou flexibilitu, jednoduchost, snadnou údržbu, spolehlivost a tichý provoz bez vibrací. Neobsahují pohyblivé části, což eliminuje riziko požárů. Často se používají tam, kde je dostupná kapalina s vysokou energií, například jako vedlejší produkt jiných procesů. [1-3]

2.1 Proudová čerpadla

Proudová čerpadla fungují na principu využití proudu jiné látky, zvané hnací nebo pomocné médium. Pokud je tato látka stejná jako čerpaná, jedná se o jednofázová čerpadla. Pokud se liší chemickým složením nebo skupenstvím, jsou to dvoufázová čerpadla. Tato čerpadla pracují na principu předávání energie hnací látky látce čerpané. [4]

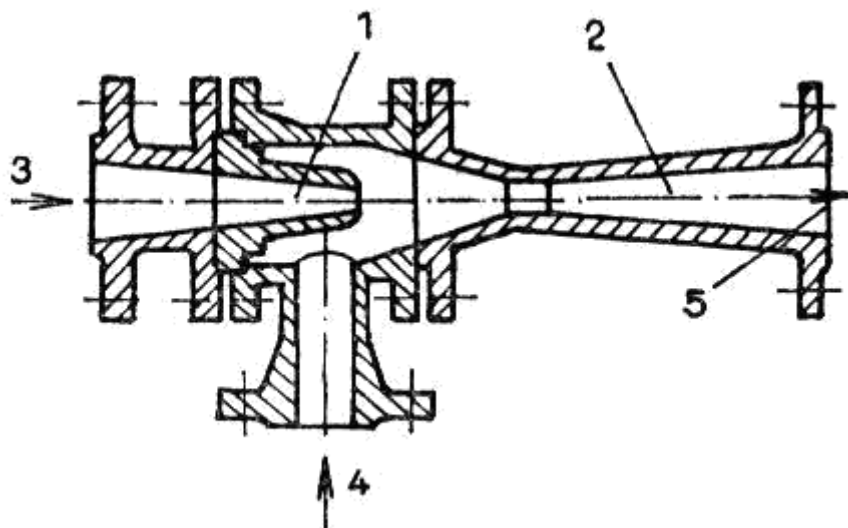
Do kategorie proudových čerpadel patří ejektor, injektor, mamutové čerpadlo, vodní trkač.

2.1.1 Injektor

Injektory jsou čerpadla, která zvyšují tlak, zatímco ejektory jsou nasávací čerpadla. Hlavní rozdíl mezi nimi je, že injektor na výstupu má vyšší tlak než na vstupu hnací látky. Injektory se používají hlavně k napájení parních kotlů, i když dnes existují alternativy, takže jsou méně běžné. Také čerpají viskózní kapaliny.

Vývoj injektorů souvisel s parními stroji, které potřebovaly zařízení pro kontinuální doplňování vody do kotle. Největší poptávka byla v železniční dopravě, kde parní lokomotivy potřebovaly spolehlivou a energeticky nenáročnou pumpu. Problém čerpání vody během jízdy vyřešil v roce 1858 Giffard vynálezem parního injektoru. [4, 5]

Ukázka injektoru je na obrázku č. 1.



Obrázek 1- Schéma injektoru [5] (1 – Dýza (tryska), 2- Difuzor, 3 – Přívod hnací látky, 4- Přívod dopravované látky, 5- Výstupní hrdlo)

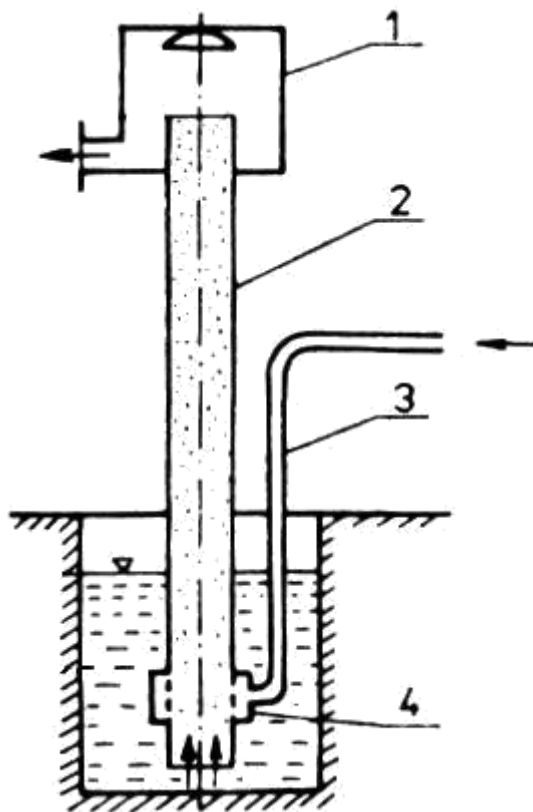
Pára z kotle nejprve prochází zužujícími se trubicemi, kde se její tlak mění na rychlost. S rychlostí blízkou zvuku vstupuje do vodního prostoru čerpadla, předává svou rychlost vodě a kondenzuje. Rychle se pohybující voda v rozšiřujících se trubicích přemění svou rychlost zpět na vyšší tlak a přes zpětný ventil se vrací do kotle.

Nevýhodou injektoru je potřeba počátečního tlaku páry a citlivost na teplotu napájecí vody – při vysoké teplotě pára nekondenzuje a čerpadlo selže. Trubice se mohou opotřebovat kvůli nečistotám ve vodě, což snižuje účinnost injektoru. [6]

2.1.2 Mamutové čerpadlo

Tato čerpadla využívají principu spojených nádob. V trubce pod hladinou se přivádí vzduch z kompresoru skrz otvory, což vytváří směs vzduchu a kapaliny. Díky rozdílné hustotě je kapalina čerpána přetlakem. Na vrcholu trubky je separátor, který odděluje kapalinu od vzduchu.

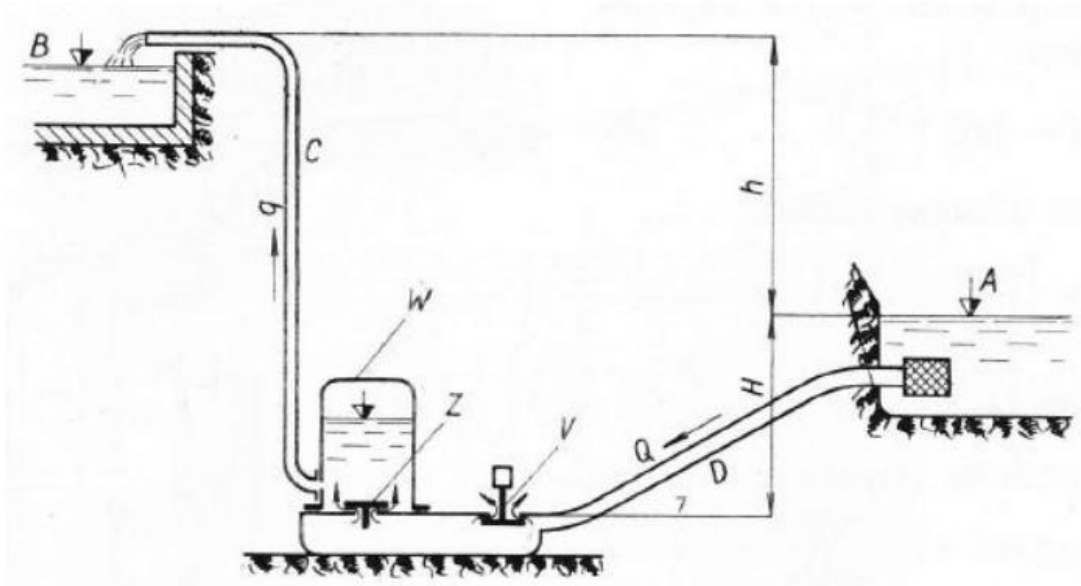
Používají se k čerpání vody z podzemních vrtů, kalů, odpadních vod nebo při přepravě řepy v cukrovarech. Výhodou je jednoduchost, minimální údržba a nepoškozování plovoucích předmětů, což umožňuje čerpání vody s živými organismy. Nevýhodou je nízká účinnost (20–40 %) a slabé sání. Princip mamutového čerpadla je na obrázku č. 2 [7]



Obrázek 2- Schéma mamutového čerpadla [7] (1 – Oddělovač vzduchu, 2- Hlavní trubka, 3 – Potrubí pro přívod stlačeného vzduchu, 4- Sperlovač)

2.1.3 Vodní trkač

Vodní trkač je proudové čerpadlo, které vytváří tlak pomocí vodního rázu způsobeného náhlým zastavením proudu vody. Toto samočinné zařízení nevyžaduje elektrickou energii, využívá pouze kinetickou energii vodního toku, ale v praxi se příliš nevyužívá. Na obrázku č. 3 schéma vodního trkače.



Obrázek 3- Schéma vodního trkače [8]

Voda z nádrže A proudí potrubím D a ventilem V do odpadu. Když proud vody dosáhne určité rychlosti, ventil V se uzavře, což způsobí hydraulický ráz a zvýšení tlaku v potrubí. Tento tlak otevře zpětný ventil Z a část vody se dostane do větrníku W. Ventil V se uzavírá a ventil Z se otevírá pomocí závaží nebo pružiny. Voda opět proudí otevřeným ventilem V, čímž se cyklus opakuje, dokud tlak vzduchu ve větrníku není dostatečný k vytlačování vody potrubím C do nádrže B.

Vodní trkač je levné a téměř bezúdržbové zařízení, vhodné pro toky s minimálním spádem jednoho metru. Může vytlačovat vodu až do výšky 25krát větší, než je přítokový spád H. Účinnost čerpadla klesá s rostoucí dopravní výškou h a pohybuje se mezi 20 až 90 %, přičemž nejvyšší účinnosti dosahuje, když je poměr dopravní výšky k přítokovému spádu H/h roven 1. [8]

3 Využití ejektorů

Použití ejektorů má své výhody a nevýhody, které určují jejich vhodnost pro různé aplikace.

Nevýhody:

- Nízká účinnost (10–30 %), často nahrazována účinnějšími čerpadly
- Omezené možnosti regulace

Výhody:

- Jednoduchost
- Absence pohyblivých dílů, což znamená menší opotřebení
- Spolehlivý provoz bez rizika zadření
- Snadná údržba bez potřeby mazání
- Snadná výroba z různých materiálů
- Požární bezpečnost
- Tichý provoz bez vibrací
- Schopnost čerpat směsi látek, plyny i kapaliny s pevnými částicemi
- Vysoká životnost

Ejektory nevyžadují elektrické napájení, což je výhodné v prostředí s požárními riziky nebo při výpadku proudu, ale vyžadují přívod kapaliny nebo plynu o odpovídajícím tlaku a množství, což může být nákladné. [4]

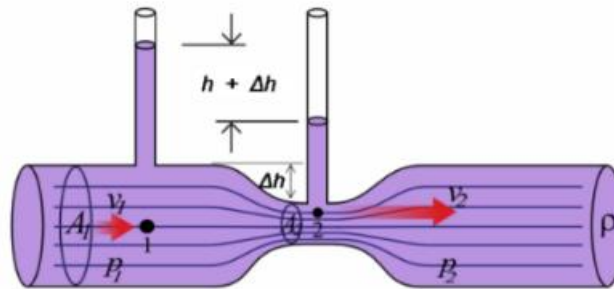
3.1 Ejektory kapalina-kapalina

Kapalinové ejektory využívají hnací i čerpanou kapalinu a mají větší průměry dýz než plynové ejektory, což umožňuje vysoké průtoky. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost na uvedení hnacího proudu do pohybu. Hnací kapalinou je nejčastěji voda díky její dostupnosti, nízké ceně a ekologické nezávadnosti. Při návrhu kapalinových ejektorů je nutné zajistit, aby provozní teplota neklesla pod bod tuhnutí kapaliny, což lze řešit tepelnou izolací nebo vyhříváním. Po odstavení ejektoru je důležité zajistit jeho odvodnění. [4, 8]

3.2 Ejektory plyn-plyn

Plynové ejektory používají jako hnací i přepravované médium plyn. Jsou běžně používané, protože mohou využívat výfukové plyny, což zvyšuje ekonomickou účinnost provozů. Často využívají tlakový vzduch, nezbytný pro různé aplikace. Ejektory pracují na Venturiho principu (obrázek č. 4), kdy stlačený vzduch proudí tryskou, zvyšuje rychlost na nadzvukovou úroveň a při výstupu se rozšiřuje, což vytváří podtlak a umožňuje nasávání vzduchu. Tento proces dosahuje rychlosti až Mach 3 (1000 m/s) díky malým průměrům trysky.

Plynové ejektory mají kompaktní rozměry, což umožňuje jejich použití v mnoha zařízeních. Pro zvýšení výkonu a účinnosti lze instalovat více ejektorů za sebou. [4, 8]



Obrázek 4- princip Venturiho trubice [10]

3.3 Ejektory kapalina-plyn

3.3.1 Ejektory hnané kapalinou

Tento typ zařízení se používá k vytváření vakua nebo odstraňování plynů a par. Hlavní výhodou je jejich efektivní fungování s minimální spotřebou vody. V průmyslovém prostředí ejektory odolávají vysokému tlaku a neustálému kontaktu s vodou. Proto je klíčové vybrat správné materiály a zavést účinná opatření proti korozi, aby byl zajištěn optimální výkon a dlouhá životnost zařízení. [8]

3.3.2 Ejektory hnané plyny

Kvůli rozdílným vlastnostem hnacího a hnaného média, zejména rozdílu hustotě lze s pomocí Bernoulliho rovnice ukázat, že proud vzduchu sám o sobě nemůže vytvořit dostatečný podtlak pro efektivní čerpání kapaliny při vysokých rychlostech. Tento typ ejektoru se používá jako podpora hasičských čerpadel při vytváření podtlaku s pomocí výfukových plynů ze spalovacího motoru, nebo pro míchání plynu a kapaliny. Ejektor je široce využíván umělci a modeláři pro nanášení barev a laků, běžně známé jako "fixírka". [8]

3.4 Ejektory hnané vodní párou

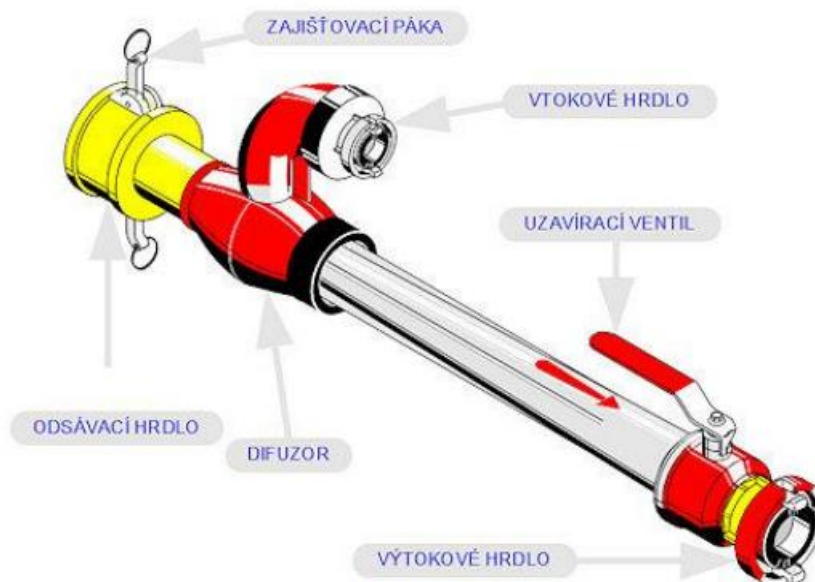
Vodní pára je nejdražší hnací tekutinou pro ejektory kvůli nákladné výrobě a vysokým energetickým ztrátám v potrubí. I když je pára nezbytná pro přenos tepla v mnoha průmyslových procesech, její výroba je nákladná. V průmyslových odvětvích, jako je chemický, petrochemický, farmaceutický a potravinářský průmysl, se proto snaží využívat vyrobenou páru co nejeftivněji.

Parní ejektory pomáhají snižovat energetickou náročnost a jsou spolehlivé a bezpečné. Díky vyšší objemové hmotnosti páry jsou také výkonnější než plynové ejektory. [4]

3.5 Příklady použití ejektorů

3.5.1 Požární ejektory

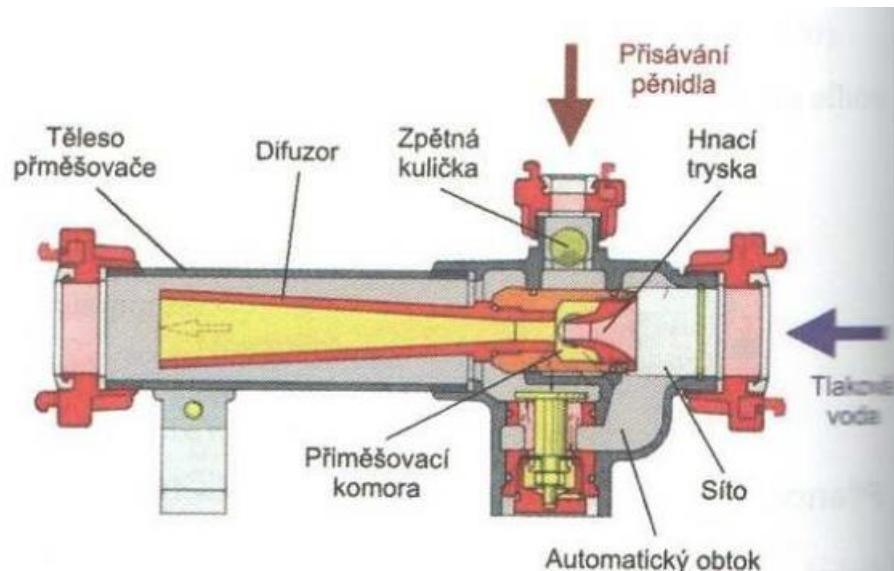
Jedná se o přenosné ponorné čerpadlo z hliníkových slitin, poháněné tlakovou vodou z požární stříkačky nebo hydrantu. Existují verze s vodorovnou a svislou tryskou. Tato čerpadla jsou určena pro čerpání vody z těžko přístupných nebo zatopených prostor, s maximální sací výškou 7,5 metru a výtlačnou výškou 20 metrů. V současnosti je jejich využití omezené, protože požární sbory disponují výkonnějšími ponornými čerpadly. [4] Požární ejektor je na obrázku č. 5.



Obrázek 5-Požární ejektor [8]

3.5.2 Pěnový přiměšovač

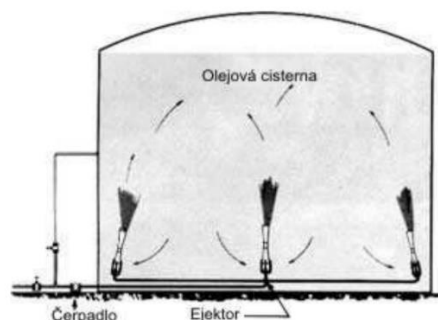
K hašení požárů kapalin se používá vodní pěna, vznikající přidáním pěnidla do vody. Tento roztok je transformován na pěnu ve speciálních proudnicích. Ejektorové požární přiměšovače (obrázek č. 6) jsou jednoduché, spolehlivé a rychlé, mohou být přenosné nebo zabudované v automobilových stříkačkách. Voda z čerpadla je vedena přes přiměšovač, který automaticky přisává pěnidlo z externí nádrže. [4]



Obrázek 6- Přiměšovač [4]

3.5.3 Míchací ejektory

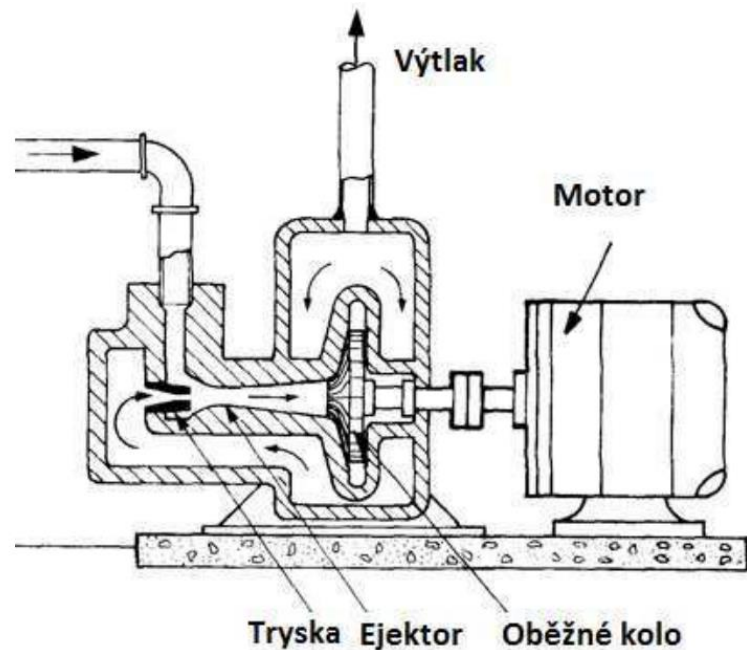
Míchací ejektory (na obrázku č. 7) se používají k udržení homogenního roztoku v nádržích a zabránění usazování těžších částic. Pomocné čerpadlo odsává kapalinu z horní části nádrže a tlačí ji do ejektorů u dna. Ejektory přisávají usazené částice a rovnoměrně je rozptylují, čímž zajišťují promíchávání roztoku. Tento proces je klíčový například při povrchových úpravách, jako je odmašťování, pokovování a fosfátování, nebo při udržování homogenity barviv a topných olejů. [4]



Obrázek 7- Míchací ejektory [2]

3.5.4 Samonasávací čerpadla

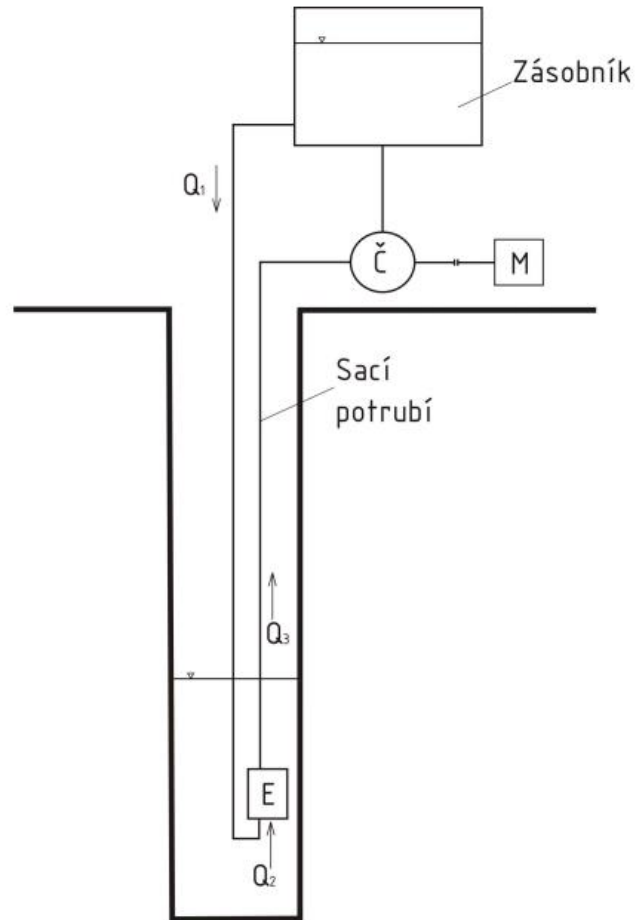
Klasická hydrodynamická čerpadla nedokáží vytvořit dostatečný podtlak pro sání kapaliny při určitém tlakovém rozdílu. Tento problém řeší samonasávací čerpadla (na obrázku č. 8), která využívají ejektor před nasávacím otvorem. Ejektor přisává vzduch do sacího potrubí, čímž zvyšuje podtlak potřebný k nasání kapaliny. Výhodou samonasávacích čerpadel je, že stačí zaplavit pouze samotné čerpadlo, nikoliv celé sací potrubí. Nevýhodou je jejich nižší účinnost oproti klasickým čerpadlům. [4]



Obrázek 8- Samonasávací čerpadlo [4]

3.5.5 Čerpání z velkých hloubek

Čerpadla mají omezenou sací výšku kolem 7 metrů. Pro překonání tohoto omezení se často kombinují s ejektorem, což umožňuje čerpat vodu z hloubek až 20 metrů, například ze studní. Ejektor sám o sobě má nízkou účinnost, ale v kombinaci s čerpadlem dosahuje celková účinnost čerpací stanice 15 až 25 % [13]. Princip čerpání je na obrázku č. 9.



Obrázek 9- Schéma čerpací stanice (Čerpadla a ejektor) [13]

Tento systém začne pracovat, když čerpadlo umístěné u studny začne čerpat kapalinu sacím potrubím do zásobníku. Část kapaliny ze zásobníku je vedena zpět do studny přes potrubí připojené k ejektoru, který je vybaven sacím košem a zpětnou klapkou. Ejektor nasává vodu ze studny o průtoku Q_2 . Výstupem z ejektoru je voda s průtokem Q_3 , který je roven součtu průtoku Q_1 (čerpaného čerpadlem) a Q_2 . Čerpáme pouze průtok Q_2 , který je nasáván ejektorem E [13].

3.5.6 Plynová vývěva

Plynová vývěva zvyšuje sací schopnost požárních odstředivých čerpadel, která nejsou při startu zavodněna. Využívá výfukové plyny ze spalovacích motorů pohánějících tato čerpadla. Funguje jako ejektor nasávající vzduch ze sacího potrubí pomocí proudu výfukových plynů, čímž zvyšuje sací hloubku čerpadel. Ovládání vývěvy je manuální a po zavodnění čerpadla se vypnutí signalizuje výstřikem vody z výfukového otvoru. [4]

3.5.7 Ejektorové chlazení spalovacích motorů

Při vzduchovém chlazení spalovacích motorů je důležité zajistit dostatečné proudění vzduchu, aby efektivně odvádělo teplo z motorového bloku. Samotné náporové chlazení obvykle nestačí, kromě motocyklových motorů, a vyžaduje dodatečný zdroj vzduchu. Ejektorové chlazení využívá výfukové plyny k nasávání vzduchu z okolí motoru, čímž zajišťuje potřebné chlazení. Tento systém je jednoduchý a nevyžaduje výkon z motoru, ale zvyšuje hlučnost, což ho omezuje na závodní automobily. [4]

3.5.8 Čerpání exhalací ze zásobníků

V chemických závodech je často nutné skladovat velké množství chemikálií v zásobnících, přičemž plnění zásobníků vytlačuje výpary přes odvodušňovací komínky. Tyto výpary mohou obsahovat škodlivé látky a nepříjemné zápachy, což představuje zdravotní riziko a zvýšené nebezpečí požáru. Moderní technologie se zaměřují na ekologickou likvidaci těchto výparů odsáváním a jejich transportem do spaloven. Kvůli hořlavosti a výbušnosti výparů je nutné umístit odsávací zařízení do výbušné zóny, kde jsou ejektory jedinou vhodnou volbou, což zlepšuje požární bezpečnost této technologie. [4]

3.5.9 Aerační ejektory

V čističkách odpadních vod se ejektory často používají v aktivačních nádržích k aerobnímu rozkladu organických nečistot. Ejektory intenzivně probublávají vzduchem, což je klíčové pro udržení mikroorganismů ve vznosu a míchání směsi. Část čištěné vody je čerpána do ejektorů, kde slouží jako pracovní médium, přisává vzduch a smíchá ho s vodou. Směs je pak vrácena do nádrže, kde vzduch expanduje a vytváří bubliny, což podporuje aerobní procesy. Tento systém efektivně eliminuje „mrtvé kouty“ v nádrži a zajišťuje rovnoměrné promíchávání, což snižuje riziko tvorby kalu a anaerobních procesů. [9] Aerační ejektor je na obrázku č. 10.



Obrázek 10-Ejektor pro provzdušňování aktivačních nádrží [4]

3.5.10 Nanášení barev a laků

Ejektor na obrázku č. 11 využívá hnací proud vzduchu, obvykle od kompresoru, k přísávání malé množství kapaliny pomocí jehly. Tryska zajišťuje homogenní směs pro efektivní nanášení barvy nebo laku. Stejný princip se používá i při nástřiku studeným plynem pro povrchové úpravy strojních součástí. Klíčové je, že aplikační plyn má nízkou teplotu ($<900\text{ }^{\circ}\text{C}$), aby se přídavné materiály nespékali. Částice se přichycují k povrchu díky své kinetické energii, zatímco výstupní tryska má tvar Lavalovy dýzy, což umožňuje nadzvukové proudění plynu. [8]



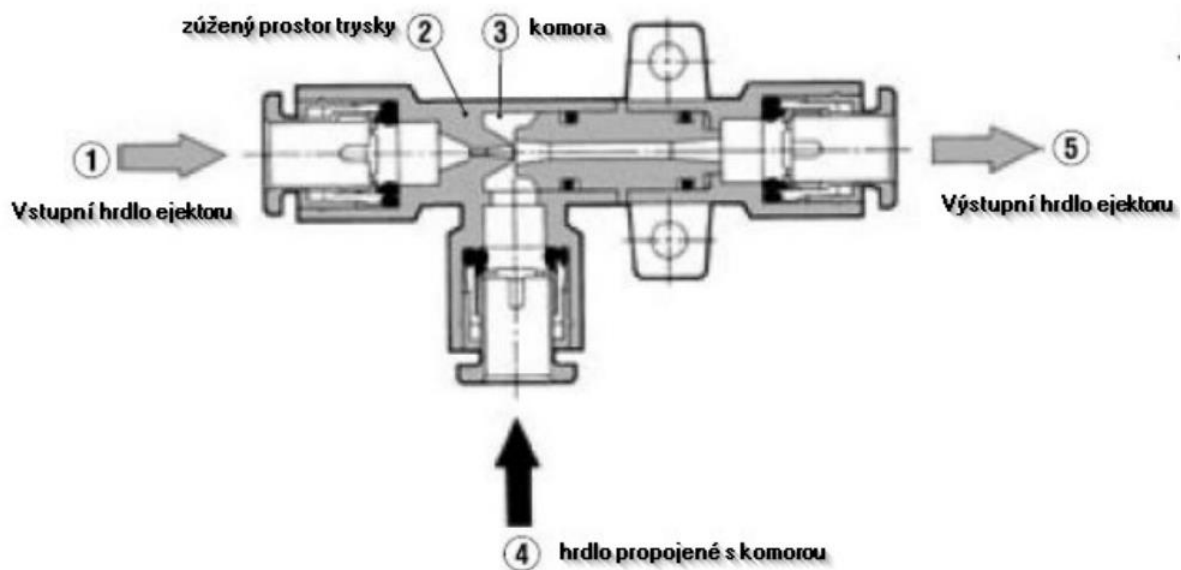
Obrázek 11-schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem: 1) přívod přídavného materiálu, 2) přívod ohřátého plynu, 3) tryska ve tvaru Lavalovy dýzy, 4) proud urychlených částic, 5) základní materiál [8]

3.5.11 Vakuová technika

V technologických procesech je často nutné vytvářet podtlak nebo vakuum (například vakuová odparka). K tomu se používají jeden nebo více ejektorů, které pro zvýšení efektu mohou být zapojeny sériově, aby rozdělily celkový tlak. Kondenzátory, které zkapaňují kondenzovatelné plyny pomocí chladicího média (obvykle vody), snižují zátěž na následné ejektory a zvyšují účinnost systému. I když pořizovací náklady stoupnou, provozní náklady se tím snižují.

Pro snížení zátěže ejektorů je možné je zapojit paralelně, čímž se rozdělí hmotnostní tok mezi více ejektorů. Výstupní vzduch lze vést do společného potrubí nebo přímo do atmosféry. Je důležité se vyhnout protitlaku na výfuku vzduchu, který může ovlivnit dosažitelné vakuum. Tento problém lze řešit volbou dostatečně velkého průřezu potrubí, což zajistí adekvátní průchod vzduchu.

Ejektory mají vysokou spotřebu stlačeného vzduchu, ale pokud je stlačený vzduch dodáván pouze během činnosti, jejich průměrná energetická spotřeba může být nižší než u kontinuálně pracujících mechanických vývěv. [9, 11] Ejektor je na obrázku č. 12.

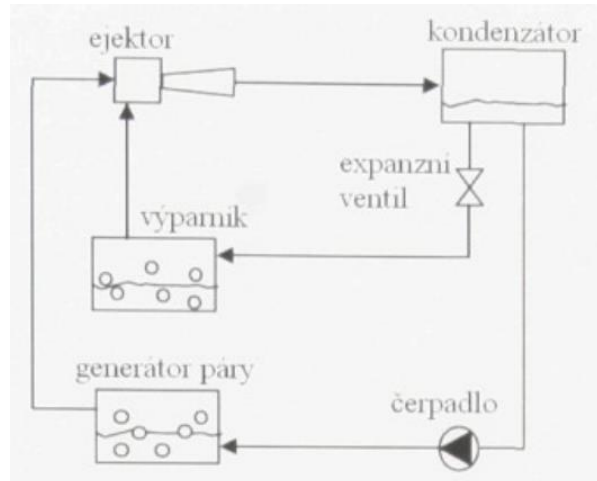


Obrázek 12- schéma vakuového ejektoru [11]

3.5.12 Ejektorový chladicí systém

Ejektorový chladicí oběh je zobrazen na obrázku 13. V těchto systémech ejektor nahrazuje kompresor, který obvykle nasává páry chladiva. Hlavní tlak pro ejektor poskytuje čerpadlo, které nasává část kondenzátu. Dále je součástí systému zdroj tepla, který generuje vysokotlakou páru za čerpadlem.

Ejektorové chladicí systémy a tepelná čerpadla jsou ideální pro použití, když je k dispozici teplý zdroj (obvykle 100 až 120 °C). Například v klimatizacích mohou solární termické panely sloužit jako zdroj tepla pro generátor páry, čímž je energie pro chlazení dostupná v obdobích nejvyšší potřeby. [12]



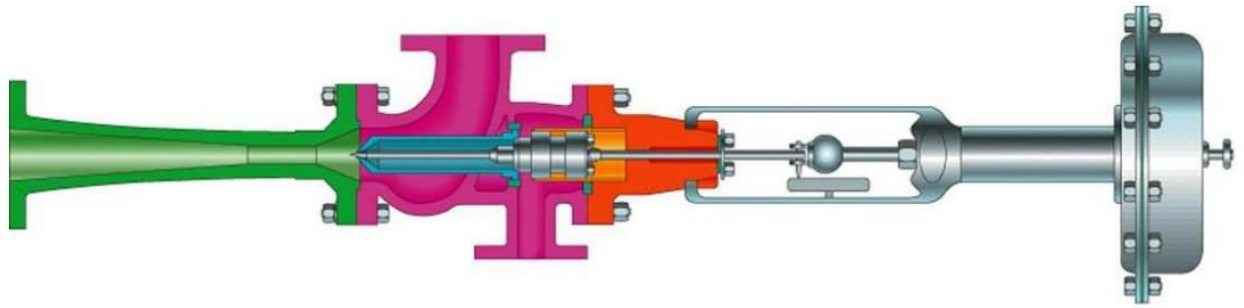
Obrázek 13- chladicí systém s ejektorem [12]

3.5.13 Termokompresory

Mnoho technologických procesů uvolňuje brýdovou páru, která uniká do ovzduší a způsobuje značné energetické ztráty. Tato pára, která má téměř atmosférický tlak, komplikuje použití výměníků jako kondenzátorů kvůli potřebě velké teplosměnné plochy a vysokým nákladům.

Termokompresor (na obrázku č. 14) tento problém řeší tím, že pomocí malé části topné páry zvyšuje tlak brýdové páry, čímž snižuje náklady na topnou páru o 20 až 45 %. Může být neregulovaný nebo regulován ventilem a využitím více trysek dosáhne o 10-15% vyšší účinnosti než jedna tryska. [4, 8]

Termokompresory lze také využít k ohřevu vody přímým vstříkem páry, což minimalizuje energetické ztráty. Pro správnou funkci je důležité, aby hnací pára byla čistá, aby se předešlo erozi a zajistil správný provoz. Je také důležitá adekvátní konfigurace kondenzační sítě před termokompresorem. Termokompresory mohou být velmi dlouhé, až několik desítek metrů. [4, 8]

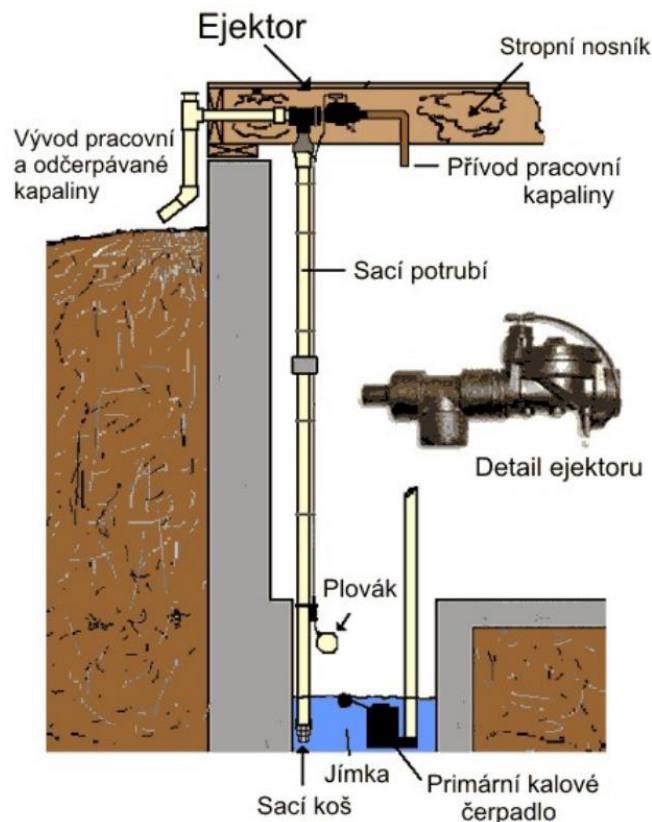


Obrázek 14- Řez termokompresorem s regulací [4]

3.5.14 Záložní kalová čerpadla

Záložní kalové čerpadlo s ejektorem (ukázka na obrázku č.15) je ideální pro případy selhání primárního čerpadla kvůli zamrznutí, ucpání, výpadku elektřiny nebo poruše plovákového spínače. Toto čerpadlo je plně automatické a nezávislé na elektrické energii. Je umístěno nad kalovou jímkou a neovlivňuje chod primárního čerpadla.

Čerpadlo má vlastní plovákový spínač nad úrovní hladiny primárního čerpadla, který je propojen s ventilem pro regulaci přívodu užitkové vody z městského vodovodu do ejektoru. Ten pak čerpá kalovou suspenzi. [14]

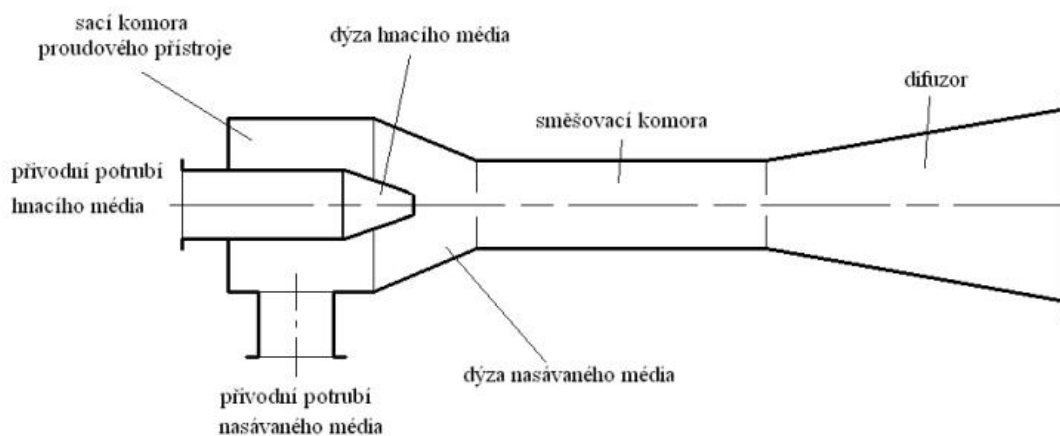


Obrázek 15- Schéma záložního kalového čerpadla s detailem ejektoru [14]

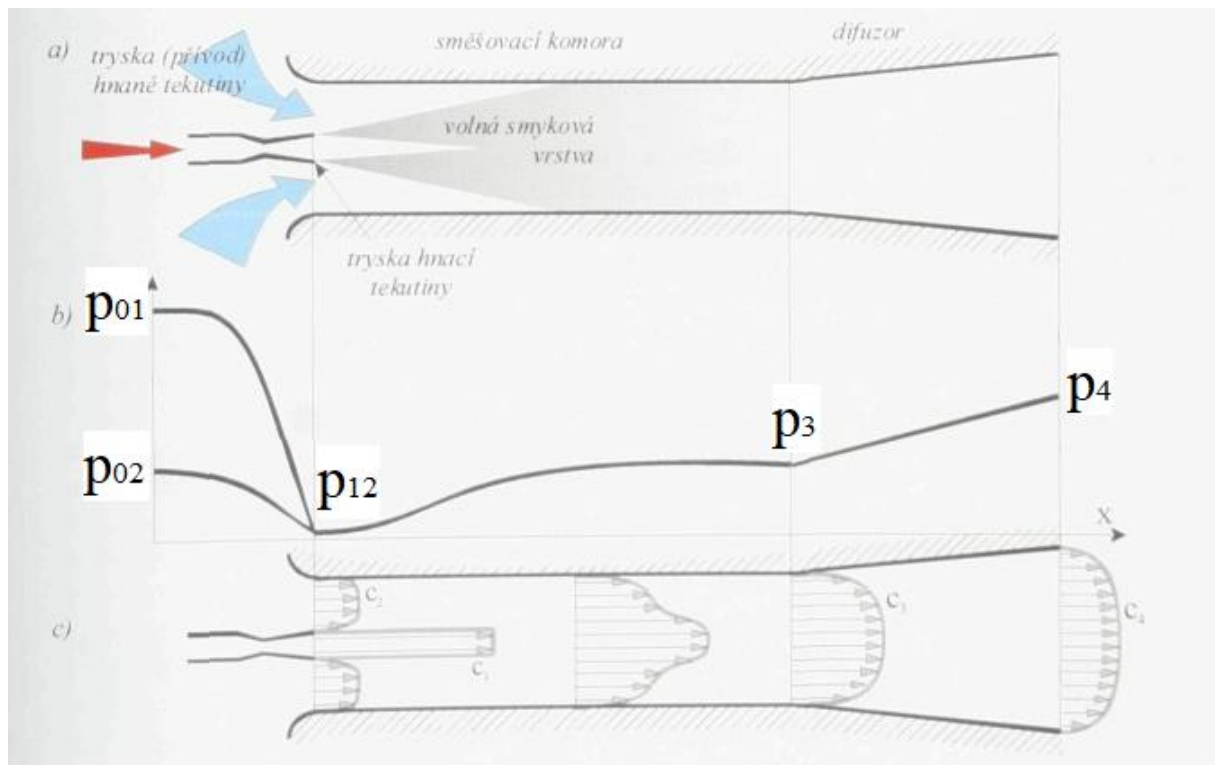
4 Konstrukce ejektoru

Ejektory se vyrábějí v různých typech podle specifických aplikací a liší se v provedení, ale všechny mají základní části: vstupní dýzu pro hnací médium, vstupní dýzu pro hnané médium, směšovací komoru a difuzor (jednotlivé části jsou na obrázku 16). Tyto komponenty ovlivňují výkon ejektoru na základě kombinace použitých tekutin.

Na rozdíl od jiných čerpadel jsou ejektory často navrhovány a vyráběny na míru podle požadovaných parametrů. Materiály používané k jejich výrobě závisí na chemickém charakteru zpracovávaných látek: litina a ocel jsou běžné, plast se používá pro menší ejektory, a nerezová ocel je preferována pro agresivní látky. V některých případech může být nutné ejektory vyhřívat kvůli fyzikálním vlastnostem manipulovaných látek. [8, 4, 2]



Obrázek 16- Schéma ejektoru – části [15]



Obrázek 17- Princip ejektoru a) konstrukční část, b) průběh tlaků, c) vývoj rychlostního profilu [12]

Princip fungování ejektoru je vždy podobný bez ohledu na jeho použití: vysokotlaká tekutina (hnací proud) předává část své energie nízkotlaké tekutině (hnanému proudu), čímž vzniklá směs překonává tlak, který je mezi klidovým tlakem hnaného proudu p_{02} a klidovým tlakem hnacího proudu p_{01} jak je zobrazeno na obr. 17.

K popisu principu činnosti ejektoru poslouží obr. 17. Na obr. 17a expanduje hnací proud v hnací trysce do vysoké rychlosti. Vlivem třecích sil na rozhraní proudu vycházejícího z hnací trysky dochází ke strhávání okolního prostředí. Protože je okolní prostor omezen stěnami směšovací komory, způsobí strhávání okolního prostředí pokles tlaku a dochází tím k nasávání okolí – hnaného proudu do směšovací komory. Podle diagramu na obr. 17b to znamená, že oba proudy expandují ze svých klidových tlaků p_{01} a p_{02} na společný expanzní tlak p_{12} .

Ve směšovací komoře se oba proudy mísí, část kinetické energie hnacího proudu se předá proudu hnanému, část dissipuje na tepelnou energii a část se v určitých typech směšovacích komor a při určitých podmínkách mění na energii tlakovou. Ve směšovací komoře se vyrovnává rychlostní profil, jak je naznačeno na obr. 17c, a za určitých podmínek vzroste statický tlak na konci směšování na hodnotu p_3 . Výsledkem předání energie hnanému proudu je skutečnost, že klidový tlak výsledného proudu p_3 je vyšší než klidový tlak hnaného proudu p_{02} . Výsledný proud

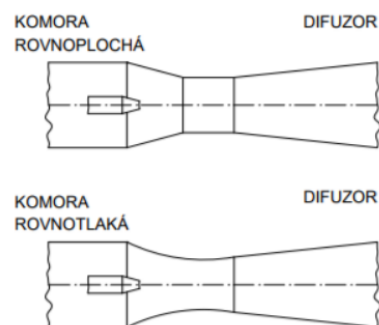
za směřovací komorou vstupuje do difuzoru, kde se část kinetické energie mění zpět na tlakovou, čímž stoupá tlak na hodnotu p_4 , a zvyšuje se jinak nízká účinnost ejektoru. Disipace energie v ejektoru vzniká třením a vířením tekutiny ve všech jeho částech, avšak hlavním faktorem způsobujícím relativně nízkou účinnost je směřování tekutin. [12]

4.1 Vstupní dýza (tryska)

Vstupní dýzy ejektoru urychlují a směřují proud před jeho vstupem do směřovací komory. Jejich tvar je navržen tak, aby minimalizoval délku a energetické ztráty. Poloha trysky (axiálně nebo mimo osu) ovlivňuje efektivitu ejektoru a distribuci hnacího média. Vícerychlostní ejektory mohou mít více trysek pro zkrácení směřovací komory a prevenci kavitace. Materiál dýz je často levný a běžně dostupný, přičemž odolnější materiály se používají pouze na nejvíce zatěžované části, což umožňuje jejich snadnou výměnu po opotřebení. [2, 4, 8]

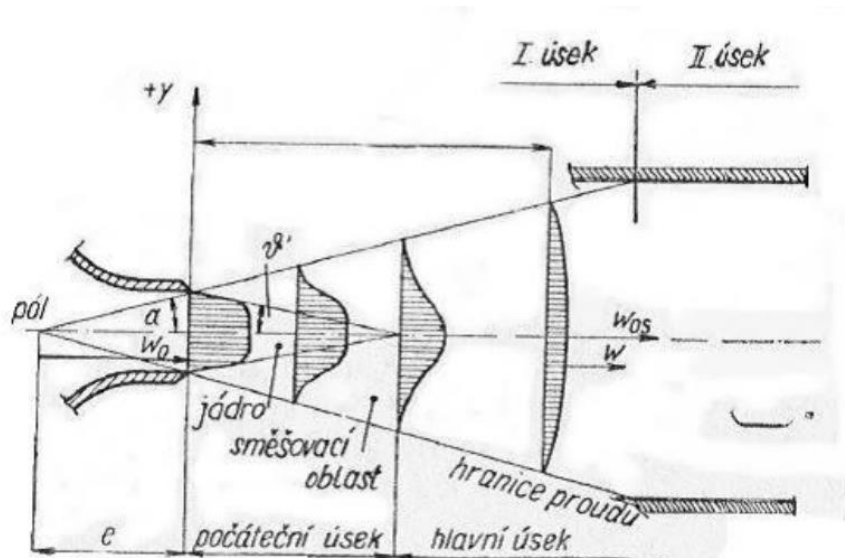
4.2 Směřovací komora

Směřovací komora, která následuje po vstupní dýze, slouží k promíchávání obou médií turbulencí, přičemž část kinetické energie pracovního média se přenáší na nasávané médium. Existují dvě hlavní varianty (na obrázku č. 18) směřovacích komor: rovnoplochá (s konstantním průřezem, často válcová) a rovnotlaká (s měnícím se průřezem, ale stálým tlakem). Rovnoplochá komora je běžnější u ejektorů kapalina-kapalina, díky své jednoduchosti a nízkým nákladům, zatímco rovnotlaká komora se více používá u plynových zařízení. [2, 15]



Obrázek 18-Dva základní typy směřovací komory [2]

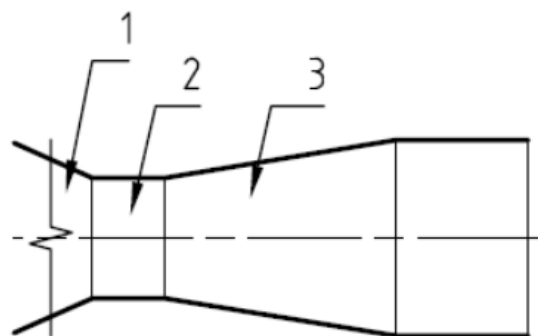
Po opuštění hnací dýzy se hnací proud rozšiřuje a vytváří proudové pole, které se dá rozdělit na dvě části. Rozhraní mezi těmito částmi je rovina, kde se hranice hnacího proudu dotýkají stěn komory (viz Obr. 19). [8]



Obrázek 19- Schéma volného proudu ve směšovací komoře [8]

V prvním úseku směšovací komory se proudové pole chová jako volný proud, rozděluje se na jádro s podobnou rychlostí a směrem jako na výstupu z dýzy, a směšovací oblast, kde dochází k mísení hnacího a hnaného média. Jádro se postupně zužuje, zatímco směšovací oblast se rozšiřuje (obrázek 20).

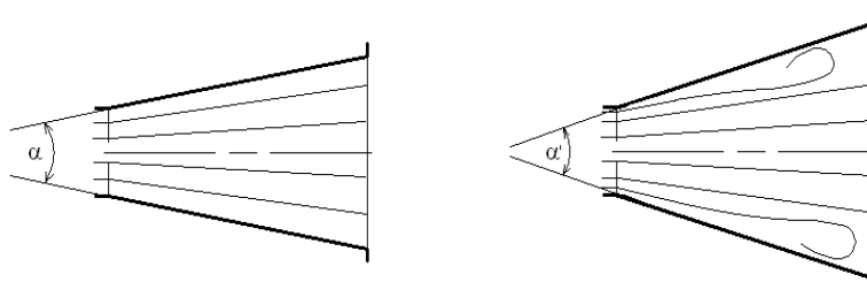
V druhém úseku, nazývaném krček, směšovací oblast vyplňuje celý průřez komory a hnací síla je nulová. Zde dochází k největšímu přenosu energie z hnacího média na hnané a k redukci turbulence. Délka krčku je klíčová pro účinnost přenosu energie; efektivita roste s délkou až do určitého bodu, po kterém delší délka vede k větším ztrátám a nižší účinnosti. [8]



Obrázek 20- přechod mezi směšovací komorou a difuzorem – 1) směšovací oblast, 2) krček, 3) difuzor [8]

4.3 Výstupní dýza – difuzor

Difuzor, poslední část ejektoru, mění kinetickou energii proudu na tlak, čímž zvyšuje účinnost zařízení. Není vždy nutný, pokud rychlost kapaliny na výstupu je vhodná pro potrubí a průměr směšovací komory odpovídá průměru potrubí. V difuzoru může docházet k zpětnému proudění kvůli oddělení mezní vrstvy od stěn (obrázek 21), což způsobuje energetické ztráty. Tyto ztráty závisí na úhlu rozevření difuzoru. [2, 8, 15]



Obrázek 21-Ideální a skutečné proudění difuzorem [15]

Obecně platí, že s rostoucím vrcholovým úhlem rostou i ztráty, jak můžeme vidět v tabulce č. 1.

Tabulka 1 - Závislost tlakové ztráty difuzoru na velikosti vrcholového úhlu [15]

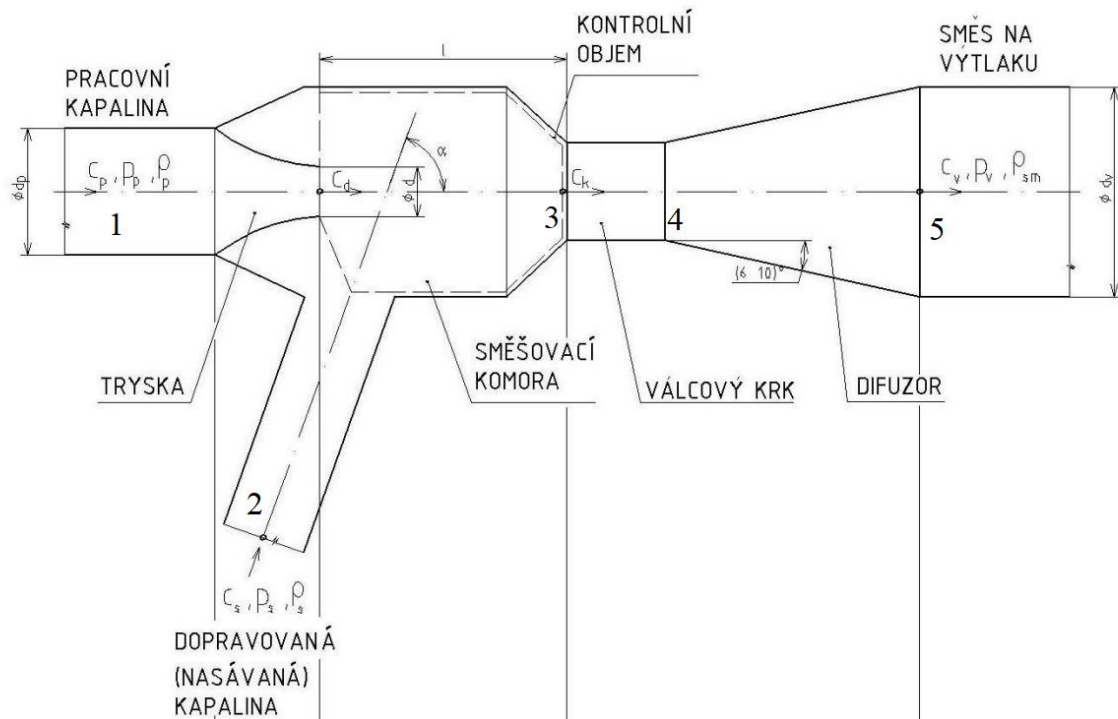
vrcholový úhel difuzoru	tlaková ztráta v difuzoru
α	$\Delta p_{z,D}$
6°	14%
10°	18%
15°	26%
20°	42%

4.4 Vstup sekundární látky

Vstup hnané látky do ejektoru může být umístěn radiálně, axiálně nebo pod určitým úhlem podle specifických potřeb aplikace. Cílem je zajistit správné nasměrování a rychlost tekutin pro optimální míšení v směšovací komoře. [2, 15]

5 Teoretický návrh ejektoru

Při návrhu ejektoru je cílem dosáhnout co nejvyšší účinnosti při daných tlakových a průtokových hodnotách. Kvůli složitosti proudění je nutné používat zjednodušující předpoklady, které usnadňují analýzu. Tyto předpoklady mohou způsobit chyby, které je třeba korigovat pomocí experimentálně určených korekčních faktorů.



Obrázek 22-Schéma ejektoru [13]

Pro další výpočty je zavedena následující indexace (viz. Obrázek 22):

- 1 (p) – veličiny hnacího prostředí
- 2 (s) – veličiny hnaného prostředí
- 3 (k) – veličiny na vstupu do krčku
- 4 – veličiny na výstupu z krčku
- 5 (v) – veličiny na výstupu z difuzoru
- n – ústí trysky
- m – směšovací komora

5.1 Potřebné veličiny pro návrh ejektoru

Tlakový poměr N

$$N = \frac{P_5 - P_2}{P_1 - P_5} \quad (5.1)$$

Tento poměr vyjadřuje poměr tlaků primární a sekundární látky vůči tlaku na výstupu z difuzoru.

Poměr objemových průtoků M

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (5.2)$$

Vyjadřuje poměr průtoků sekundární látky vůči průtoku primární látky na vstupu do ejektoru.

Poměr průřezů R

$$R = \frac{A_n}{A_m} \quad (5.3)$$

Jedná se o poměr průřezu v místě ústí trysky vůči průměru směšovací komory.

Účinnost zařízení

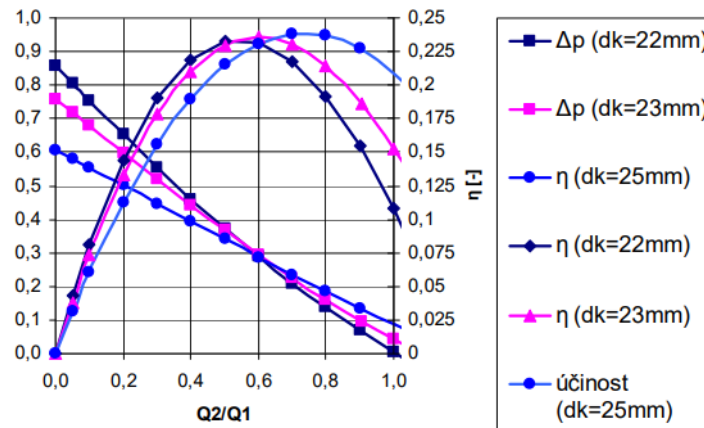
$$\eta = \frac{Q \cdot \rho \left[\left(\frac{p_v}{\rho} + \frac{c_v^2}{2} \right) - \left(\frac{p_s}{\rho} + \frac{c_s^2}{2} \right) \right]}{Q_p \cdot \rho_p \left[\left(\frac{p_p}{\rho_p} + \frac{c_p^2}{2} \right) - \left(\frac{p_v}{\rho_v} + \frac{c_v^2}{2} \right) \right]} \quad (5.4)$$

Vztah lze vyjádřit tak, že čítel představuje výkon ztracený kapalinou při průchodu ejektorem, zatímco jmenovatel udává výkon získaný hnanou kapalinou. Tento poměr poskytuje poměrně přesnou hodnotu účinnosti celého ejektoru, ale existují i jiné definice účinnosti ejektoru.

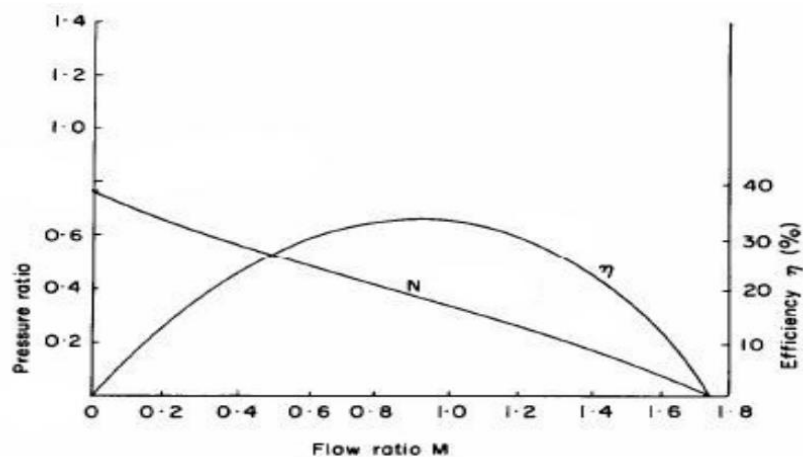
5.1.1 Charakteristická křivka

Charakteristická křivka ejektoru (na obrázcích 23, 24) ilustruje jeho chování při různých pracovních podmínkách. Tato křivka ukazuje vztah mezi tlakovým poměrem a objemovými průtoky při specifickém poměru průřezů. Má dva klíčové průsečíky (maximální tlakový poměr při nulovém průtoku a maximální poměr průtoků při nulovém tlakovém poměru): jeden s osou Y,

který ukazuje tlakový poměr N , a druhý s osou X , odpovídající průtokovému poměru M . První průsečík s osou Y označuje sekundární bod zpětného toku, což je nežádoucí, protože signalizuje, že tok začíná proudit zpět do směšovací komory. Druhý průsečík, který protíná křivku účinnosti, ukazuje kavitační bod. Tyto kritické body je třeba při návrhu systému minimalizovat nebo se jim vyhnout. [16]



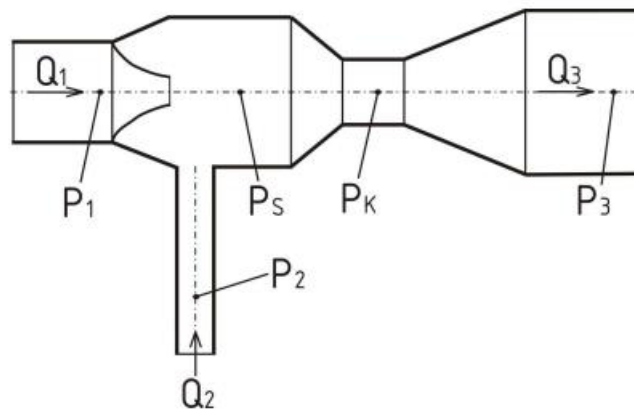
Obrázek 23- charakteristiky ejektoru pro různé rozměry d_k – průměr krčku [13]



Obrázek 24- Charakteristická křivka [16]

5.2 Analytický výpočet charakteristiky ejektoru

Na obr. 25 jsou vyznačeny neznámé veličiny. A to tři neznámé průtoky Q_1 , Q_2 , Q_3 a pět neznámých tlaků p_1 , p_2 , p_3 , p_s , p_k . To je tedy celkem 8 neznámých. Pro jejich řešení použijeme tři rovnice popisující okrajové podmínky v každé větvi a pět rovnic popisujících proudění v ejektoru. Je důležité poznamenat, že typ okrajové podmínky nelze volit libovolně. Například není možné specifikovat tři různé průtoky; je nutné volit kombinaci tlaků a průtoků.



Obrázek 25- Ejektor s vyznačenými neznámými veličinami [13]

Rovnice popisující proudění v ejektoru

1. Rovnice kontinuity

Pro nestlačitelnou tekutinu budeme uvažovat

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (5.5)$$

2. Předpokládáme, že tlak na stěnách směšovací komory je konstantní a roven p_s potom platí

$$p_2 = p_s \quad (5.6)$$

3. Proudění v prostoru dýzy

Jedná se o výpočet tlakové difference mezi vstupem a výstupem z dýzy jako funkce průtoku Q_1 .

$$Q_1 = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_s)}{\rho}} \quad [13] \quad (5.7)$$

Kde

C ... průtokový součinitel (volí se přibližně 0,95 – experimentální hodnota)

β ... poměr d/D

d ... nejmenší průměr dýzy (na konci)

D ... největší průměr dýzy

S_0 ... výstupní plocha dýzy.

4. Mezi tlakem ve směšovací komoře a tlakem na konci krčku platí rovnice silové rovnováhy, kterou je možno psát v následujícím tvaru.

$$\rho \cdot \frac{Q_1^2}{S_d} + p_s \cdot S_k = \rho \cdot \frac{Q_3^2}{S_k} + p_k \cdot S_k \cdot \quad (5.8)$$

5. V prostoru difuzoru se uvažuje s účinností:

$$\eta_s = \frac{\frac{p_k - p_3}{\rho}}{\frac{Q_3^2}{2 \cdot S_k^2} - \frac{Q_3^2}{2 \cdot S_3^2}} \quad (5.9)$$

Jedná se o účinnost přeměny kinetické energie na tlakovou. Na základě dostupných experimentálních údajů se doporučuje volit účinnost savky v rozmezí 0,6 až 0,75.

Níže máme poslední tři rovnice: rovnici popisující proudění v dýze, rovnici silové rovnováhy a rovnici pro výpočet účinnosti ejektoru. Tyto rovnice tvoří soustavu tří nelineárních rovnic, které je nutné řešit numerickými metodami.

$$\frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} - Q_1 = \text{ress}_1 \quad (5.10)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{Q_1^2}{S_d} - \frac{Q_3^2}{S_k} \right) - S_k \cdot (p_k - p_s) = \text{ress}_2 \quad (5.11)$$

$$\frac{1}{\rho} (p_k - p_3) + \frac{Q_3^2}{2} \left(\frac{1}{S_k^2} - \frac{1}{S_3^2} \right) \cdot \eta_s = \text{ress}_3 \quad (5.12)$$

Na pravé straně každé rovnice je residuum, které se blíží k nule. Toto residuum představuje zbytek, který vzniká z neúplného dodržení základních zákonů. Celkový součet těchto tří residuí druhého řádu by měl být minimální.

$$\sum \text{ress}^2 = \text{ress}_1^2 + \text{ress}_2^2 + \text{ress}_3^2 \quad (5.13)$$

Tímto způsobem lze zkonstruovat charakteristickou křivku. Měníme hodnotu poměru průtoku M a dopočítáváme tlakový poměr N .

Tento výpočet předpokládá kruhový tvar trysky a ejektor typu kapalina-kapalina, Dále platí předpoklad, že osy všech hrdel se nacházejí ve vodorovné rovině.

Výpočet byl převzat z literatury [13, 14, 2, 8].

5.3 Analytický výpočet ejektoru pomocí ztrátových součinitelů

Výpočet byl převzat z literatury [16,17,18,19]

Pro tento model musíme zavést tyto předpoklady:

1. Ejektor pracuje izotermicky a za podmínek ustáleného stavu.
2. Průtok je jednorozměrný s výjimkou směšovací komory.
3. Tloušťka stěny trysky na výstupu je nulová.
4. Vzdálenost primární trysky a sekundární trysky by měla být nulová.
5. Míchání (přenos hybnosti) je dokončeno v rámci konstantního průřezu směšovací komory.
6. Primární a sekundární proudy vstupují do směšovací komory s rovnoměrnými rychlostními profily a produkovaná tekutina opouští směšovací komoru s rovnoměrným rychlostním profilem (rovnoměrný rychlostní profil = pístový tok).
7. Třecí ztráty v trysce, sekundárním vstupu, směšovací komoře a difuzoru jsou započteny čtyřmi ztrátovými koeficienty.
8. Primární kapalina je jednofázová nestlačitelná kapalina.
9. Sekundární tekutina se chová jako nestlačitelná kapalina (hmotnostní průtok kapaliny >> hmotnostní průtok plynu).
10. Jakákoli dvoufázová směs je homogenní.
11. Mezi fázemi nedochází k žádnému přenosu hmoty.

12. Teploty primárních a sekundárních kapalin jsou stejné.

13. Plynná fáze, pokud je přítomna, prochází izotermickou kompresí ideálního plynu.

14. Rychlosti tekutin jsou menší než rychlost zvuku.

Účinnost ejektoru lze také zapsat jako:

$$\eta = M \cdot N \quad (5.14)$$

kde M je poměr objemových průtoků a N pomocí ztrátových součinitelů vyjádříme jako:

$$N = \frac{2R + \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d) - \frac{CM^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)}{(1+K_p) - 2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} + R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d)} \quad [16] \quad (5.15)$$

Pokud je hustota primárního a sekundárního proudu stejná tak $C=1$, což můžeme využít pro ejektor typu voda-voda.

K_p , K_s , K_m , K_d jsou ztrátové součinitele, které zohledňují ztráty v primární trysce, vstupu sekundárního proudu, směšovací komoře a difuzoru. Pro aplikace s vysokým Reynoldsovým číslem (nad 2×10^5) lze u dobře navrženého proudového čerpadla předpokládat hodnoty 0,05; 0,1; 0,15 a 0,2.

U rovnice (5.15) předpokládáme že vzdálenost primární trysky a sekundární trysky je nulová, můžeme tuto rovnici upravit pro případ kdy vzdálenost nulová nebude a přidat korekční člen.

$$N = \frac{2R + \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d) - \frac{CM^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)}{(1+K_p) - 2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} + R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d) + \beta \frac{CM^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)} \quad [16] \quad (5.16)$$

Kde

$\beta = 0$ pro nulovou vzdálenost trysky od vstupu do hrdla

$\beta = 1$ pro nenulovou vzdálenost trysky od vstupu do hrdla

5.3.1 Vztahy pro výpočet ztrátových součinitelů

Primární tryska

$$K_p = \frac{P_1 - P_n}{\frac{1}{2} \rho_p V_n^2} - 1 \quad (5.17)$$

Vstup sekundární látky

$$K_s = \frac{P_2 - P_s}{\frac{1}{2} \rho_s V_3^2} - 1 \quad (5.18)$$

Difuzor

$$K_d = \frac{P_4 - P_5}{\frac{1}{2} \rho_d V_4^2} \quad (5.19)$$

Směšovací komora

$$K_m = 4f \frac{L}{D} \quad (5.20)$$

Kde f je třecí faktor a lze spočítat:

$$f = \frac{\Delta p}{4 \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho_m V_4^2} \quad (5.21)$$

Rychlost na výstupu ze směšovací komory V_4 se používá k získání třecího faktoru, protože je nižší než průměrná rychlost ve směšovací komoře. Dává nám to přesné výsledky, protože bylo zjištěno, že ztráta třením uvnitř směšovací komory je mnohem menší než u konvenčního potrubí. [16]

Rovnice pro výpočet celkových tlaků

Pokud vezmeme v úvahu zachování energie, absolutní tlaky primární trysky, vstupu sekundární látky a difuzoru lze vyjádřit:

$$P_1 = P_3 + \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 + K_p \left(\frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \right) \quad (5.22)$$

$$P_2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho_s V_3^2 + K_s \left(\frac{1}{2} \rho_s V_3^2 \right) \quad (5.23)$$

$$P_5 = P_4 + \frac{1}{2} \rho_d V_4^2 - K_d \left(\frac{1}{2} \rho_d V_4^2 \right) \quad (5.24)$$

Kde poslední člen v rovnici je tlaková ztráta pro danou část ejektoru (primární tryska, vstup sekundární látky a difuzor). P vyjadřuje absolutní tlak, p tlak statický.

Rychlosti na vstupu do směšovací komory a výstupu ze směšovací komory

Využitím poměru objemových průtoků M a poměru průřezů R , lze vyjádřit rychlost na vstupu do difuzoru V_4 a rychlost na vstupu do směšovací komory V_3 , jako funkci rychlosti v ústí trysky V_n :

$$V_4 = R \cdot (1 + M) \cdot V_n \quad (5.25)$$

$$V_3 = \frac{M \cdot R}{1 - R} \cdot V_n \quad (5.26)$$

5.3.2 Odvození rovnice pro tlakové poměry v ejektoru

Vztah pro zachování hybnosti ve směšovací komoře:

$$p_3 A_3 + \rho_p Q_p V_n + \rho_s Q_s V_3 = p_4 A_4 + \rho_m Q_m V_4 + \rho_d A_4 K_m R^2 (1 + M)^2 \frac{V_n^2}{2} \quad (5.27)$$

kde poslední člen je třecí ztráta ve směšovací komoře.

Substitucí rovnic (5.25), (5.26) a (5.27) a nahrazením objemového průtoku plochou vynásobenou rychlostí získáváme rovnici:

$$(p_4 - p_3)A_4 = \rho_p A_n V_n^2 + \rho_s (A_3 - A_n) \left(\frac{MR}{1-R} \right)^2 V_n^2 - \rho_d A_4 R^2 (1+M)^2 V_n^2 - \rho_d K_m R^2 (1+M)^2 \frac{V_n^2}{2} \quad (5.28)$$

Odečteme od sebe rovnice (5.24) a (5.23) a získáme:

$$P_5 - P_2 = p_4 - p_3 + (1 - K_d) \frac{1}{2} \rho_d V_4^2 - (1 + K_s) \frac{1}{2} \rho_s V_3^2 \quad (5.29)$$

Spojením rovnic (5.28) a (5.29) získáme rovnici:

$$P_5 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \left[2R + \frac{2CM^2 R^2}{1-R} - R^2 (1 + K_m + K_d) (1 + CM) (1 + M) - C (1 + K_s) \left(\frac{MR}{1-R} \right)^2 \right] \quad (5.30)$$

Kde

$$C = \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (5.31)$$

$$R = \frac{A_n}{A_m} = \frac{A_n}{A_4} \quad (5.32)$$

Za použití rovnic (5.22) a (5.24) uděláme to stejné pro získání rozdílu tlaku P_1 a P_5

$$P_1 - P_5 = p_3 - p_4 + (1 + K_p) \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 - (1 - K_d) R^2 (1 + M) (1 + CM) \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \quad (5.33)$$

A spojením rovnic (5.32) a (5.27) dostáváme rovnici:

$$P_1 - P_5 = \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \left[-2R - \frac{2CM^2 R^2}{1-R} + R^2 (1 + M) (1 + CM) (1 + K_m + K_d) + (1 + K_p) \right] \quad (5.34)$$

Podělením rovnic (5.30) a (5.34) dle rovnice (5.35) získáváme výsledný tlakový poměr N viz. rovnice (5.15)

$$N = \frac{P_d - P_s}{P_p - P_d} = \frac{P_5 - P_2}{P_1 - P_5} \quad (5.35)$$

5.3.3 Vypočet ztrátových koeficientů pomocí geometrie ejektoru

Ztrátové koeficienty lze vyjádřit pomocí geometrie ejektoru.

Primární tryska

$$K_p = 0.8 \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) \quad (5.36)$$

kde

θ je úhel primární trysky

d_1 je malý průměr primární trysky

d_2 je velký průměr primární trysky

Vstup sekundární látky

$$K_s = 0.8 \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right) + 4f \frac{l}{d} \Phi_0^2 \quad (5.37)$$

kde

θ je úhel sekundární trysky

d_1 je malý průměr sekundární trysky

d_2 je velký průměr sekundární trysky

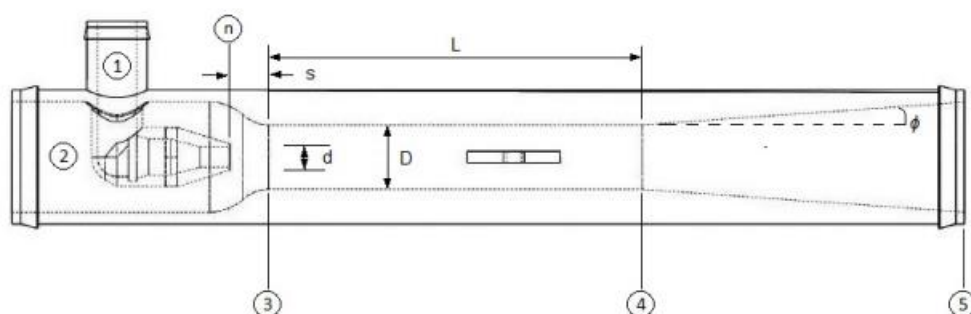
Φ_0^2 je Friedelova korelace, je to empirický koeficient, který zohledňuje ztráty třením.

V podmínkách jednofázového proudění je $\Phi_0^2 = 1$

Směšovací komora

Hodnoty L a D ze vzorce (5.38) jsou zobrazeny na obrázku č. 26.

$$K_m = 4f \frac{L}{D} \Phi_{LO}^2 \quad (5.38)$$



Obrázek 26- Průměr a délka směšovací komory ejektoru [16]

Difuzor

$$K_d = \frac{2.6 \sin \frac{\theta}{2} (1 - \beta^2)^2}{\beta} \quad (5.39)$$

Kde

θ je úhel difuzoru

d_1 je malý průměr difuzoru

d_2 je velký průměr difuzoru

β ve jmenovateli je pro případnou koncovku difuzoru na výstupu z difuzoru tento vzorec platí pro $Re > 10^5$ Dle [16]

$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad (5.40)$$

5.3.4 Další možnosti získání ztrátových koeficientů

Ztrátové koeficienty pro daný ejektor lze také získat po naměření charakteristiky ejektoru a následně dané body proložíme křivkou, pomocí definice účinnosti ejektoru z rovnice (5.14):

$$\eta = M \cdot N \quad (5.14)$$

kde N je z rovnice (5.14) tím do rovnice dostaneme ztrátové koeficienty které získáme z optimálně proložené křivky přes body z měření. Vypočet dle literatury [20]

Další možnost výpočtu účinnosti dle literatury [12]:

$$\eta = CM \frac{2\mu \frac{(1-\omega)^2}{(1+\mu)^2} + (1-\xi) \frac{(\omega+\mu)^2}{(1+\mu)^2} - \frac{\omega^2}{\varphi_2^2}}{\frac{1}{\varphi_1^2} - 2\mu \frac{(1-\omega)^2}{(1+\mu)^2} - (1-\xi) \frac{(\omega+\mu)^2}{(1+\mu)^2}} \quad (5.41)$$

kde φ_1 a φ_2 jsou rychlostní součinitelé vstupních trysek ($\varphi_1 = 0,97$; $\varphi_2 = 0,98$) a ξ je součtový ztrátový součinitel:

$$\xi = \xi_{směšovací\ komora} + \xi_{difuzor} + \frac{1}{\left(\frac{A_4}{A_3}\right)^2} \quad (5.42)$$

Poslední člen v rovnici představuje ztrátu konečným rozšířením difuzoru

ω je poměr vstupních rychlostí:

$$\omega = \frac{V_2}{V_1} \quad (5.43)$$

μ je poměr vstupních průřezů

$$\mu = \frac{A_1}{A_2} \quad (5.44)$$

Mnoho teorií navrhlo různé ztrátové koeficienty, které jsou vhodné pro specifické ejektory. Různé ztrátové koeficienty navržené podle různých teorií jsou uvedeny níže v tabulce č. 2. [21]

Tabulka 2- Ztrátové koeficienty navržené různými teoriemi [21]

K_n	K_s	K_t	K_d	$K_t + K_d$
0.15	0	0.28	0.10	0.38
0.10	0	-	-	0.30
0.03	0	-	-	0.20
0.09	0.008	0.098	0.102	-

Dále můžeme koeficient K_n dopočítat z Reynoldsova čísla dle [21]:

$$K_n = \frac{379}{R_e^{0.63}} \quad (5.49)$$

Z literatur výše můžeme vidět, že klíčovou hodnotou pro navrhování ejektoru jsou ztrátové koeficienty. Které můžeme navrhovat dle různých kritérií.

6 Praktická část

V této části práce byla upravována tryska z jiné diplomové práce [2]. Tento ejektor byl poskytnut v laboratořích ústavu.

Cílem práce je zaměřit se na tvar průtočné plochy trysky a její polohu vůči sekundárnímu toku. Polohování trysky vůči sekundárnímu toku bylo u ejektoru vyřešeno pomocí distančních kroužků s různými tloušťkami. Různé tvary průtočných ploch byly navrženy spolu s úpravou trysky pro snadnou výměnu těchto ploch.

Následně byly zpracovány numerické simulace jednotlivých variant trysek a správnost těchto simulací byla experimentálně ověřena.

6.1 Ejektor pro experimenty

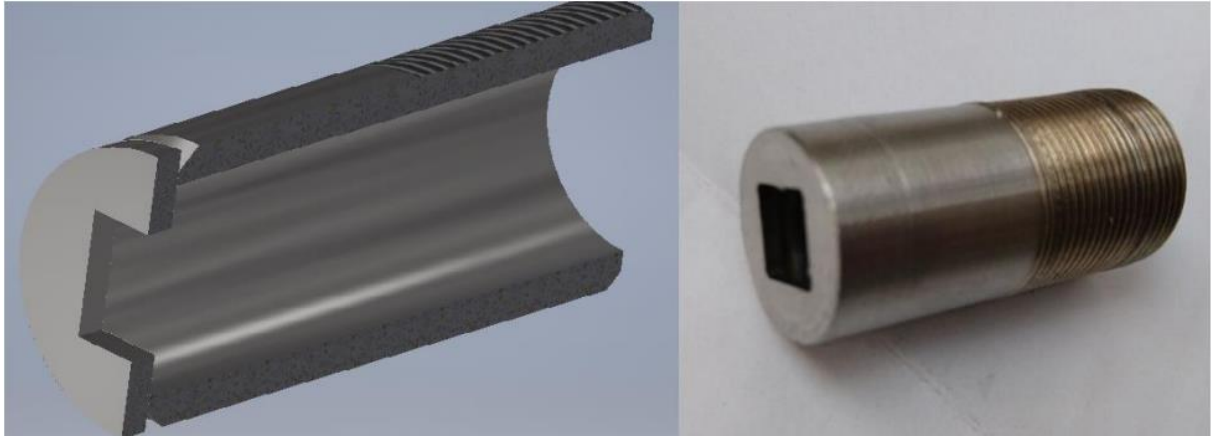
Na obrázku níže je ejektor, který byl k dispozici pro experimenty. Na tomto ejektoru byla provedena jednotlivá měření.



Obrázek 27- Ejektor pro experimenty [2]

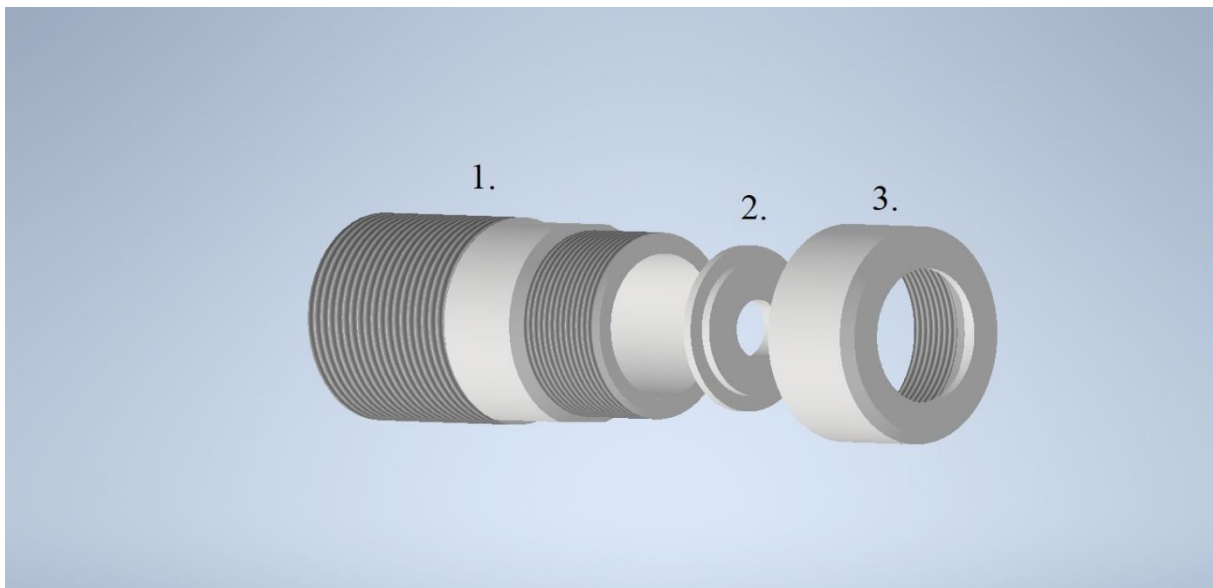
6.2 Úprava trysky stávajícího ejektoru

Pro tento ejektor jsme museli upravit trysku abychom mohli snáze vyměňovat průtočné plochy. Na obrázku níže je zobrazena původní tryska. Tato tryska měla čtvercový průřez o straně 9 mm a hloubce 2 mm, vnitřní průměr trysky je 15 mm.

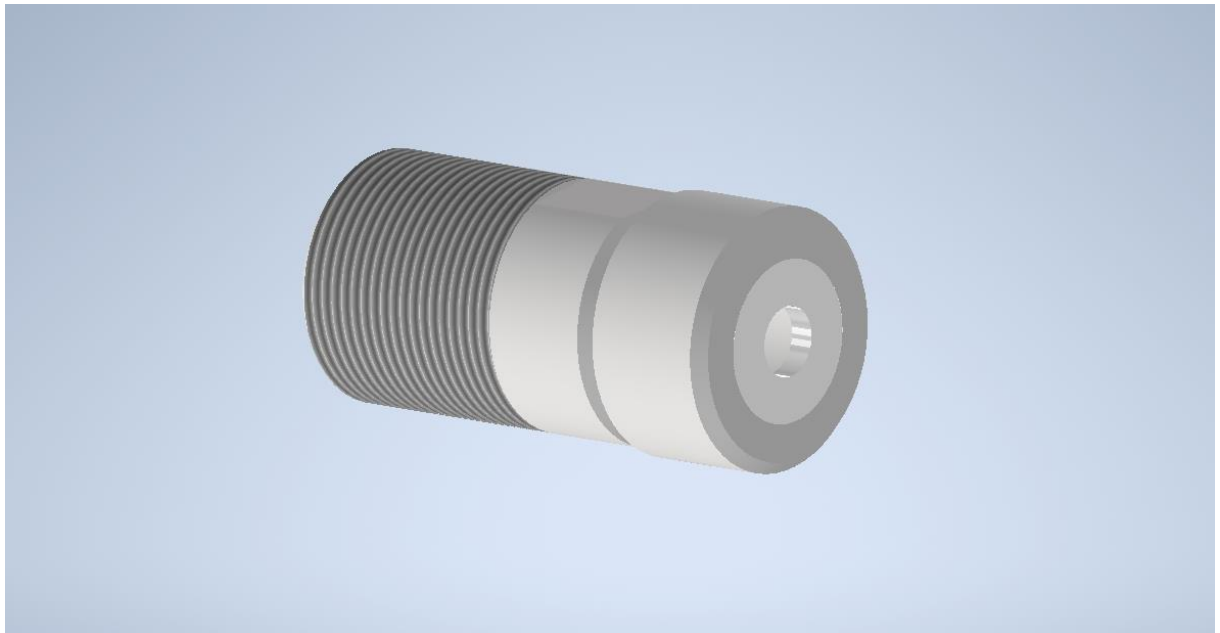


Obrázek 28- Původní tryska [2]

Nová tryska zkonstruovaná v této práci se skládá ze tří částí – tělo trysky (1), průtočné desky (2) a převlečné matice (3), je zobrazena na obrázku č. 29, 30, 31. Průtočná deska je vyměnitelná za různé varianty průtočných desek. Na obrázku č. 29 je kruhová průtočná deska, další typy desek jsou v kapitole 6.3. Vnitřní průměr trysky jsme museli zmenšit na 14 mm abychom mohli zachovat vnější průměr celé trysky, to umožnilo přidat zavít na vnější stranu trysky, na který se šroubuje převlečná matice. Hloubka průtočné desky je taktéž 2 mm.



Obrázek 29- Model nové trysky



Obrázek 30- Model sestavené trysky



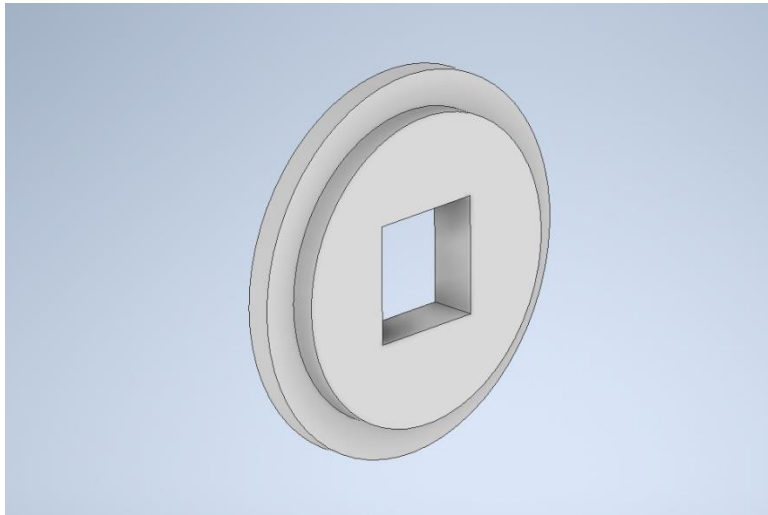
Obrázek 31- Nová tryska – před montáží (vlevo) a po montáží (vpravo)

6.3 Volba průtočných desek pro trysku

V této kapitole bylo navrženo několik různých průtočných desek pro trysku. Všechny trysky mají stejnou průtočnou plochu.

Čtvercová průtočná deska

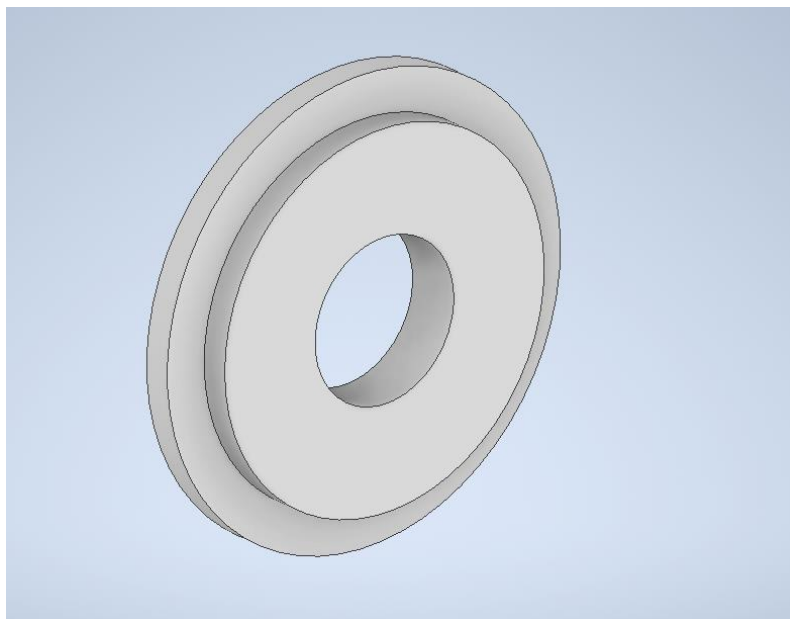
První průtočná deska na obrázku č. 32 je čtvercová, která odkazuje na původní trysku kde také byla použita čtvercová tryska.



Obrázek 32- Čtvercová průtočná deska

Kruhová průtočná deska

Další typ je kruhová průtočná deska, která je asi ze všech tvarů nejrozšířenější. Na obrázku č. 33.

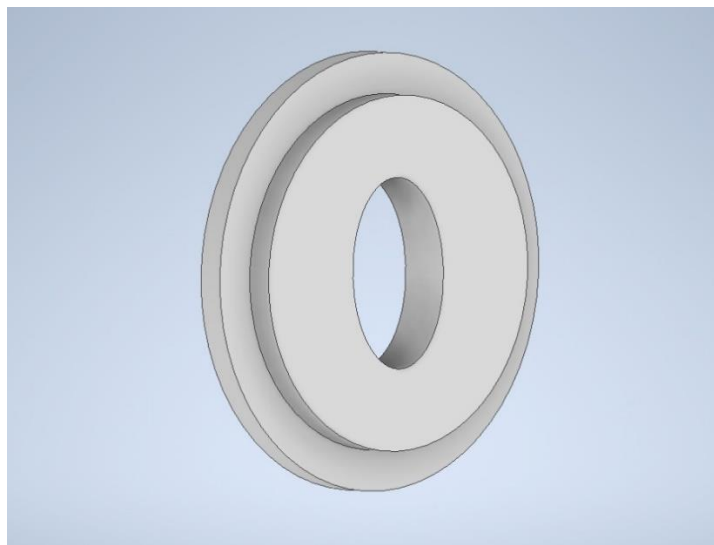


Obrázek 33- Kruhová průtočná deska

Elipsa

Další průtočnou deskou je elipsa. Obecně platí že excentricita elipsy mezi 0,5 a 0,8 by mohla být vhodná pro mnoho aplikací. Excentricita blízká nule se tvarově blíží kruhu, proto volím excentricitu v horním rozmezí, abych měl rozdílné výsledky od kruhové trysky a mohl porovnávat výsledky. Výsledná excentricita této elipsy je 0,76. Po zvětšení elipsy v kapitole 7.5.2 je excentricita 0,66.

Elipsa byla testovaná ve dvou polohách, jednou na výšku, aby pod sekundárním vstupem vzduchu byla nejužší část elipsy, poté na šířku, aby pod sekundárním vstupem vzduchu byla co nejširší část elipsy (naležato). Elipsa je zobrazena na obrázku číslo 34.



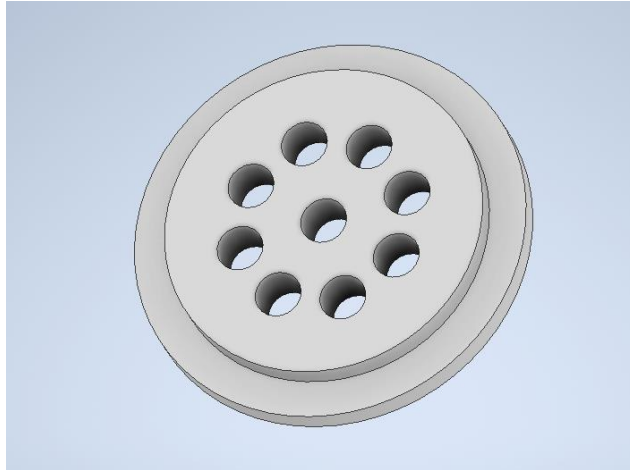
Obrázek 34- Průtočná deska s tvarem elipsy

Více děrové průtočné desky

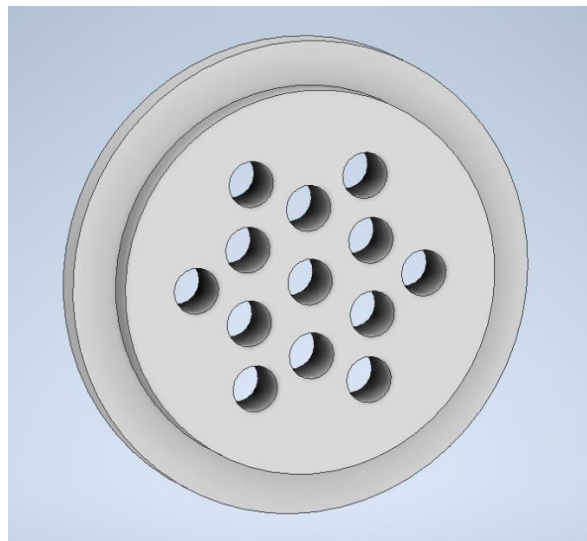
Další desky na testování jsou více děrové průtočné desky. Bylo testováno 7 (obr. č. 35), 9 (obr. č.36) a 13 děr (obr. č. 37).



Obrázek 35- Více děrová průtočná deska 7 děr



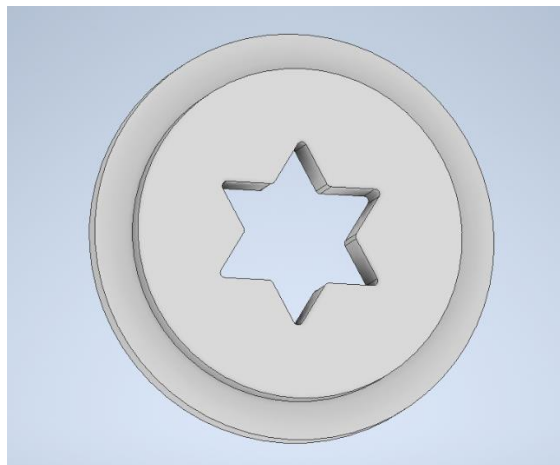
Obrázek 36- Více děrová průtočná deska 9 děr



Obrázek 37- Více děrová průtočná deska 13 děr

N-cípá hvězda

Další možností tvaru trysky je hvězda, obecné doporučení je mezi 5-8 cípy. Já volím v této práci 6 cípů.



Obrázek 38- Průtočná plocha do tvaru hvězdy- 6 cípů

7 Numerická simulace

Pro porovnání jednotlivých variant průtočných desek bylo použito numerické simulace.

7.1 Základní metody modelování turbulence

Turbulence je náhodný pohyb částic tekutiny s různě velkými víry. Velké víry mají většinu energie, která se rozpadá na menší víry, až se přemění na teplo. Modelování turbulence je klíčové v simulacích proudění (CFD), protože většina inženýrských aplikací je turbulentní a potřebuje vhodný turbulentní model. Neexistuje univerzální model pro všechny situace; výběr závisí na typu toku, požadované přesnosti, dostupné technice a času simulace.

Rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice se v CFD řeší různými metodami. Direct Numerical Simulation (DNS) pokrývá všechny fluktuace, ale je výpočetně náročná. Large Eddy Simulation (LES) filtruje malé fluktuace a řeší jen část spektra. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) střeďuje veličiny v čase a je nejpoužívanější díky nižším nárokům. Metody DNS, LES a RANS lze kombinovat podle potřeb simulace. [22]

7.1.1 RANS modely turbulence ve FLUENTu

V této části budou popsány některé modely turbulence založené na Reynoldsově středování, které nabízí CFD program FLUENT.

7.1.1.1 Modely $k-\varepsilon$

Modely $k-\varepsilon$ jsou dvourovnicové modely turbulence, které určují délkové a časové měřítko pomocí dvou transportních rovnic. Jsou nejčastěji používané v průmyslových výpočtech. Všechny tři varianty $k-\varepsilon$ (Standard, RNG a Realizable) řeší rovnice pro veličiny k a ε a modelují Reynoldsova napětí pomocí turbulentní viskozity na základě Boussinesquovy hypotézy. Rozdíly mezi nimi spočívají ve stanovení turbulentní viskozity, hodnotách turbulentních Prandtlových čísel ovlivňujících difuzi k a ε , a podmínkách generace a zániku ε v transportní rovnici. [22]

7.1.1.2 Modely $k-\omega$

Modely $k-\omega$ jsou dvourovnicové modely turbulence, podobně jako modely $k-\varepsilon$, a řeší dvě dodatečné diferenciální rovnice. Výhodou rovnic pro specifickou disipaci energie je možnost integrace přes viskózní podvrstvu bez dalších podmínek. Modely $k-\omega$ lépe předpovídají záporný tlakový gradient, chování mezní vrstvy a odtržení proudění. Model SST (Spalart-Allmaras) se liší od standardního $k-\omega$ tím, že přechází z modelu $k-\omega$ blízko stěn na model $k-\varepsilon$ dál od stěn pro vyšší Reynoldsova čísla. Má také upravenou formulaci turbulentní viskozity, která zohledňuje transport hlavních turbulentních smykových napětí. [22]

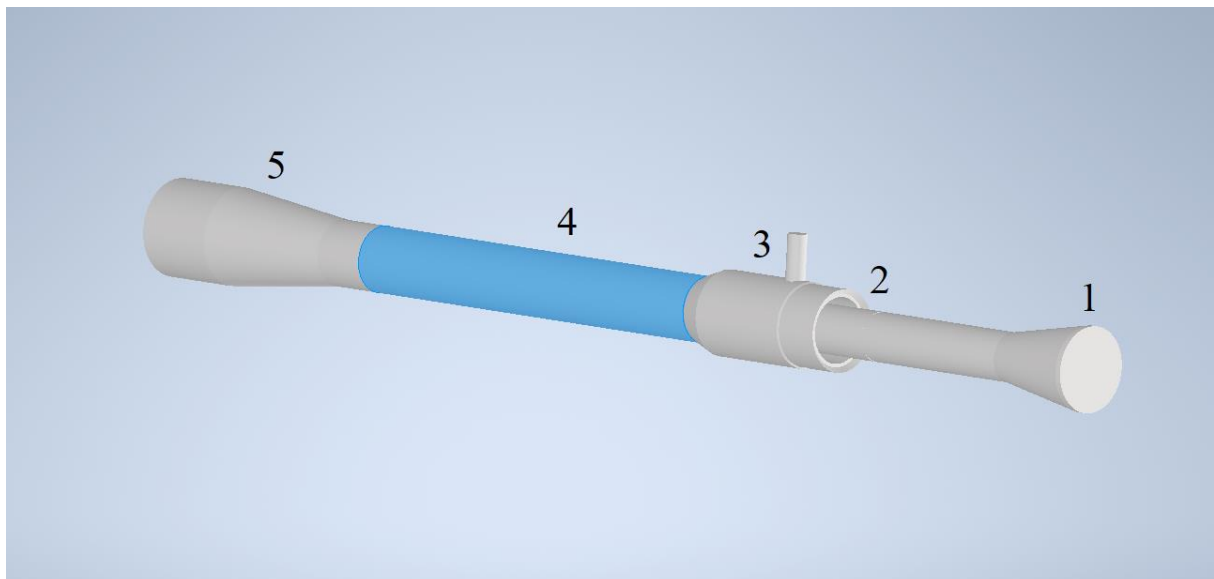
7.2 Popis tvorby modelu pro CFD simulaci

Nejprve byl třeba vytvořit model ejektoru pro tvorbu výpočtové sítě. V programu Autodesk Inventor 2020 byl vymodelován vnitřek zařízení bez stěn, tedy prostor, ve kterém bude probíhat numerická simulace. Stěny budou určeny pouze okrajovou podmínkou. Model se skládá z pěti částí:

- 1) Vstupní část
- 2) Tryska
- 3) Směšovací komora
- 4) Směšovací trubice
- 5) Difuzor

Jednotlivé části jsou na obrázku č. 39.

Geometrie celého ejektoru je už daná, používá se ejektor, který už byl zkonstruován, tudíž k němu existují výkresy, podle kterých šel model vytvořit. Tato práce se zaměřuje na tryšku, která u tohoto ejektoru je čtvercového tvaru, Tuto tryšku bylo možné měnit a zkoušet různé tvary trysek při stejné průtočné ploše. Taktéž jsme změnili vzdálenost mezi tryškou a vstupem sekundárního media.



Obrázek 39- Inventor 2020 - tvorba modelu

V této práci se měnila na modelu část 2 a 3. Dle různých průtočných desek a odsazením trysky pro vstup sekundárního media.

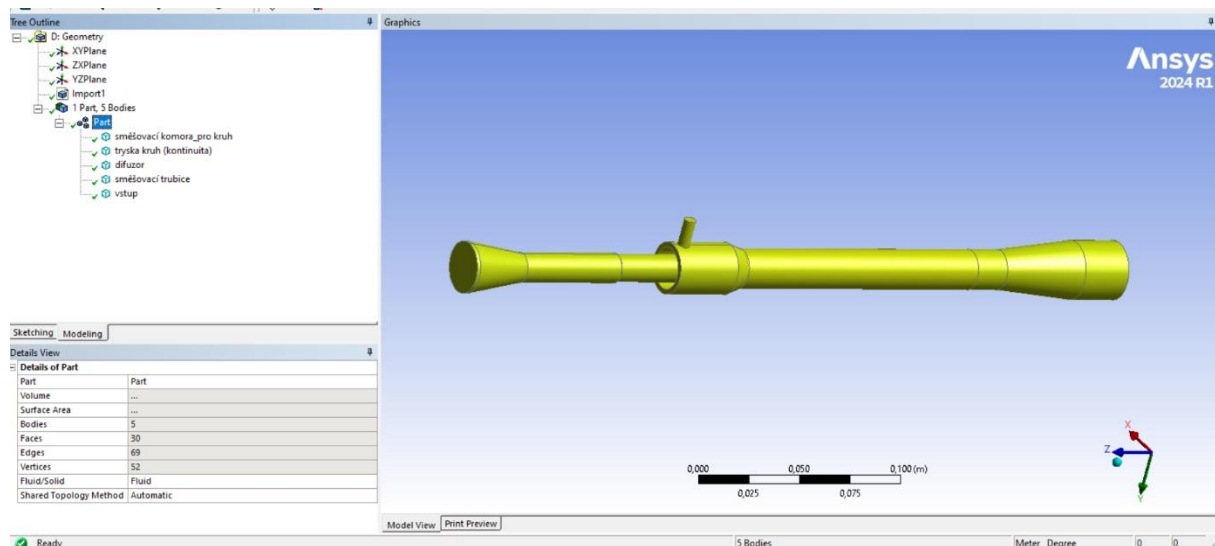
7.3 Program ANSYS

7.3.1 ANSYS workbench

Platforma ANSYS Workbench je prostředí, které sdružuje široké spektrum pokročilých technologií použitých v simulačních programech od společnosti ANSYS. V tomto prostředí jsme udělali CFD simulaci. Byla použita verze Workbench 2024 R1.

7.3.2 Geometrie

První záložka, která se použije je geometrie, která slouží k vytvoření nebo nahrání geometrie do programu. Do programu ANSYS byla nahraná geometrie z Autodesk Inventor 2020. Pro nahrání modelu musel být model převeden ve formátu .STEP a následně nahrán DesignModelerem programu ANSYS. Náhled do programu je na obrázku č. 40.



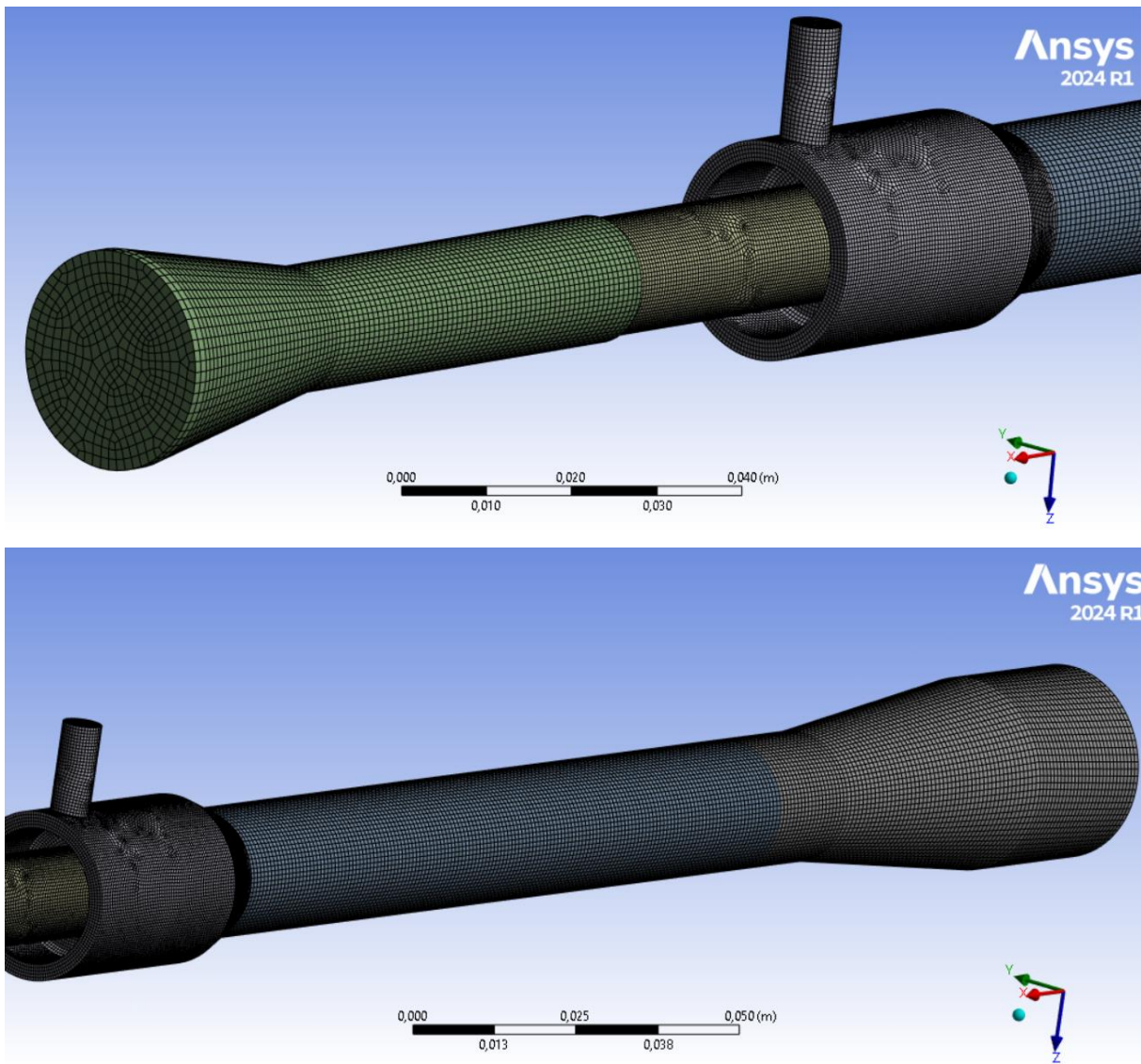
Obrázek 40- Geometrie – DesignModeler

V této záložce jsme ještě jednotlivé části modelu sjednotili do jednoho celku (1 Part – 5 Bodies), aby při tvorbě sítě jednotlivé části na sebe navazovaly se sítí.

7.3.3 Tvorba sítě (mesh)

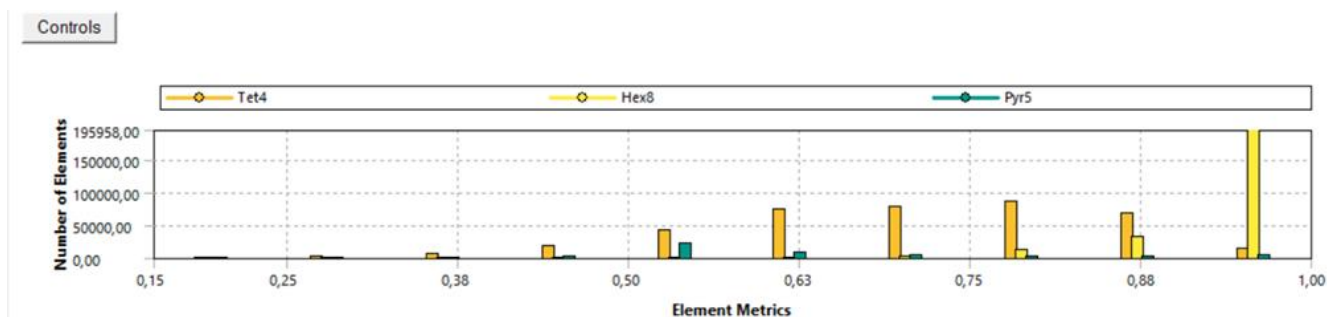
V této záložce se tvoří síť. To znamená že řešená oblast je rozdělena na velký počet malých kontrolních objemů (buněk), které mají definovaný tvar. Snažíme se o to, aby síť byla tvořena polyhedrálovou sítí. Tato síť je nejlepší pro přesnost řešení a taky její konvergenční. Naopak ne tak žádaná síť je tetrahedrálová síť.

Pro dosažení polyhedrálové sítě jsme použili metodu sweep pro část 5,4 pro část 3,2 byla použita metoda multizone. Část 1 byla vygenerována automaticky. Velikost sítě byla nastavena na 0,9 mm a v místě 2,3 byla použita velikost 0,5 mm. Počet elementů je 671 929. Ukázka použité sítě je na obrázku č. 41 a její kvalita je zobrazena níže na obrázku č. 42. Kritérium nabývá hodnot od 0 od 1, kdy 0 znamená nejhorší, 1 nejlepší kvalitu. Průměrná hodnota kvality sítě je 0,78.



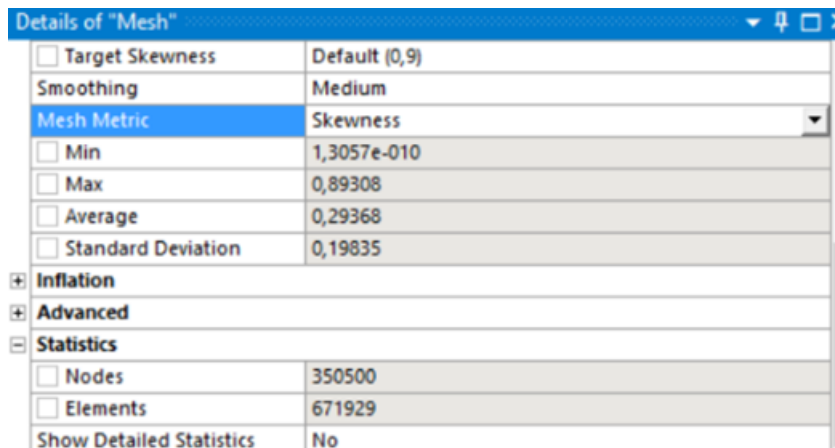
Obrázek 41- Ukázka sítě

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,15261
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,78709
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,16779
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	350500
<input type="checkbox"/> Elements	671929
Show Detailed Statistics	No

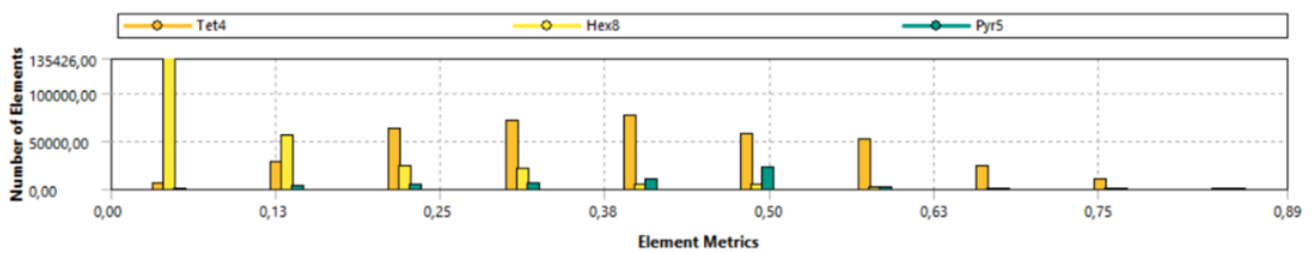


Obrázek 42- Kvalita sítě

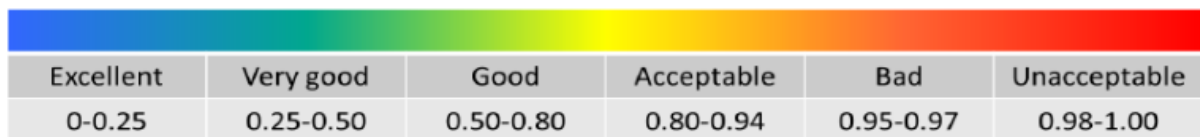
Dalšími metrikami pro měření kvality sítě je *Skewness* (nesouměrnost) kdy se posuzuje, jak hodně se element svým tvarem blíží ideálnímu pravidelnému geometrickému tvaru v souladu s odpovídajícím schématem sítě. Pokud je element jakkoliv deformován, je její kvalita horší. Obecně se kvalita každého elementu vyjadřuje bezrozměrným číslem v rozsahu 0–1, kde 0 znamená výsledek nejlepší a naopak 1 výsledek nejhorší, tedy problematický element pro výpočty. Průměrná hodnota pro tuto síť je 0,29. Detailní rozložení hodnot je na obrázku 43.



Controls



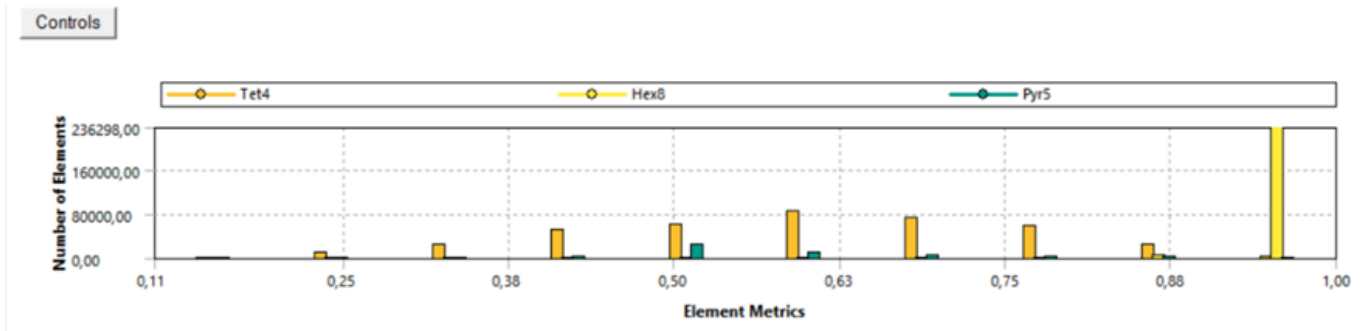
Obrázek 43-Skewness



Obrázek 44- Měřítka posouzení kvality sítě dle Skewness [23]

Další měřítko pro posouzení kvality je míra kolmosti elementu (Orthogonal quality). Hodnota tohoto parametru je pro prostorové prvky počítána pomocí normálových vektorů jednotlivých ploch prvku, vektorů směřujících z těžiště prvku k těžištím přilehlých prvků a vektorů směřujících z těžiště prvku ke středům ploch prvku. Kritérium nabývá hodnot od 0 od 1, kdy 0 znamená nejhorší, 1 nejlepší kvalitu. Průměrná hodnota pro tuto síť je 0,73. Detailní rozložení hodnot je na obrázku 45.

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,10692
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,73448
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,22388
<input type="checkbox"/> Inflation	
<input type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	350500
<input type="checkbox"/> Elements	671929
Show Detailed Statistics	No



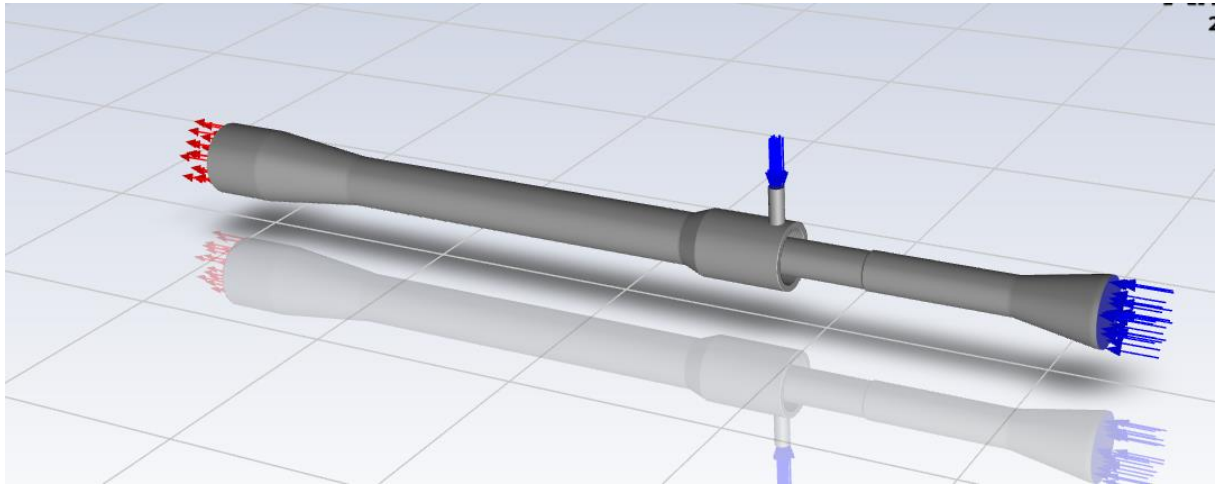
Obrázek 45- Orthogonal quality

Orthogonal Quality Legend					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Obrázek 46-Měřítka posouzení kvality sítě dle Orthogonal quality [23]

7.3.4 Nastavení numerické simulace v programu Fluent

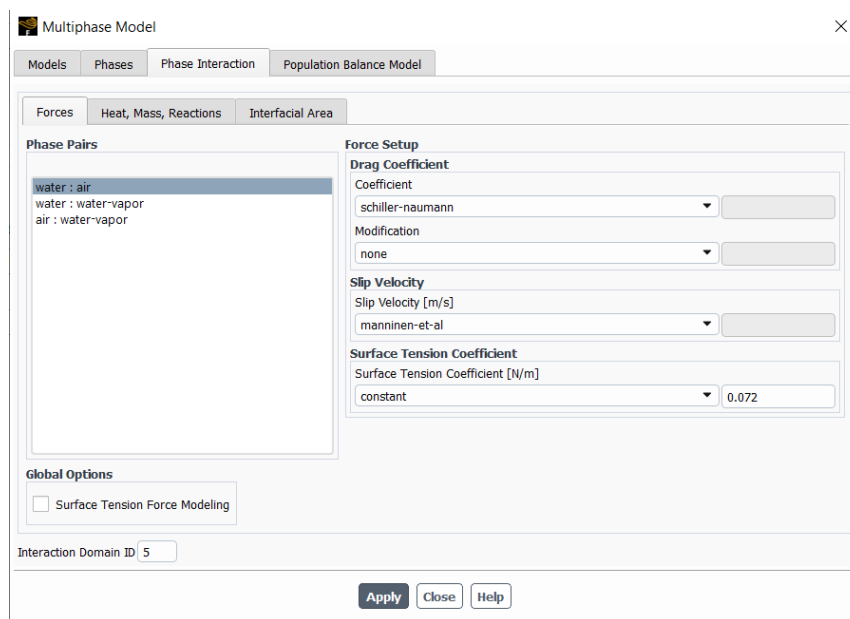
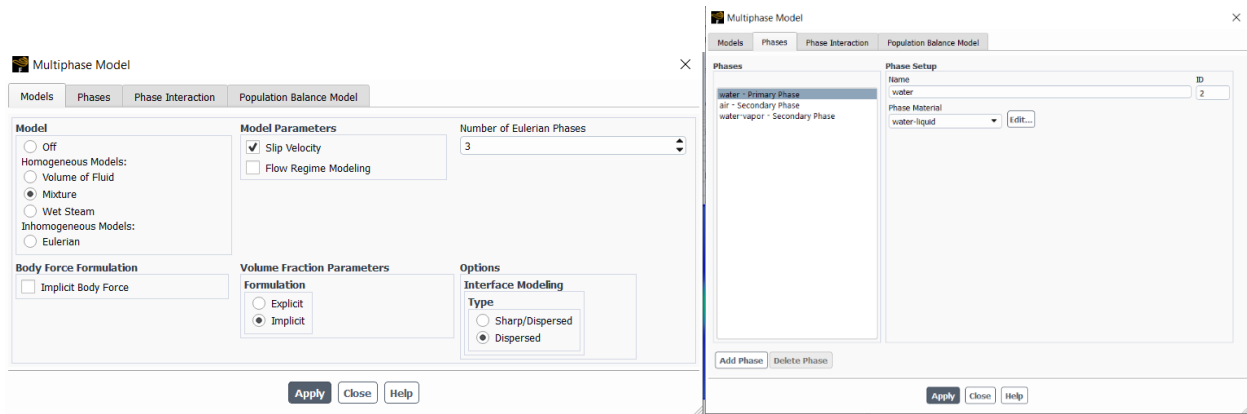
V této fázi jsme nastavili výchozí hodnoty pro výpočet. Jednotlivá nastavení řešiče bylo popsáno v této kapitole. Na obrázku 47 je zobrazeno prostředí Fluentu.



Obrázek 47- Ejektor Ansys

7.3.4.1 Nastavení vícefázového toku

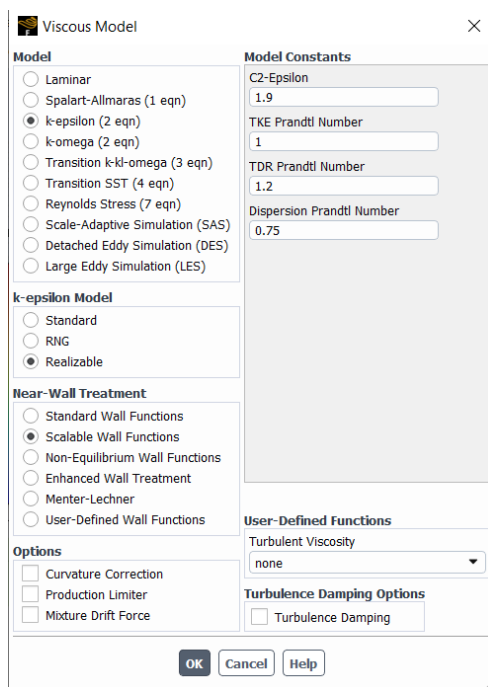
Pro tuto simulaci byl použit vícefázový model mixture s třemi fázemi: water-liquid, air a water-vapor. Vodní páry tam byly dodány z důvodu, že Fluent potřebuje dodat mezifázi mezi vzduchem a vodou bez této třetí fáze nedocházelo ke směšování. Dále bylo nastaveno povrchové napětí mezi vodou a vzduchem a to na $0,072 \text{ N/m}$. Zbytek byl nechán na výchozím nastavení. Nastavení je na obrázku č. 48.



Obrázek 48- Nastavení vícefázového toku

7.3.4.2 Výpočtový model turbulentního proudění

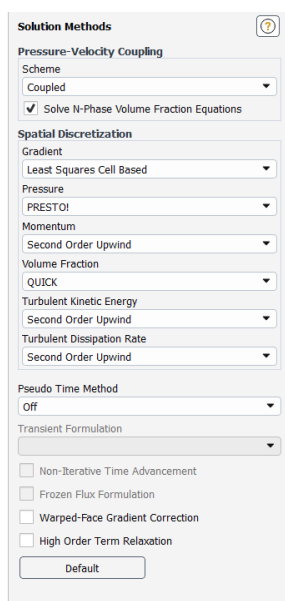
Po ozkoušení několika simulací a také rad kolegů, byl použit k-epsilon Realizable řešič s Scalable wall function, který nejlépe konvergoval. Nastavení viz. obrázek 49.



Obrázek 49- Nastavení modelu turbulentního proudění

7.3.4.3 Nastavení řešiče

Program byl nastavený pro výpočet s vyšší přesností řešení. A také byla zaškrtnuta možnost – Solve N-Phase Volume Fraction Equations bez této volby řešení nekonvergovalo. Nastavení viz. obrázek č. 50



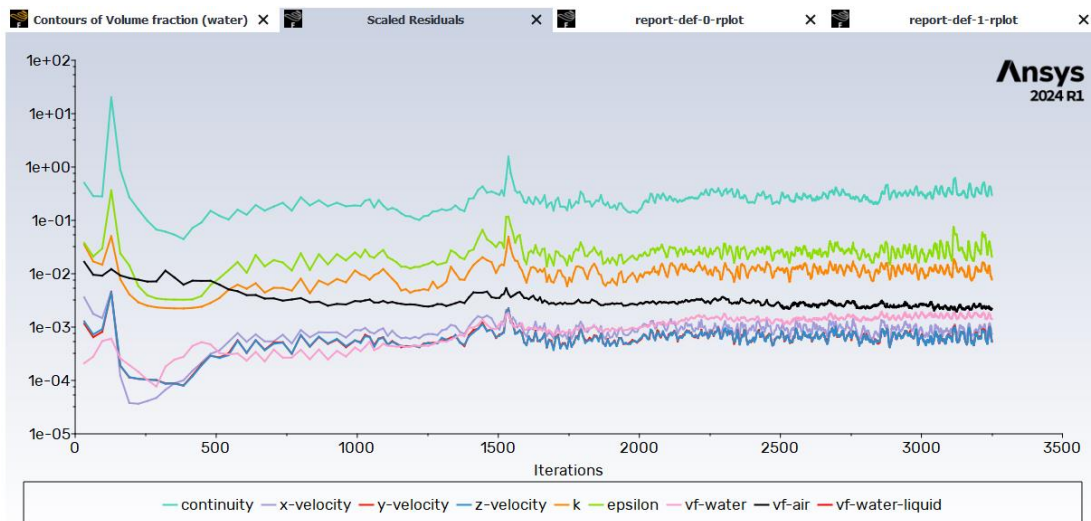
Obrázek 50- Nastavení řešiče

7.3.4.4 Okrajové podmínky

Na vstupu ejektoru byla okrajová podmínka Mass Flow Inlet, byl tedy zadán hmotnostní tok vody. Na vstupu přísávaného vzduchu byla okrajová podmínka Pressure Inlet, vzduch je přísávan z atmosféry, takže byl zvolen atmosférický tlak. Na výstupu byla použita okrajová podmínka Pressure Outlet, kde byl nastaven tlak za zařízením, s tím že dochází k vypouštění do prostředí, kde je voda.

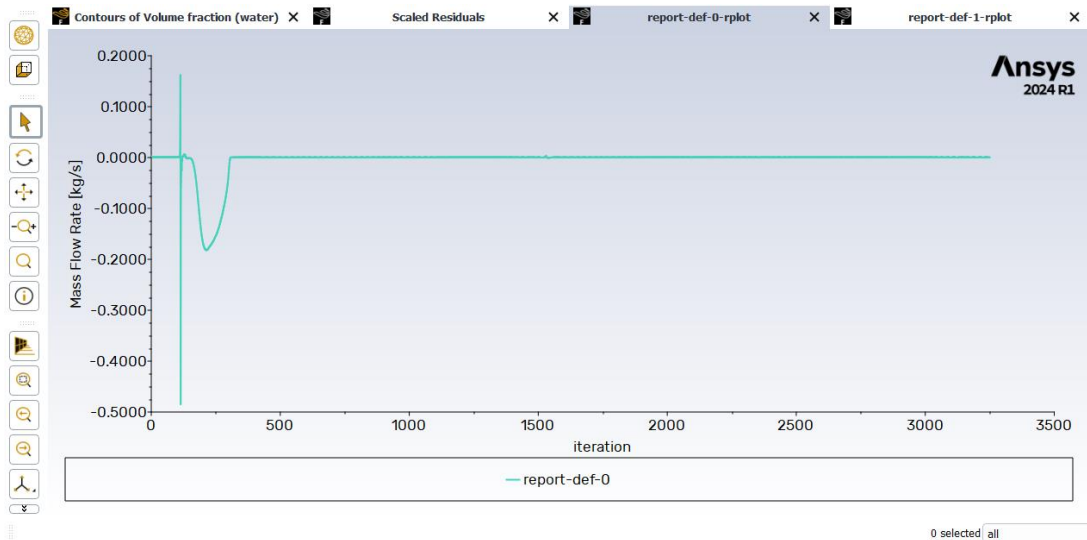
7.3.4.5 Řešení

Během numerického výpočtu byla sledována residua (na obrázku 51) a také hmotnostní tok na vstupu vzduchu (obrázek 52) a také hmotnostní tok na výstupu z ejektoru (obrázek 53). Iterací bylo provedeno přes tři tisíce, abychom se ujistili že nedojde k žádné divergenci řešení. Také pro méně iterací se řešení dostatečně nepropočítalo na konec ejektoru (voda se vzduchem ve směšovací trubici se nepromíchaly).

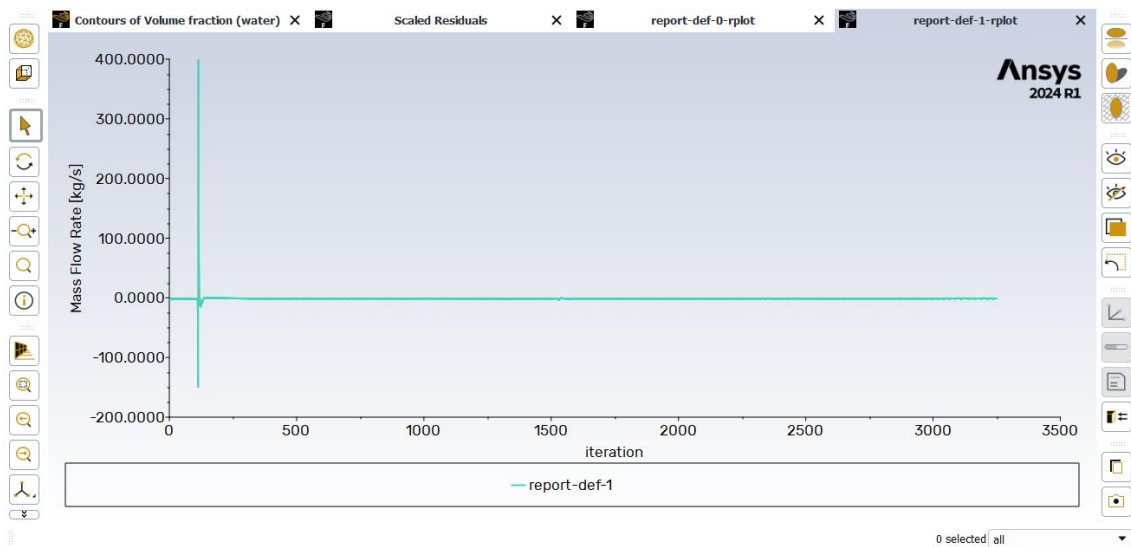


Obrázek 51- Residua

Na obrázku 52 a 53 vidíme průběh hmotnostních toků, bohužel na začátku výpočtu došlo k velkému vychýlení tudíž se graf oddálil a vypadá, že hmotnostní průtoky jsou nulové. Nejsou, jen jsou v jiném řádu než y-nová osa. Hodnoty lze sledovat v průběhu výpočtu a došlo k ustálení.

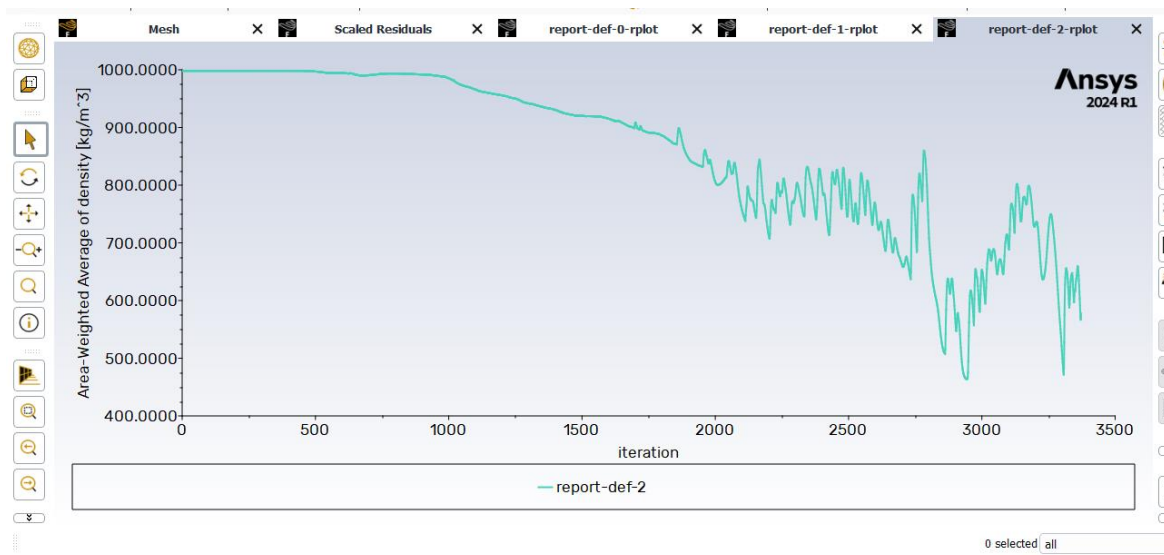


Obrázek 52- Hmotnostní tok na vstupu vzduchu



Obrázek 53- Hmotnostní tok na výstupu z ejektoru

Také se zjistilo že je dobré sledovat hustotu směsi voda-vzduch na výstupu z ejektoru, můžeme pozorovat že se to začíná míchat až od 1500 iterací (na obrázku 54). Proto volím pro každý výpočet přes 3000 iterací. Samozřejmě by bylo vhodné počkat na ustálení, ale pro přibližné zhodnocení jednotlivých trysek jsem se rozhodl že to bude dostatečující, s ohledem na výpočetní čas.



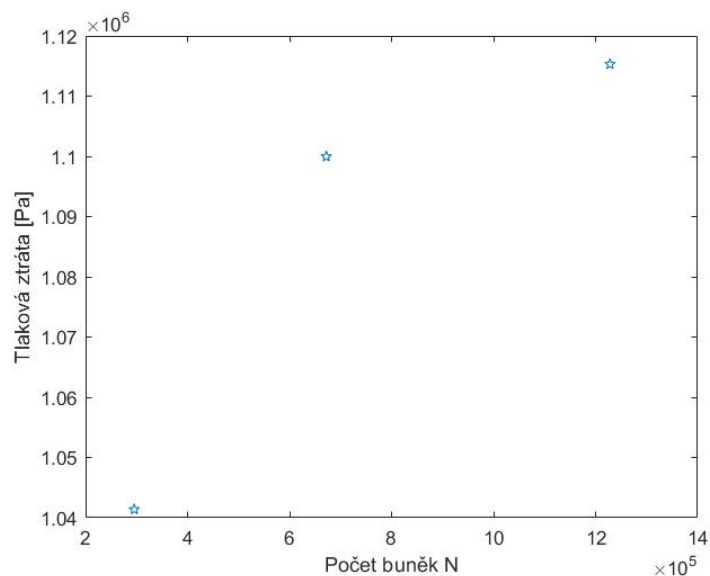
Obrázek 54- Hustota směsi voda-vzduch na výstupu z ejektoru

7.4 Citlivostní analýza na velikost sítě

Provedená analýza má vliv hlavně na přesnost a použitelnost. Pro analýzu vlivu počtu elementů na přesnost jsou potřeba tři, z hlediska počtu elementů dostatečně odlišné sítě. Je vhodné, aby byl faktor zjemnění větší než 1,3. Cílem následujících výpočtů je stanovit interpolovanou hodnotu sledované veličiny (v našem případě tlakové ztráty na vstupu do ejektoru), která je z hlediska použitého výpočetního modelu přesná. Je to hodnota, kterou dostaneme, při nekonečném počtu elementů sítě. Tuto hodnotu použijeme pro výpočet relativní odchylky a GCI indexu pro různé husté sítě. Nakonec zjistíme, jestli vybraná síť má dostatečnou přesnost. Počty elementů, odpovídající tlakové ztráty a výsledky výpočtu GCI indexu jsou v tabulce níže. Výsledky výpočtu GCI indexu jsou vykresleny v grafu níže. Tento výpočet je provedený ve výpočtovém programu Matlab do kterého nahrajeme velikosti jednotlivých sítí a vypočtené tlakové ztráty z Fluentu. Tyto hodnoty byly spočteny pro trysku kruhového průřezu s hmotnostním tokem 1,1 kg/s.

Tabulka 3- Citlivostní analýza

Síť	Počet buněk N	Tlaková ztráta [Pa]	Faktor zjemnění [-]	GCI index [%]
1.	295 469	1 041 376,20	-	-
2.	671 929	1 099 973,20	1,315	3,0364
3.	1 228 229	1 115 299,10	1,2227	1,277



Obrázek 55- Graf počet buněk – sledovaná veličina

Pro další výpočty bude používána síť číslo 2 s počtem elementů 671 929. Odchylku tlakové ztráty 3,0364 % této sítě od extrapolované hodnoty tlakové ztráty považuji v porovnání s větší sítí za dostačující. Hodnota faktoru zjemnění mezi sítí 2 a 3 je menší než 1,3 což znamená, že sítě nejsou z hlediska počtu resp. velikosti elementů dostatečně odlišné. Síť s větším počtem elementů jsem nepoužil, protože u příliš jemných sítí docházelo ke dlouhému výpočtu (několik týdnů).

7.5 Výsledky simulací

V této kapitole jsou prezentované výsledky simulací. Nastavení programu bylo u všech trysek stejné, jak je popsáno v předchozích kapitolách. Také vytvoření sítě u všech trysek bude probíhat stejně, a budeme se držet kolem 700 000 elementů abychom se drželi podobné chyby sítě. Každá síť bude počítaná pro více jak 3000 iterací. Následně byly jednotlivé simulace porovnány.

7.5.1 Výsledky prvních simulací

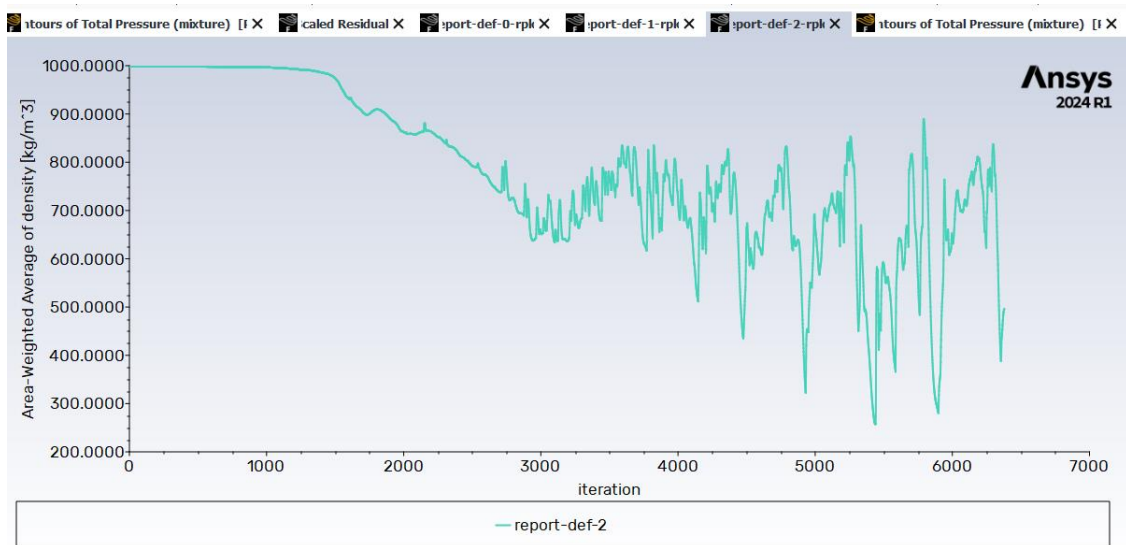
Pro porovnání trysek byl použit hmotnostní tok na vstupu ejektoru 0,9 kg/s podobná hodnota která byla použita pro tento ejektor v jiné diplomové práci, avšak průtočná plocha byla změněna na 25 mm² z 81 mm². Výsledky simulací jsou v tabulce č. 4

Tabulka 4- Výsledky prvních simulací

Průtočná plocha 25 mm ²			
typ trysky	čtvercová	kruhová	elipsa – šířka
počet iterací	6454	6123	6500
hmotnostní tok na vstupu vody [kg/s]	0,9	0,9	0,9
hmotnostní tok na vstupu vzduchu [kg/s]	0,00172	0,000849	0,00209
Objemový průtok na vstupu vody [m ³ /s]	0,000901	0,000901	0,000901
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m ³ /s]	0,00140	0,000693	0,00171
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,225	1,225	1,225
hustota vody [kg/m ³]	998,2	998,2	998,2
hustota směsi v celém objemu [kg/m ³]	753,2	720,77	722,26
tlak na výstupu [Pa]	126642	121567	125298
rychlost na výstupu [m/s]	4,84	2,26	4,06
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	101325	101325	101325
rychlost na vstupu vzduchu [m/s]	50,26	22	60,07
tlak na vstupu vody [Pa]	1083940	740821	1301903
rychlost na vstupu vody [m/s]	1,7	1,7	1,7
účinnost [%]	4,13	2,51	3,86

Další simulace se nedělaly z důvodu vzniku pulzací (ejektor přerušovaně přisával vzduch), to následně potvrdily i experimenty kde byla testována kruhová tryska s tímto průřezem. Takže nedocházelo k ustálení při výpočtu. To můžeme sledovat níže na obrázku 56. Taktéž byl problém s příliš velkou tlakovou ztrátou. Po snížení průtoku zase nedocházelo k podtlaku a přisávání vzduchu na sekundárním vstupu ejektoru.

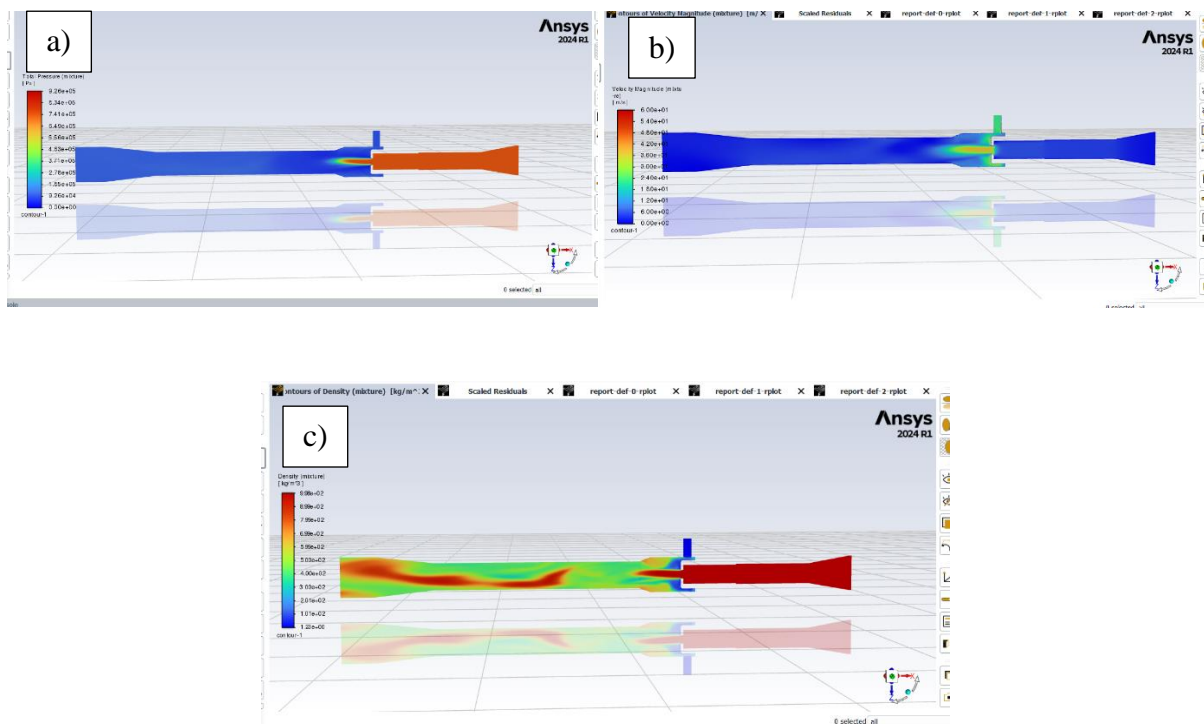
V tabulce č.4 si můžeme všimnout parametru hustoty směsi, a vidíme že je přisáváno více vzduchu ale hodnoty se moc nemění to může mít za následek zmíněné pulzování, ačkoliv je přisáváno více vzduchu na vstupu, nestačí se ten vzduch propočítat do celého objemu ejektoru.



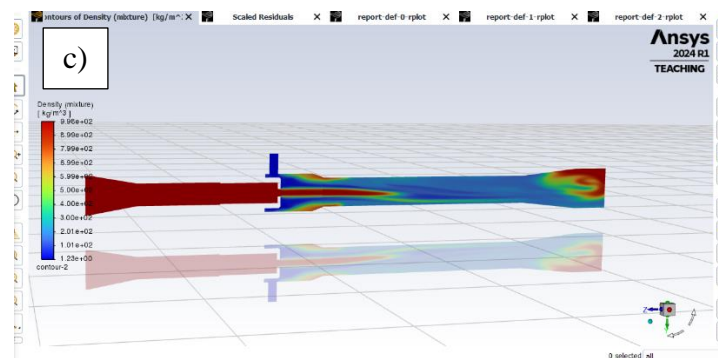
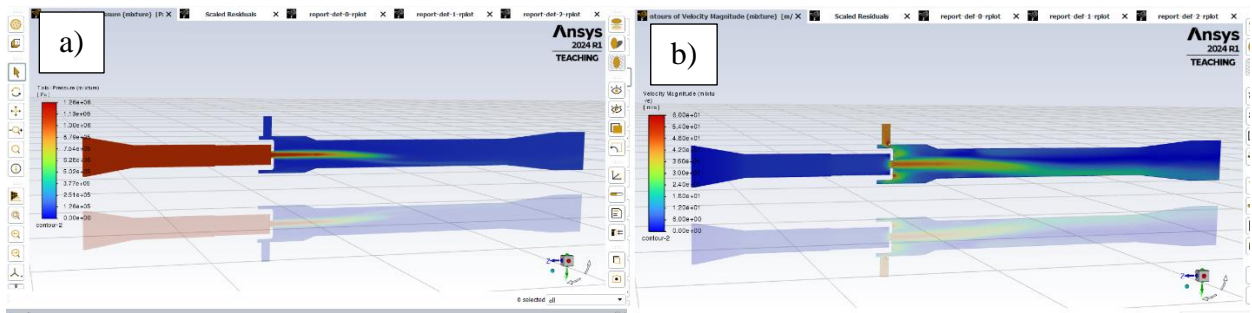
Obrázek 56- Průměrná hustota směsi na výstupu z ejektoru – pulzování

Na obrázku výše můžeme vidět, jak nám ejektor přisává vzduch přerušovaně, to sníží hustotu ve směsi na výstupu na okamžik, a to se celé opakuje a nedochází k ustálenému proudění.

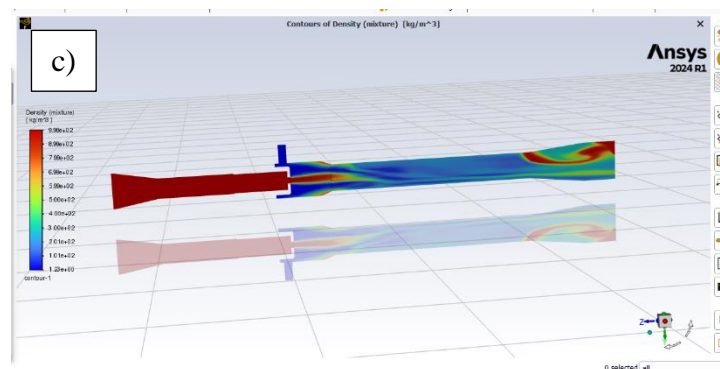
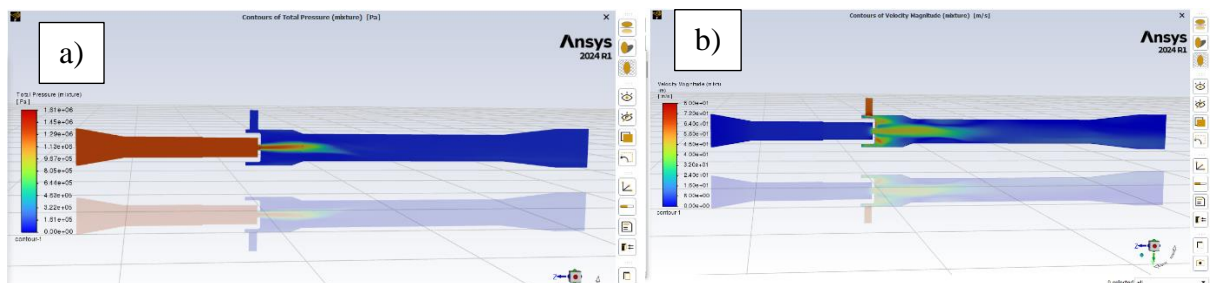
Níže si můžeme prohlédnout simulace jednotlivých trysek, a to celkový tlak, rychlost a hustotu směsi pro jednotlivé typy trysek se stejnou průtočnou plochou a stejným hmotnostním průtokem vody.



Obrázek 57- Kruhová tryska – a) Celkový tlak, b) Rychlost, c) Hustota směsi



Obrázek 58- Čtvercová tryska – a) Celkový tlak, b) rychlost, c) hustota směsi



Obrázek 59- Elipsa – šířka – a) Celkový tlak, b) rychlost, c) hustota směsi

7.5.2 Výsledky simulací – vliv průtoku

Tryska z předchozího řešení byla upravena na větší průtočný průřez (64 mm²) aby docházelo k sání vzduchu a předešli pulzacím ejektoru. Následně budeme simulovat změny průtoků, takže vytvoříme charakteristickou křivku ejektoru, tím získáme představu, pro jaký průtoky ejektor provozovat. Tyto simulace budeme dělat na trysce kruhového průřezu. Účinnost jednotlivých variant je počítána dle vzorce:

$$\eta = M \cdot N \quad (5.14)$$

Kde

M je poměr objemových průtoků dle vzorce (5.2)

N je poměr tlakových poměrů spočítaný dle vzorce (5.1)

V tabulce č. 5 jsou zobrazeny hodnoty z numerické simulace.

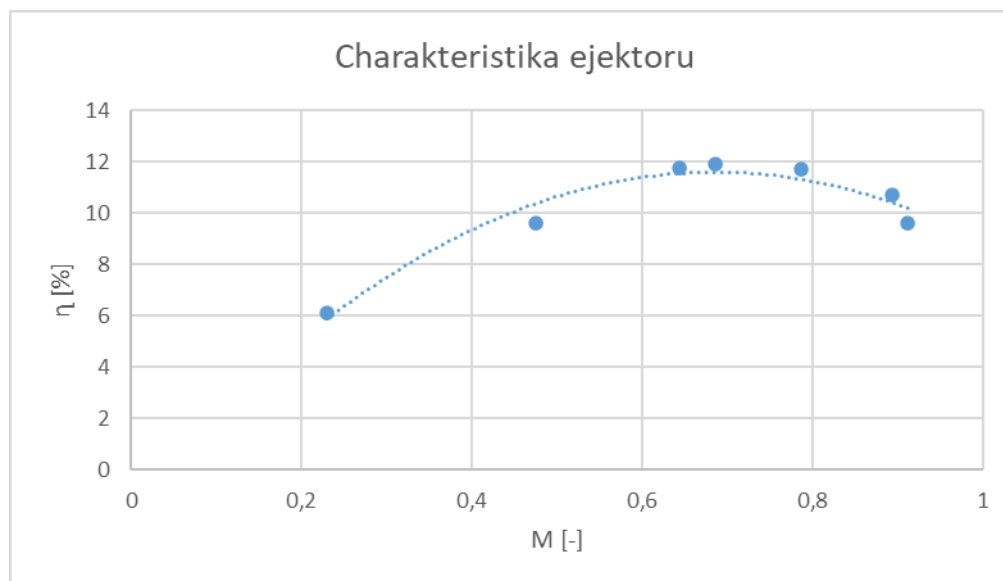
Tabulka 5- vliv průtoku

Průtočná plocha 64 mm ²							
typ trysky	kruhová	kruhová	kruhová	kruhová	kruhová	kruhová	kruhová
počet iterací	3350	3330	3300	3006	3424	3500	3426
hmotnostní tok na vstupu vody [kg/s]	0,7	0,8	0,85	0,9	1,0	1,1	1,2
hmotnostní tok na vstupu vzduchu [kg/s]	0,000197	0,000466	0,000672	0,000758	0,000964	0,001206	0,001342
Objemový průtok na vstupu vody [m ³ /s]	0,000701	0,000801	0,000852	0,000902	0,001002	0,001102	0,001202
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m ³ /s]	0,000161	0,000380	0,000548	0,000618	0,000787	0,000984	0,001096
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
hustota vody [kg/m ³]	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
hustota směsi v celém objemu [kg/m ³]	822,78	790,93	789,99	786,59	787,98	790,72	784,57
tlak na výstupu [Pa]	120743,45	121491,24	121894,24	123408,14	126119,28	124993,79	127364,73
rychlost na výstupu [m/s]	1,26	1,75	2,06	2,36	3,25	3,13	3,39
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
rychlost na vstupu vzduchu [m/s]	5,87	13,76	19,52	22,52	28,12	34,04	36,59
tlak na vstupu vody [Pa]	193748,25	220992,98	234735,41	250740,34	292880,42	322682,77	374787,22
rychlost na vstupu vody [m/s]	1,32	1,51	1,61	1,70	1,89	2,08	2,27
účinnost [%]	6,11	9,62	11,74	11,89	11,68	10,69	9,59

Můžeme pozorovat, že nejvyšší účinnost máme při průtoku kolem 0,9 kg/s (viz. obrázek 60).

Následně vytvoříme charakteristickou křivku ejektoru dle kapitoly 5.1.1. Samozřejmě při vyšším průtoku dochází k sání více vzduchu, ale také se nám příslušně zvyšuje tlaková ztráta. Tudíž hledáme optimální průtok vody, a to je kolem 0,9 kg/s.

V tabulce č.5 dále i č. 6,7 máme hodnotu hustota směsi v celém objemu. Tato hodnota byla získaná tak že se udělal objemový integrál přes celý ejektor a vypočítala se tak hustota v ejektoru. Bohužel tato hodnota neodpovídá úplně vstupujícímu objemu vzduchu. Toto může mít za následek, že ve velké části ejektoru se hustota vůbec nemění, až ve směšovací trubici. Takže tato hodnota se bude málo lišit od jednotlivých variant, a když se vezme v potaz, že je to numerický výpočet, takže tato hodnota osciluje. Takže hodně záleží, kde by se daný výpočet zastavil. Proto se dané hodnoty mohou překrývat ačkoliv máme jiný objemový přívod vzduchu.



obrázek 60- Nasimulovaná charakteristická křivka ejektoru

7.5.3 Výsledky simulací – vliv tvaru trysky

V této kapitole jsou testovány jednotlivé tvary trysek které byly zvoleny v kapitole 6.3. Všechny průtočné desky mají stejnou průtočnou plochu a to 64 mm^2 , také průtok vody bude u všech stejný a to $0,9 \text{ kg/s}$.

Tabulka 6- vliv tvaru trysky

	Průtočná plocha 64 mm^2							
typ trysky	kruhová	čtvercová	elipsa-šířka	elipsa-výška	7 děr	9 děr	13 děr	hvězda
počet iterací	3000	5500	5000	5500	5497	5500	5500	5500
hmotnostní tok na vstupu vody [kg/s]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
hmotnostní tok na vstupu vzduchu [kg/s]	0,000793	0,000669	0,000275	0,000309	0,000684	0,000683	0,000718	0,000344
Objemový průtok na vstupu vody [m^3/s]	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m^3/s]	0,000647	0,000546	0,000224	0,000253	0,000559	0,000557	0,000586	0,000281
hustota vzduchu [kg/m^3]	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225	1,225
hustota vody [kg/m^3]	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2	998,2
hustota směsi v celém objemu [kg/m^3]	761,72	774,78	819,70	796,65	740,38	751,00	768,99	783,90
tlak na výstupu [Pa]	123518,4	122503,0	121211,3	121532,5	121538,8	122605,8	122279,3	120998,3
rychlost na výstupu [m/s]	2,838	2,259	1,668	1,709	2,159	2,199	2,203	1,720
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
rychlost na vstupu vzduchu [m/s]	23,744	19,956	7,989	9,050	20,142	19,841	21,065	9,854
tlak na vstupu vody [Pa]	257572,2	237376,3	251117,3	260545,5	248112,5	248949,3	250519,6	270121,0
rychlost na vstupu vody [m/s]	1,7004	1,7001	1,7001	1,7001	1,7006	1,7006	1,7006	1,7023
účinnost [%]	11,88	11,16	3,81	4,07	9,90	10,41	10,62	4,11

Pro dané parametry nám nejlépe vychází tryska kruhového průřezu, to může být způsobeno tím, že hmotnostní průtok vody byl navržen podle trysky kruhového průřezu abychom dosáhli co nejvyšší účinnosti. Je možné že jednotlivé desky mohou mít optimální průtok vody jiný. Toto tvrzení potvrdila nakonec i kapitola 8.1.2

Druhou nejvyšší účinnost má tryska čtvercového průřezu ovšem nejvíce přisávaného vzduchu je u trysky se 13 dírami, která má třetí nejvyšší účinnost.

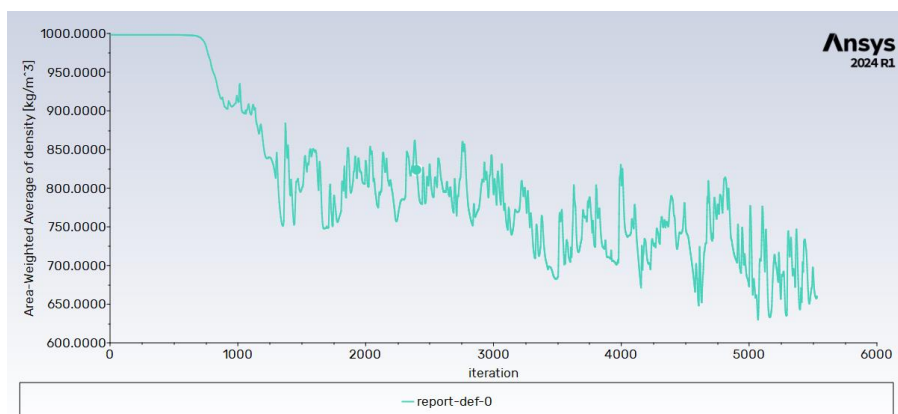
Lze pozorovat že čím více máme děr u více děrových trysek tím máme vyšší účinnost ovšem čím více děr tím složitější na výrobu tryska může být.

K nejlepší homogenizaci směsi nám došlo u trysky se 7 dírami, pokud sledujeme parametr hustota směsi v celém objemu.

Jako nejhorší tvar trysky je tvar elipsy, u které pokud byla otočena na výšku (blíže k saní vzduchu) docházelo k většímu sání vzduchu než u elipsy položené na šířku.

Tvar hvězdy také nebyla z nejlepších, ovšem byla lepší než elipsa.

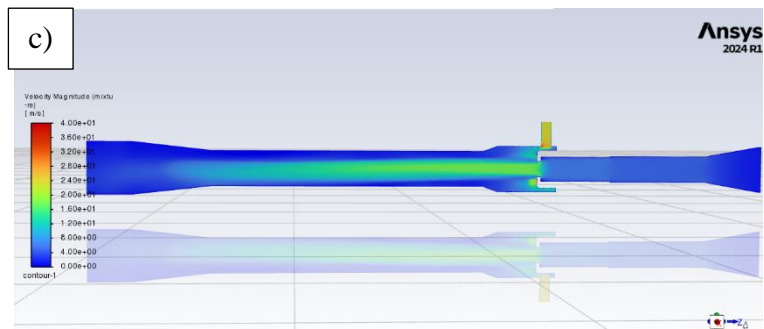
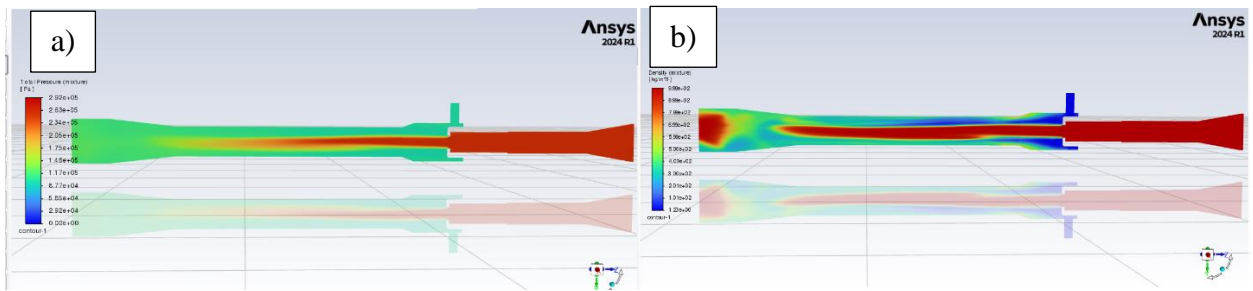
U jednotlivých výpočtů docházelo k ustálení jednotlivých hmotnostních toků, které jsme při výpočtech sledovali, ovšem u hustoty směsi na výstupu nedocházelo k úplnému ustálení, což lze i pozorovat na obrázku 61, pravděpodobně by výpočet potřeboval mnohem více iterací což vzhledem k počtu simulací nebylo úplně možné.



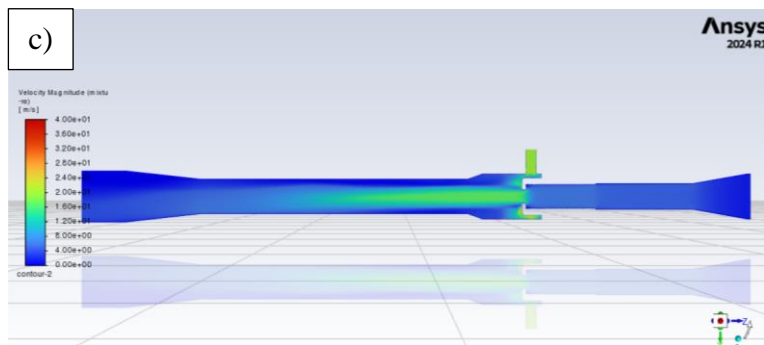
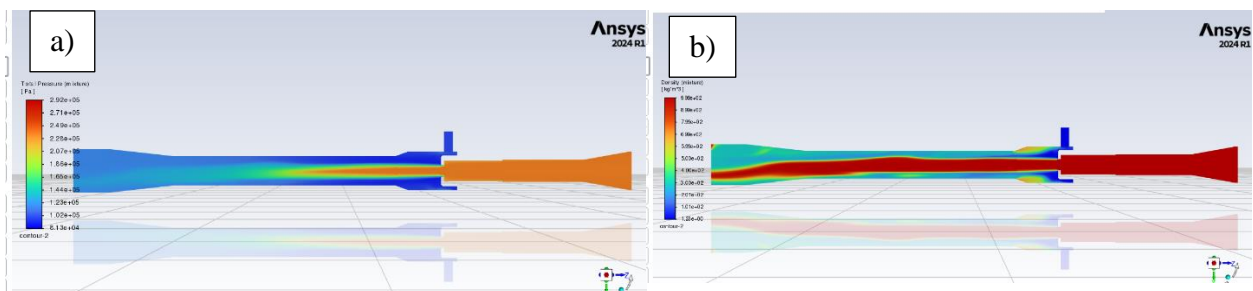
obrázek 61- průměrná hustota směsi na výstupu

U složitějších tvarů, jako byla hvězda a více-děrový trysky musel být upraven řešič a pro prvních 1000 iterací byla použita podmínka First Order Upwind, poté byl přepnut zpět na přesnější výpočet, a to Second Order Upwind.

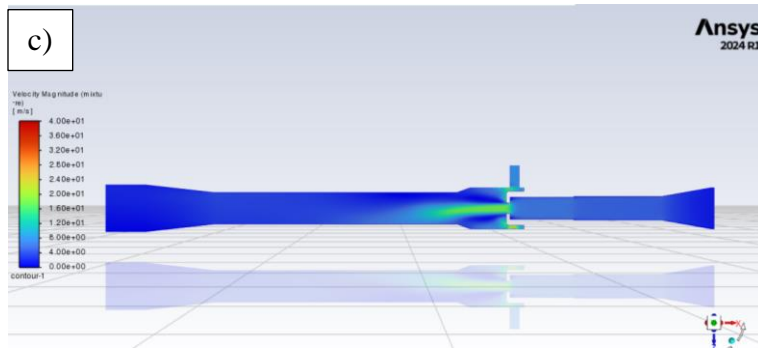
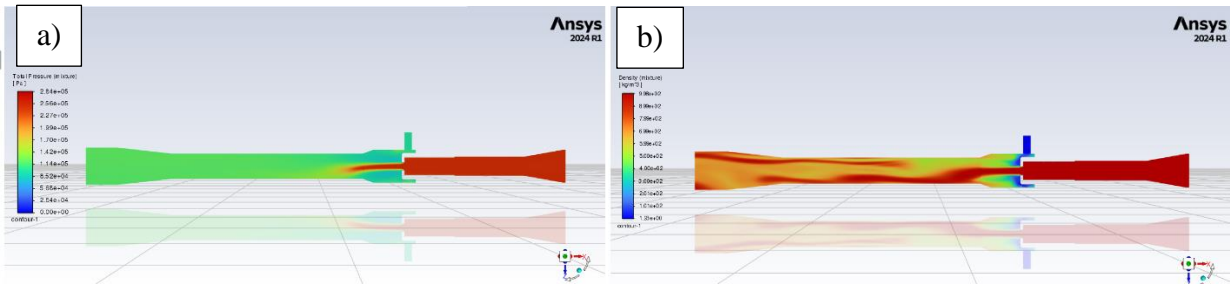
Dále budou prezentovány obrázky ze simulací 62 až 69, pro každý tvar trysky bude zobrazen průběh tlaků, hustota směsi a rychlost v ejektoru.



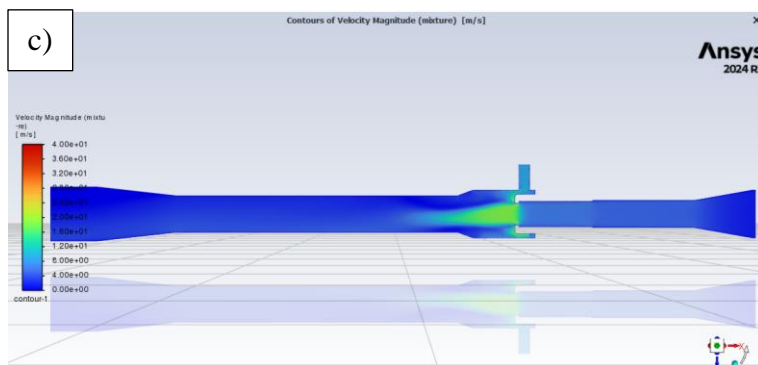
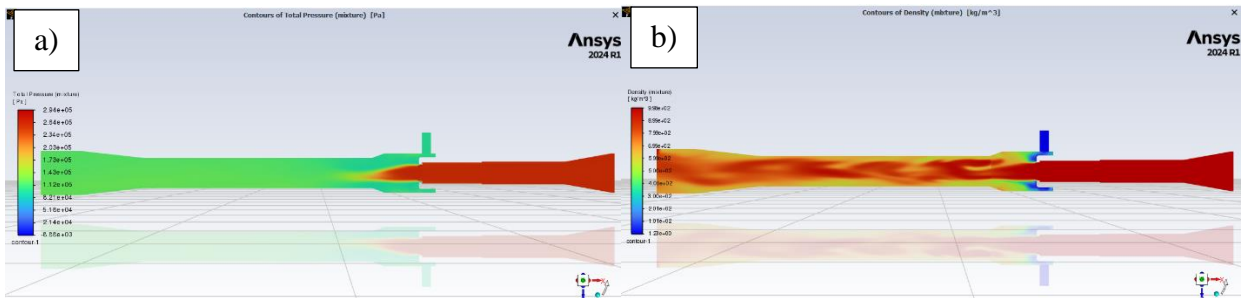
Obrázek 62- Čtvercová tryska – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



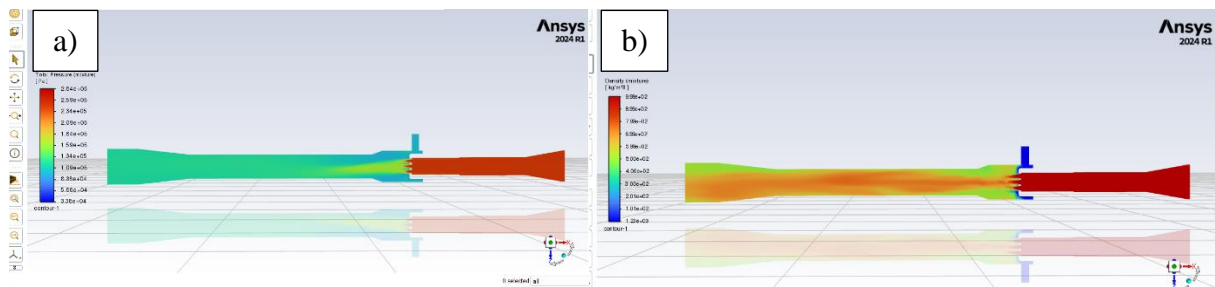
Obrázek 63- Čtvercová tryska – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



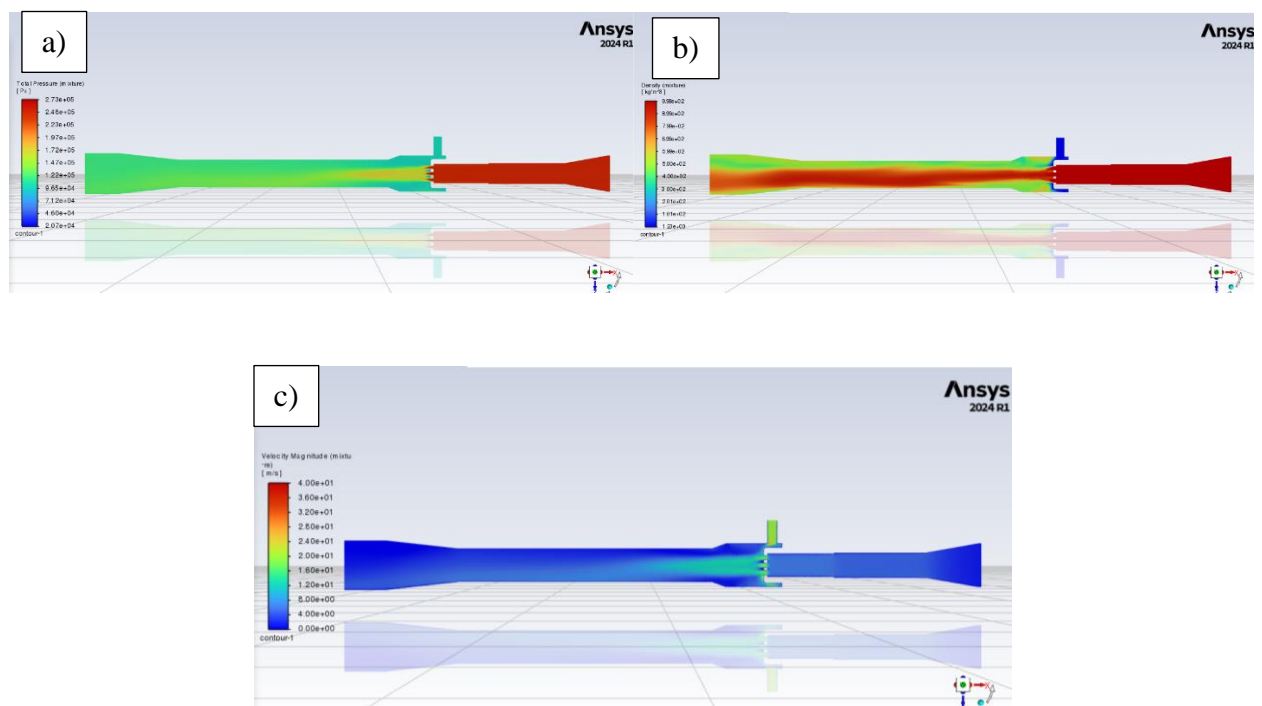
Obrázek 64- Elipsa šířka – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



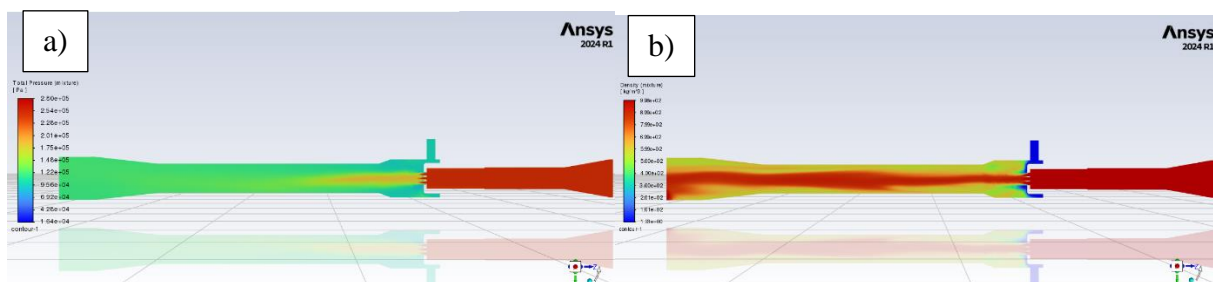
Obrázek 65- Elipsa výška – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



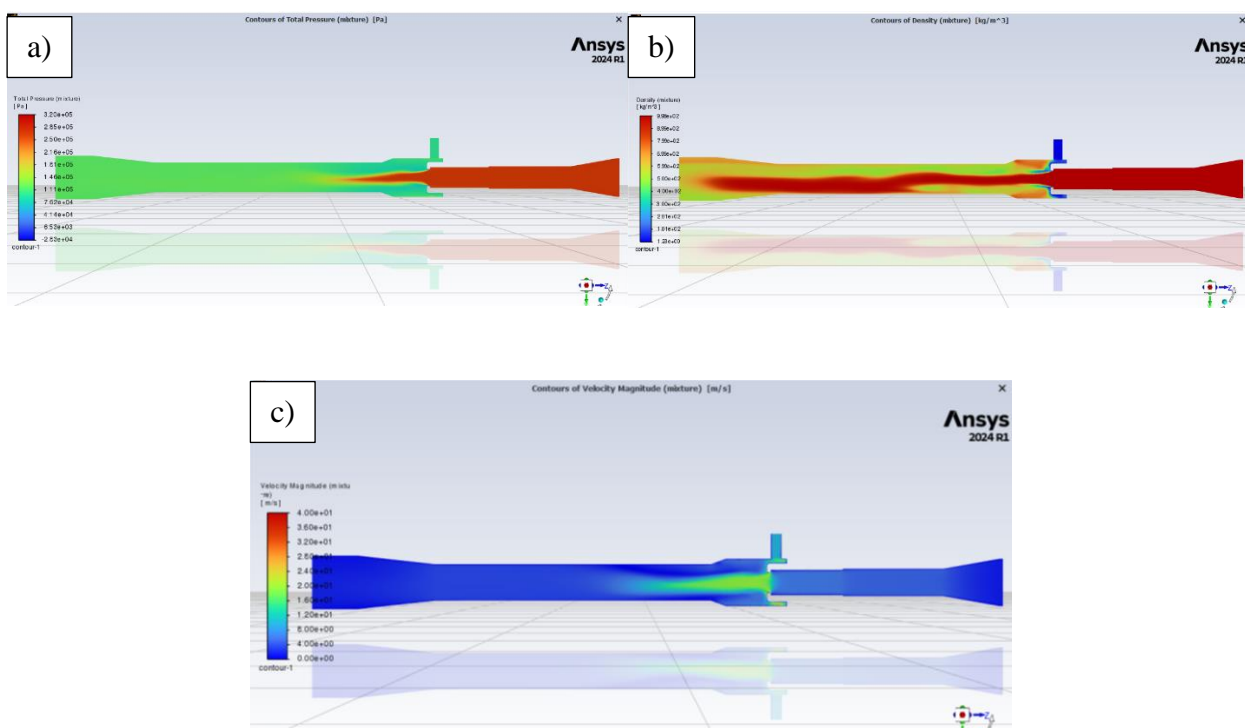
Obrázek 66- 7 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



Obrázek 67- 9 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



Obrázek 68- 13 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost



Obrázek 69- Hvězda – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost

7.5.4 Výsledky simulací – vliv pozice trysky sekundárního toku

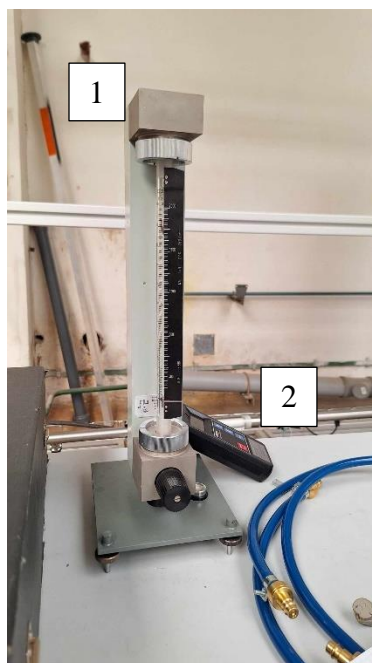
Všechny předešlé simulace měly sekundární tok nejbliže k ústí trysky primárního toku, tudíž byl teoreticky použit distanční kroužek o šířce 10 mm a 5 mm jak bylo zmíněno v kapitole 6. Budeme simulovat kruhovou trysku s průtokem vody 0,9 kg/s, v různých vzdálenostech od primárního toku. Při použití 10 mm + 5 mm kroužku (celkem odsazení 15 mm – nejbliže ústí trysky primárního toku), 10 mm, 5 mm a 0 mm (bez distančních kroužků – nejdále od ústí primárního toku).

Tabulka 7- Vliv pozice trysky sekundárního toku

Průtočná plocha 64 mm ²				
typ trysky	kruhová 15 mm	kruhová 10 mm	kruhová 5 mm	kruhová 0 mm
počet iterací	3000	3109	3500	3946
hmotnostní tok na vstupu vody [kg/s]	0,9	0,9	0,9	0,9
hmotnostní tok na vstupu vzduchu [kg/s]	0,000793	0,000755	0,000707	0,000590
Objemový průtok na vstupu vody [m ³ /s]	0,000902	0,000902	0,000902	0,000902
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m ³ /s]	0,000647	0,000617	0,000577	0,000482
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,225	1,225	1,225	1,225
hustota vody [kg/m ³]	998,2	998,2	998,2	998,2
hustota směsi v celém objemu [kg/m ³]	761,72	797,01	801,23	760,96
tlak na výstupu [Pa]	123518,4	122507,2	122457,2	121773,1
rychlost na výstupu [m/s]	2,838	2,245	2,230	2,138
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	101325	101325	101325	101325
rychlost na vstupu vzduchu [m/s]	23,744	21,702	21,064	18,060
tlak na vstupu vody [Pa]	257572,2	253813,0	259581,2	265519,5
rychlost na vstupu vody [m/s]	1,700	1,700	1,700	1,700
účinnost [%]	11,88	11,03	9,86	7,60

Z tabulky můžeme vidět, že nejlepší pozice trysky je nejbliže u ústí trysky primárního toku, tudíž s použitím dvou distančních kroužků 10 mm a 5 mm.

Na obrázků č. 71 můžeme vidět zapojený ejektor na měřící trati. Na pozici č.1 měříme tlak před ejektorem, č. 2 měříme tlak za ejektorem a na pozici číslo tři se připojí průtokoměr na vzduch společně s tlakoměrem to je ukázáno na obrázku 72. Na obrázku č. 72 je č. 1 průtokoměr a č.2 tlakový snímač. Průtok vody se měří na výstupu z čerpadla.



Obrázek 72- Průtokoměr + tlakový snímač



Obrázek 73- Testované průtočné plochy

8.1 Výsledky měření

V této kapitole budeme prezentovat výsledky získané při experimentu. Všechny hodnoty získané při experimentu byly přepočítány na stejné jednotky, aby mohly být porovnány. Teplota a tlak při experimentu:

Teplota vzduchu	30°C
Atmosferický tlak	98300 Pa

Z důvodu že průtokoměr na vzduch byl kalibrován na 20 °C a 101 325 Pa jsme museli průtok vzduchu přepočítávat dle vzorce:

$$\frac{Q_{V1}}{Q_{V2}} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad [24] \quad (8.1)$$

Kde

ρ_2 je hustota vzduchu při 20 °C a tlaku 101 325 Pa

ρ_1 je hustota vzduchu při 30 °C a tlaku 98 300 Pa

Q_{V1} je objemový průtok vzduchu při 30 °C a tlaku 98 300 Pa

Q_{V2} je objemový průtok vzduchu při 20 °C a tlaku 101 325 Pa



Obrázek 74 - Zapojený ejektor

Na obrázku 74 je zapojený ejektor v provozu, ve směšovací komoře lze vidět míchání vody a vzduchu.

8.1.1 Výsledky měření – Uzavření sání vzduchu

Při prvním experimentu bylo zavřeno sání vzduchu a bylo měřeno jaký maximální podtlak získáme pro daný průtok vody.

Tabulka 8 - Experiment uzavření – kruhová tryska

Typ trysky	Uzavření					
	Kruhová			Kruhová		
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	64000		42150		24550	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000807	4,13E-06	0,000993	5,98E-06	0,001117	7,21E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	237988,2	778,87	315390	1222,81	377076,5	1701,50
tlak na výstupu [Pa]	103751,6	241,56	105097	310,20	106562,6	502,02
teplota vody [C°]	29,3	0,00319	28,2	0,00689	28,9	0,00805
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0		0		0	

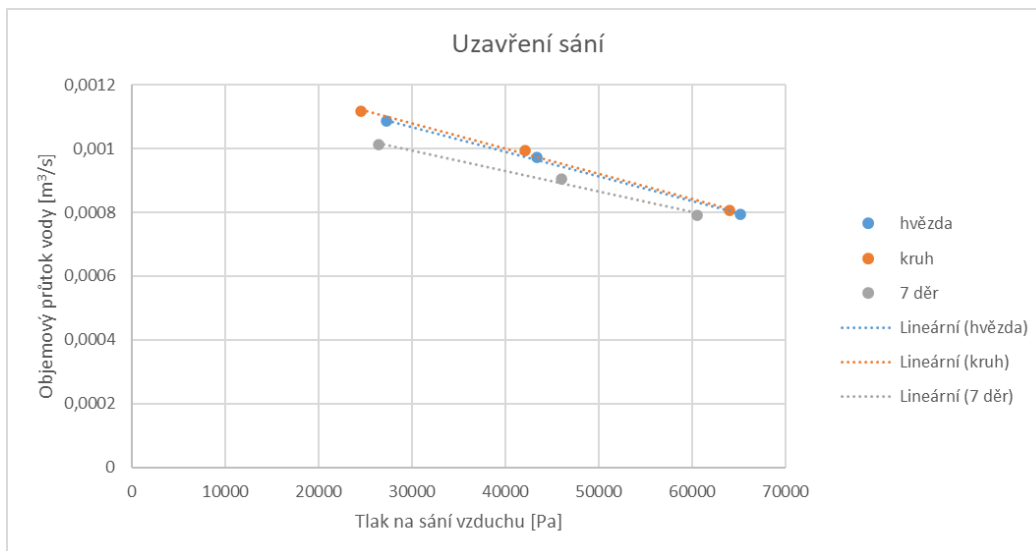
Tabulka 9- Experiment uzavření - 7 děr

Typ trysky	Uzavření					
	7 děr			7 děr		
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	60500		46050		26400	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000790	6,56E-06	0,000904	6,83E-06	0,00101	8,24E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	290872,7	706,3	377651	1614,2	445617,1	2288,0
tlak na výstupu [Pa]	103333,2	411,3	104083	261,2	105043,9	335,1
teplota vody [C°]	29,6	0,00571	29,9	0,00749	30,7	0,0121
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0		0		0	

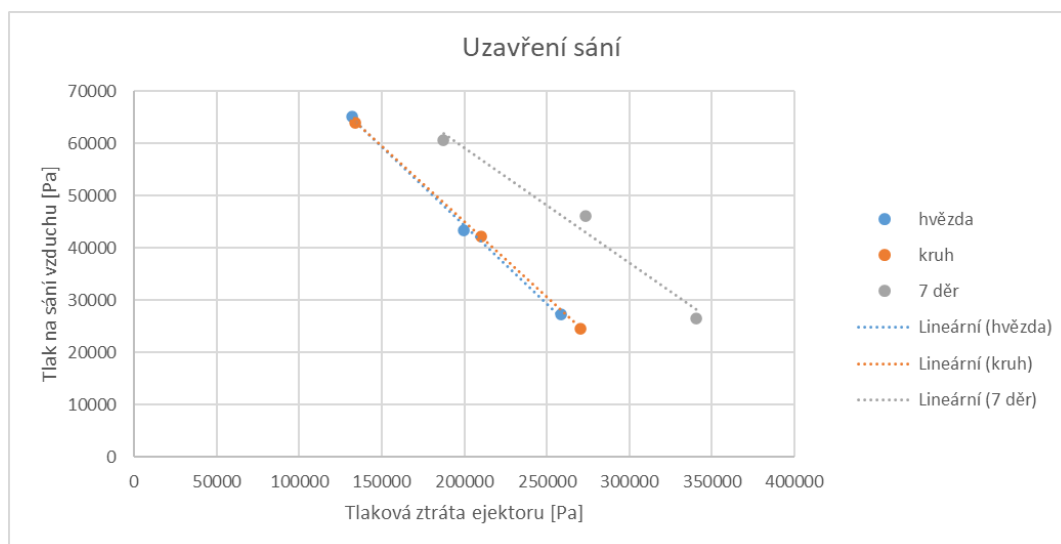
Tabulka 10 - Experiment uzavření – hvězda

Typ trysky	Uzavření					
	Hvězda			Hvězda		
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	65200		43400		27300	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000793	4,42E-06	0,000972	5,60E-06	0,001085	5,35E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	234551,4	2678,3	304126,1	1280,7	363752,3	1632,8
tlak na výstupu [Pa]	102735,6	115,3	104132	693,0	105320,2	189,6
teplota vody [C°]	31,9	0,00412	31,0	0,00782	31,3	0,00881
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0		0		0	

Hodnoty z tabulek 8,9 a 10 jsou porovnány v grafech níže pro lepší srovnání.



Obrázek 75 - Graf – Objemový průtok vody vs. Tlak na sání vzduchu



Obrázek 76 – Tlak na sání vzduchu vs. Tlaková ztráta ejektoru

Z grafů výše můžeme porovnat jednotlivé průtočné plochy. Z grafu na obrázku 75, můžeme pozorovat že pro více děrovou variantu nám stačí mnohem menší objemový průtok vody pro dosažení nižšího tlaku. Kruh a hvězda z tohoto pohledu jsou téměř stejné.

Ovšem když se podíváme na graf na obrázku 76, tak více děrová varianta má pro dosažení nízkého tlaku na sání mnohem větší tlakovou ztrátu. Opět hvězda a kruh vychází dost podobně.

Více děrová tryska nám dosáhne nižšího tlaku pro daný průtok ale za cenu vyšší tlakové ztráty.

8.1.2 Výsledky měření – Charakteristické křivky

Dále jsme měřili charakteristické křivky ejektoru pro každý typ průtočné plochy. Pro každý typ průtočné plochy se 3x měnil výkon čerpadla (potenciometr čerpadla – 60 %, 75 %, 85 %) a pro každou změnu byly měřeny různé průtoky přisávaného vzduchu.

Tabulka 11- Experiment – kruhová tryska 60%

Potenciometr čerpadla 60 %						
Typ trysky	Kruhová					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	80400		68100		65150	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000751	4,61E-06	0,000777	4,83E-06	0,000789	4,15E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	238384,4	846,0	238191,4	799,3	238074	893,4
tlak na výstupu [Pa]	104387,2	518,4	104376,2	267,7	104257,7	338,1
teplota vody [C°]	29,3	0,00248	29,3	0,00204	29,4	0,00240
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000468		0,000317		0,000145	
poměr průtoků M [-]	0,624		0,408		0,184	
účinnost [%]	11,16		11,07		5,38	

Tabulka 12- Experiment – kruhová tryska 75%

Potenciometr čerpadla 75 %							
Typ trysky	Kruhová						
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka	Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	62450		49250		46700		43900
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000943	7,38E-06	0,000969	5,69E-06	0,000974	5,44E-06	0,000981
tlak na vstupu vody [Pa]	315791,1	1408,2	315669,6	1368,3	315597,2	1365,3	315612,2
tlak na výstupu [Pa]	106454,7	729,0	106086,6	456,1	105877,7	424,0	105675,1
teplota vody [C°]	28,4	0,00732	28,5	0,00711	28,6	0,00705	28,7
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000511		0,00042		0,000291		0,000151
poměr průtoků M [-]	0,542		0,433		0,298		0,154
účinnost [%]	11,39		11,74		8,42		4,52

Tabulka 13 - Experiment – kruhová tryska 85 %

Potenciometr čerpadla 85 %							
Typ trysky	Kruhová						
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka	Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	44400		31750		28500		26800
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,001079	7,05E-06	0,001098	5,55E-06	0,001104	6,61E-06	0,001106
tlak na vstupu vody [Pa]	377409,6	1746,5	377189,3	1827,5	377108,6	1686,8	377054,5
tlak na výstupu [Pa]	107139,6	773,9	107205	502,5	106993,1	463,4	106863,8
teplota vody [C°]	29,0	0,0122	29,1	0,00701	29,2	0,00805	29,3
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,00049		0,000371		0,000215		0,000113
poměr průtoků M [-]	0,454		0,338		0,195		0,102
účinnost [%]	10,53		9,45		5,67		3,03

Tabulka 14 - Experiment – 7 děr 75%

Potenciometr čerpadla 75 %						
Typ trysky	7 děr					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	70500		62150		61000	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000752	1,27E-05	0,000763	4,82E-06	0,000781	5,36E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	305902,8	4233,4	312515,2	1076,5	315770,5	1386,3
tlak na výstupu [Pa]	103909,5	391,2	103908,2	302,5	103865,9	377,5
teplota vody [C°]	29,7	0,0154	29,7	0,00277	29,8	0,00567
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,0005		0,000344		0,000229	
poměr průtoků M [-]	0,666		0,452		0,293	
účinnost [%]	11,01		9,04		5,92	

Tabulka 15- Experiment - 7 děr 85%

Potenciometr čerpadla 85 %						
Typ trysky	7 děr					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	50150		46350		46250	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000871	1,002E-05	0,000888	9,28E-06	0,000902	6,91E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	378305,8	1621,1	378322,6	1906,9	378169,5	1758,8
tlak na výstupu [Pa]	105205,1	421,8	104969,7	490,6	104581,8	532,7
teplota vody [C°]	30,1	0,0141	30,3	0,00844	30,4	0,00628
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000457		0,000331		0,000221	
poměr průtoků M [-]	0,525		0,373		0,244	
účinnost [%]	10,59		7,99		5,21	

Tabulka 16- Experiment – 7 děr 95%

Potenciometr čerpadla 95 %						
Typ trysky	7 děr					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	39050		30150		28100	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000982	7,15E-06	0,000997	6,76E-06	0,001001	1,03E-05
tlak na vstupu vody [Pa]	445809,4	2120,57	445955,8	2088,89	445824,4	2078,12
tlak na výstupu [Pa]	105816,1	502,09	105685,2	434,87	105345,3	610,00
teplota vody [C°]	30,9	0,0105	30,9	0,00906	31,1	0,0107
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000473		0,000334		0,000151	
poměr průtoků M [-]	0,482		0,335		0,150	
účinnost [%]	9,47		7,43		3,41	

V tabulce č. 16 je na rozdíl od ostatních typů desek potenciometr čerpadla nastaven na 95 % to je z důvodu že tato deska má větší tlakovou ztrátu a chtěl jsem dosáhnout podobných průtoků vody aby se lépe srovnávali jednotlivé desky.

Tabulka 17 - Experiment – hvězda 60%

Potenciometr čerpadla 60 %						
Typ trysky	Hvězda					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	87100		71000		66300	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,000721	4,76E-06	0,000752	4,16E-06	0,000777	3,90E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	237514,5	972,1	237426,7	810,2	237315,2	872,4
tlak na výstupu [Pa]	103309,7	357,0	103284,1	382,0	103270,7	268,4
teplota vody [C°]	31,9	0,00140	31,9	0,00255	31,9	0,00249
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000479		0,000312		0,000129	
poměr průtoků M [-]	0,664		0,415		0,166	
účinnost [%]	8,02		9,99		4,58	

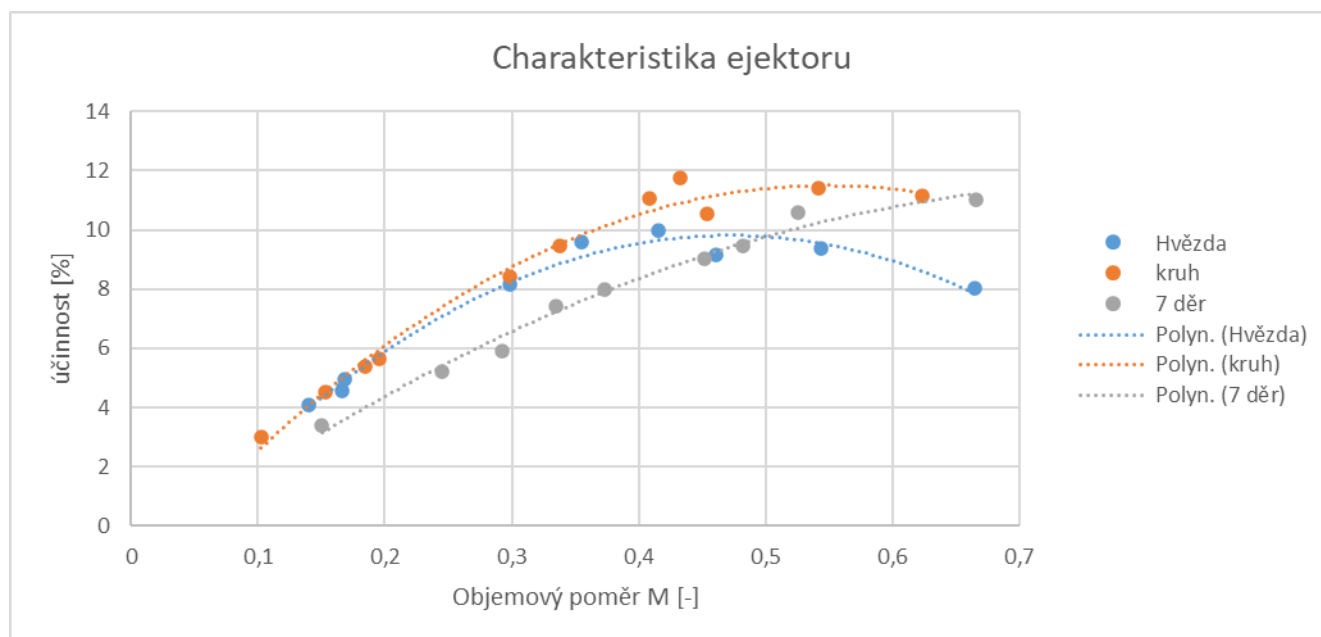
Tabulka 18 - Experiment – hvězda 75%

Potenciometr čerpadla 75 %						
Typ trysky	Hvězda					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka	Směrodatná odchylka	
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	70300		51300		45600	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,00091	6,45E-06	0,000941	5,73E-06	0,00096	4,963E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	309522,3	4575,2	304828,7	1415,9	304603,7	1265,2
tlak na výstupu [Pa]	105478,3	398,4	105270,6	508,5	104613,1	380,9
teplota vody [C°]	31,1	0,00846	31,2	0,00870	31,2	0,00569
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000495		0,000334		0,000161	
poměr průtoků M [-]	0,544		0,354		0,168	
účinnost [%]	9,37		9,59		4,96	

Tabulka 19 - Experiment – hvězda 85%

Potenciometr čerpadla 85 %						
Typ trysky	Hvězda					
		Směrodatná odchylka		Směrodatná odchylka	Směrodatná odchylka	
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	54400		35500		30000	
Objemový průtok vody [m ³ /s]	0,001039	6,79E-06	0,001064	8,06E-06	0,001077	6,24E-06
tlak na vstupu vody [Pa]	366887,1	2606,3	364297,4	1575,1	364074,3	1752,0
tlak na výstupu [Pa]	106222,6	400,3	106024,8	287,6	105600,9	300,8
teplota vody [C°]	31,7	0,0147	31,8	0,00608	31,8	0,0142
Objemový průtok vzduchu [m ³ /s]	0,000479		0,000317		0,000151	
poměr průtoků M [-]	0,461		0,298		0,140	
účinnost [%]	9,17		8,15		4,09	

Dále jsou hodnoty z tabulek zobrazeny v grafu a vytvořené jednotlivé charakteristické křivky ejektoru.



Obrázek 77 - Experimentálně vytvořené charakteristiky ejektoru

Na grafu na obrázku 77 můžeme vidět jednotlivé charakteristiky ejektoru, bohužel u kruhové a 7 děrové desky se nepodařilo zachytit celou charakteristickou křivku pravá část chybí. Tato část by šla naměřit snížením výkonu čerpadla, ale hrozilo by nasání vody do přívodu vzduchu. Také by šlo více otevřít ventil na přívodu vzduchu, bohužel u většího otevření jsme byli mimo rozsah objemového průtokoměru.

U průtočné plochy tvaru hvězdy je přibližně vidět i maximum účinnosti, kterou může dosáhnout. Toto desky maximum je více vlevo na rozdíl od ostatních testovaných ploch. Hvězda nám vychází ze všech testovaných ploch asi nejhůře, maximální účinnost je něco pod 10 %, jak můžeme vidět. Toto se shoduje i s numerickými simulacemi, kde jsme sice simulovali jenom jeden bod, ale pro dané podmínky nám vycházela nejhůře.

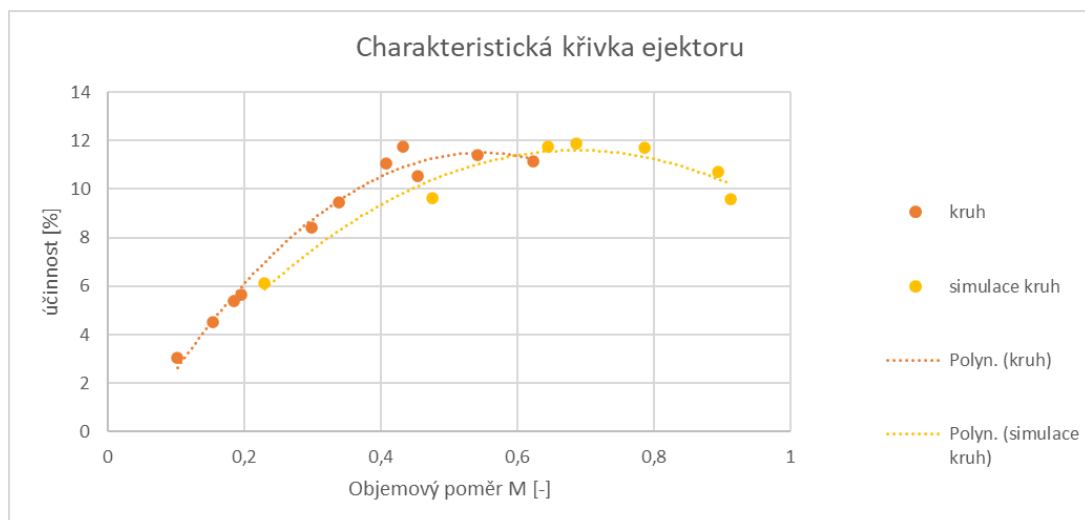
Více děrová plocha má pravděpodobně maximum více v pravé části, teoreticky by mohla mít maximum i výš než kruhová tryska, která už se začíná pomalu narovnávat v krajních bodech na rozdíl od více děrové.

8.2 Ověření simulací a porovnání s numerickou částí

Ověření simulací je klíčovým procesem, který zajišťuje, že výsledky získané ze simulací jsou spolehlivé a přesné.

8.2.1 Porovnání charakteristických křivek

První můžeme porovnat charakteristickou křivku ejektoru u kruhové průtočné plochy. Tuto charakteristickou křivku jsme nasimulovali v kapitole 7.5.2 a porovnáme jí s experimentálními daty.



Obrázek 78- Porovnání charakteristických křivek ejektoru – simulace vs experiment

Bohužel u experimentu jsme neobsáhli celou část charakteristické křivky, chybí nám pravá část. Můžeme ale říct že simulace a experiment se poměrně dobře shoduje maximum se pohybuje pod 12 % účinnosti u obou křivek. U simulace máme maximum pravděpodobně více v levé části grafu, ale s ohledem na přesnosti simulace a přesnosti měření experimentálních dat je tento rozdíl zanedbatelný.

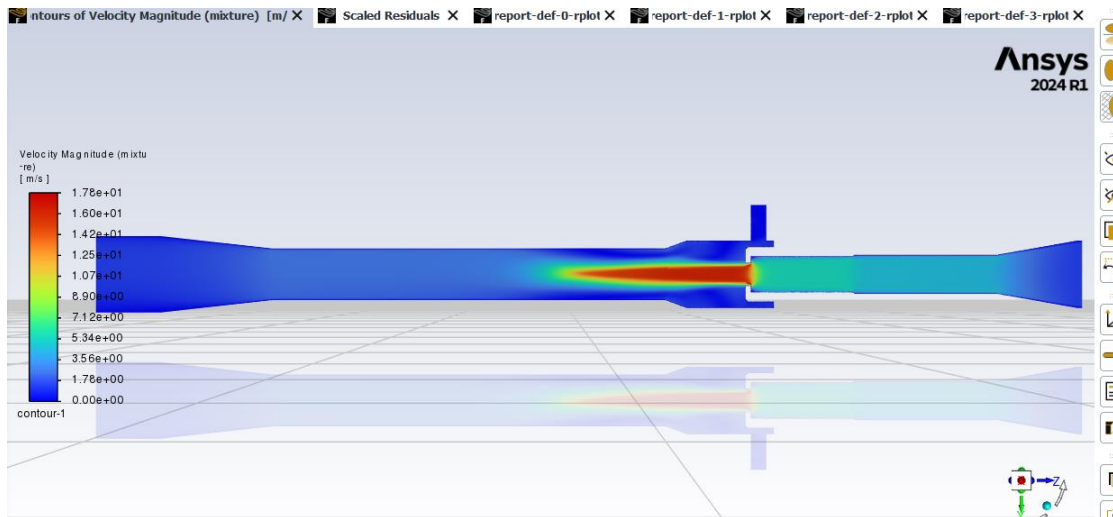
8.2.2 Ověření simulace při uzavření sání vzduchu

Pro následující ověření byla udělána další simulace, byl ověřen bod z experimentu kdy jsme zavřeli vzduch na sání u kruhové průtočné plochy. V simulaci budeme nastavovat hmotnostní průtok vody, tlak na výstupu a hmotnostní průtok vzduchu (0 kg/s). Ověřovat budeme tlak na vstupu vody a tlak na sání vzduchu.

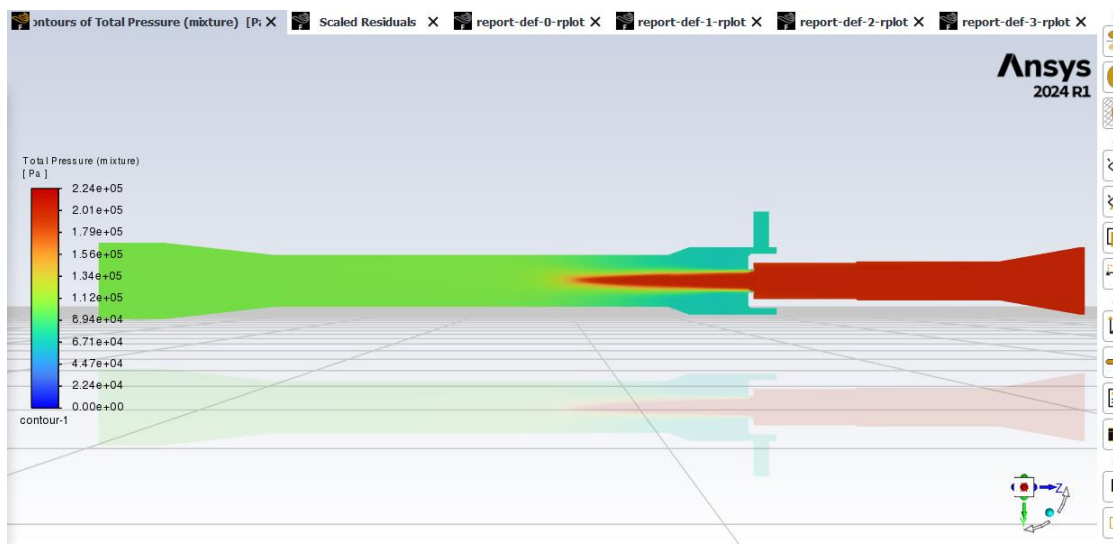
Tabulka 20- Ověření simulace – uzavření sání vzduchu

Uzavření		
typ trysky	kruhová- simulace	kruhová-experiment
Objemový průtok na vstupu vody [m ³ /s]	0,000805049	0,000806985
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m ³ /s]	0	0
tlak na výstupu [Pa]	104483,95	103751,6447
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	71800,064	64000
tlak na vstupu vody [Pa]	200909,81	237988,1579

V tabulce č. 20 máme porovnání simulace a experimentu. Tlak na vstupu vzduchu nám vyšel cca o 12 % víc než u experimentu. Tlak u vstupu vody nám vyšel o cca 15 % méně než u experimentu. Takže můžeme říct, že tento model by šel použít na simulaci při uzavření sání vzduchu. Chyba může být způsobena nedostatečnou jemností sítě, to se nám potvrdilo i v kapitole 7.4 (citlivostní analýza), kde u jemnější sítě nám vzrůstal tlak na vstupu vody tím pádem to víc odpovídalo realitě. Samozřejmě i nepřesnost měření při experimentech nám hraje roli do těchto srovnávání. Níže je zobrazen průběh rychlostí (obrázek 79) a průběh tlaků ejektoru (obrázek 80) ze simulace.



Obrázek 79 - Uzavření sání vzduchu – průběh rychlostí



Obrázek 80 - uzavření sání vzduchu – průběh tlaků

8.2.3 Ověření simulace při otevření sání vzduchu

Opět byl ověřen bod z experimentu, ale tentokrát při otevření sání vzduchu. V simulaci byl nastavovat hmotnostní průtok vody, tlak na výstupu z ejektoru a tlak na vstupu vzduchu. Porovnávat tak budeme objemový průtok vzduchu a tlak na vstupu vody.

Tabulka 21 - Ověření simulace při otevření sání vzduchu

Otevření sání vzduchu		
typ trysky	kruhová- simulace	kruhová-experiment
Objemový průtok na vstupu vody [m ³ /s]	0,000750551	0,000750557
Objemový průtok na vstupu vzduchu [m ³ /s]	0,000202843	0,000468037
tlak na výstupu [Pa]	105393,49	104387,1508
tlak na vstupu vzduchu [Pa]	80400	80400
tlak na vstupu vody [Pa]	189179,85	238384,3575
poměr průtoků M [-]	0,27025856	0,623586541
účinnost [%]	8,061818922	11,16296734

Tady jsou hodnoty trochu více rozdílné od experimentu, objemový průtok vzduchu je asi poloviční. To může mít za následek, že hustota vzduchu v simulaci je nastavena při 20 °C ale při experimentu byla 30 °C. Taktéž teplota vody nám nemusí sedět tudíž i hustota vody s tím spojená. Další věc je že při experimentu jsme měli průměr trubice na sání vzduchu 6 mm ale při experimentu byl model s 5 mm z důvodu že jsem se řídil výkresy, ale poté se při experimentu použila jiná trubice. Tlaky na vstupu vody jsou jiné asi o 20 %.

9 Závěr

V praktické části diplomové práce jsem se zaměřil na experimentální a numerickou analýzu vlivu tvaru a pozice trysky na provozní parametry vodou hnaného ejektoru.

V první fázi jsem se zaměřil na úpravu již stávajícího ejektoru, aby na něm mohly být testovány různé tvary průtočných desek trysky. Použil jsem 3D modelování k vytvoření několika variant trysek s odlišnými geometrickými tvary. Vybrané trysky byly poté vyrobeny pomocí technologie 3D tisku. Důležitou součástí této práce bylo také stanovení optimálních průtočných ploch pro různé konfigurace ejektoru. Analyzoval jsem vliv změny průtočných ploch na výkon ejektoru, zejména na jeho schopnost vytvářet tlakový rozdíl a efektivně směšovat primární a sekundární proud. Pro pochopení vlivu tvaru a pozice trysky na provozní parametry ejektoru jsem použil numerické simulace.

V poslední fázi jsem provedl experimenty s různými konfiguracemi trysek v laboratorních podmínkách. Měřil jsem klíčové provozní parametry, jako je průtok, tlakový rozdíl. Porovnání výsledků simulací s experimentálními daty pomohlo validovat modely a získat přesnější obraz o optimalizaci trysky.

Numerický model byl ověřen experimentálně, chyba se pohybovala okolo 20 %. Vzhledem k tomu že ejektor je velmi složitý na numerickou simulaci (více fázový tok) jsou tyto výsledky pro přibližnou orientaci a návrh dostačující.

Dále bylo zjištěno numerickou simulací, že pro zvýšení účinnosti musíme posunout sekundární tok co nejbližší ústí trysky.

Z porovnaných desek, co se týče účinnosti nám nejlépe vycházela kruhová deska to je ale z důvodu, že jsme použili optimální průtok pro tuto trysku. Optimální průtok vody pro kruhovou desku je 0,9 kg/s pro tento ejektor. Další velmi dobrý tvar pro ejektor je čtvercová nebo více-děrová tryska. Jako nejhorší tvary trysek je elipsa a hvězda.

V experimentální části bylo zjištěno že nejnižší podtlak pro daný průtok dosáhneme u 7 děrové trysky ovšem má nejvyšší tlakovou ztrátu.

Dále jsme získali charakteristické křivky jednotlivých variant experimentálně. U kruhové trysky jsme dosáhli nejvyšší účinnosti 11,74 % při experimentu. Během simulace 11,88 %. Dalo by se říct, že toto je velmi dobrá shoda experimentu a simulace.

U experimentálně vytvořené charakteristické křivky pro desku s tvarem hvězdy, se nám potvrdilo že tato deska je nejhorší.

U 7 děrové desky se nám nepodařilo zachytit maximum, ale z obrázku charakteristických křivek je patrné že tato plocha nebude vůbec zlá. Dosáhli jsme účinnosti 11 %.

10 Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] EJEKTOR [online]. [cit.2023-11-11]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/ejektor.html>
- [2] Ejektor pro odsávání inertů a kondenzátu z odparky [online]. Praha, 2017 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73986/F2-DP-2018-Tauer-Jakub-DP_final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y . Diplomová Práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [3] EJEKTOR [online]. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/slovník-pojmu/ejektor/>
- [4] EJEKTORY A JEJICH VYUŽITÍ V PRŮMYSLU [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65149 .
Bakalářská Práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [5] Vodní injektory [online]. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z:
https://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0020.htm
- [6] Vlastimil Mareš, Jaroslav Louda: Příručka pro strojvedoucí (Dopravní nakladatelství, 1957)
- [7] Mamutové čerpadlo [online]. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z:
https://katedry.osu.cz/kpv/cerpadla-jh/Jan_Hruska_MUC_soubory/page0023.htm
- [8] EJEKTORY, JEJICH KONSTRUKCE A VYUŽITÍ [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85814 .
Bakalářská Práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [9] Aplikace pro návrh ejektoru [online]. Praha, 2023 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z:
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/111200/F2-DP-2023-Randak-Filip-Aplikace%20pro%20navrh%20ejektoru.pdf?sequence=-1&isAllowed=y> .
Diplomová Práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

- [10] Venturiho efekt. Online. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Venturiho_efekt. [cit. 2023-11-11].
- [11] Vakuové mechanismy. Online, Bakalářská Práce. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2019. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/218459246.pdf>. [cit. 2023-11-11].
- [12] Výzkum a optimalizace proudění v ejektorech. Habilitační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [13] EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ EJEKTORU A VYTVOŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2007. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=10668. [cit. 2023-11].
- [14] MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V EJEKTORU. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2009. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=17312. [cit. 2023-11].
- [15] PROUDOVÁ VÝVĚVA V SYSTÉMU TURBÍNY K220-44. Online, DIPLOMOVÁ PRÁCE. Ostrava: VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2013. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/17306104.pdf>. [cit. 2023-11].
- [16] AN INTEGRATED MODELING APPROACH FOR DESIGN AND OPTIMIZATION OF EJECTOR PUMPS CARRYING TWO-PHASE FLUID. Online. 2017. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/159354359.pdf>. [cit. 2023-11].
- [17] Performance of Low-Cost Ejectors. Online. 2004. Dostupné z: https://www.academia.edu/61509071/Performance_of_Low_Cost_Ejectors. [cit. 2023-05-12].
- [18] Introduction to Jet Pumps. Online. Dostupné z: <http://brennen.caltech.edu/fluidbook/Fluidmachinery/Pumps/jetpumps.pdf>. [cit. 2023-05-12].
- [19] JET PUMPS AND EJECTORS. Online. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/902/>. [cit. 2023-05-12].

- [20] Performance of Low-Cost Ejectors. Online. Dostupné z: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/73344/1/2004_art_ielimaneto1.pdf. [cit. 2023-09-12].
- [21] Jet pump performance analysis and optimization plan. Online. Dostupné z: <https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/6574003/AC16207170.pdf>. [cit. 2023-09-12].
- [22] VLČEK, Petr. Modelování turbulentního proudění. Praha. ČVUT v Praze, 2013. Školitel Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. [online, cit. dne 29.04.2024], dostupné z <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>
- [23] KOZUBKOVÁ, Milada.: Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Fluent. Vyd. 1. V Ostravě: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. 2008. 142 s.
- [24] Měření průtoku a proteklého množství. Online. Dostupné z: https://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR3G-iz1QuXBtwuaUIAzNjSciZwG67qyFV5FYleEGqay2YodH2MJVqrRKYY_aem_OxGyil_usIH1q0il7YbBCQ. [cit. 2024-06-28].

11 Seznam symbolů

A	průřez	[m ²]
C	poměr hustot	[-]
D	průměr směšovací komory	[m]
d	průměr trysky	[m]
f	třecí faktor	[-]
K	ztrátový součinitel	[-]
L	délka směšovací komory	[m]
M	poměr objemových průtoků	[-]
N	tlakový poměr	[-]
P	celkový tlak	[Pa]
p	statický tlak	[Pa]
Q	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
R	poměr průřezů	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
V	rychlost v ejektoru	[m.s ⁻¹]
η	účinnost	[%]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
φ	úhel sklonu difuzoru	[°]

12 Seznam obrázků

Obrázek 1- Schéma injektoru [5] (1 – Dýza (tryska), 2- Difuzor, 3 – Přívod hnací látky, 4- Přívod dopravované látky, 5- Výstupní hrdlo)	12
Obrázek 2- Schéma mamutového čerpadla [7] (1 – Oddělovač vzduchu, 2- Hlavní trubka, 3 – Potrubí pro přívod stlačeného vzduchu,4- Sperlovač)	13
Obrázek 3- Schéma vodního trkače [8].....	14
Obrázek 4- princip Venturiho trubice [10].....	16
Obrázek 5-Požární ejektor [8].....	17
Obrázek 6- Přiměšovač [4].....	18
Obrázek 7- Míchací ejektory [2]	18
Obrázek 8- Samonasávací čerpadlo [4].....	19
Obrázek 9- Schéma čerpací stanice (Čerpadla a ejektor) [13]	20
Obrázek 10-Ejektor pro provzdušňování aktivačních nádrží [4]	22
Obrázek 11-schéma stříkací pistole pro nástřik studeným plynem: 1) přívod přídavného materiálu, 2) přívod ohřátého plynu, 3) tryska ve tvaru Lavalovy dýzy, 4) proud urychlených částic, 5) základní materiál [8].....	22
Obrázek 12- schéma vakuového ejektoru [11].....	23
Obrázek 13- chladicí systém s ejektorem [12]	24
Obrázek 14- Řez termokompresorem s regulací [4]	25
Obrázek 15- Schéma záložního kalového čerpadla s detailem ejektoru [14]	25
Obrázek 16- Schéma ejektoru – části [15]	26
Obrázek 17- Princip ejektoru a) konstrukční část, b) průběh tlaků, c) vývoj rychlostního profilu [12]	27
Obrázek 18-Dva základní typy směšovací komory [2].....	28
Obrázek 19- Schéma volného proudu ve směšovací komoře [8].....	29
Obrázek 20- přechod mezi směšovací komorou a difuzorem – 1) směšovací oblast, 2) krček,29	
Obrázek 21-Ideální a skutečné proudění difuzorem [15].....	30
Obrázek 22-Schéma ejektoru [13].....	31
Obrázek 23- charakteristiky ejektoru pro různé rozměry d_k – průměr krčku [13].....	33
Obrázek 24- Charakteristická křivka [16].....	33
Obrázek 25- Ejektor s vyznačenými neznámými veličinami [13]	34
Obrázek 26- Průměr a délka směšovací komory ejektoru [16].....	42
Obrázek 27- Ejektor pro experimenty [2]	44

Obrázek 28- Původní tryska [2]	45
Obrázek 29- Model nové trysky	45
Obrázek 30- Model sestavené trysky	46
Obrázek 31- Nová tryska – před montáží (vlevo) a po montáží (vpravo).....	46
Obrázek 32- Čtvercová průtočná deska	47
Obrázek 33- Kruhová průtočná deska	47
Obrázek 34- Průtočná deska s tvarem elipsy	48
Obrázek 35- Více děrová průtočná deska 7 děr	48
Obrázek 36- Více děrová průtočná deska 9 děr	49
Obrázek 37- Více děrová průtočná deska 13 děr	49
Obrázek 38- Průtočná plocha do tvaru hvězdy- 6 cípů	49
Obrázek 39- Inventor 2020 - tvorba modelu	51
Obrázek 40- Geometrie – DesignModeler	52
Obrázek 41- Ukázka sítě	53
Obrázek 42- Kvalita sítě.....	54
Obrázek 43-Skewness	55
Obrázek 44- Měřítka posouzení kvality sítě dle Skewness [23]	55
Obrázek 45- Orthogonal quality	56
Obrázek 46-Měřítka posouzení kvality sítě dle Orthogonal quality [23]	56
Obrázek 47- Ejektor Ansys	57
Obrázek 48- Nastavení vícefázového toku.....	58
Obrázek 49- Nastavení modelu turbulentního proudění	59
Obrázek 50- Nastavení řešiče.....	59
Obrázek 51- Residua	60
Obrázek 52- Hmotnostní tok na vstupu vzduchu	61
Obrázek 53- Hmotnostní tok na výstupu z ejektoru.....	61
Obrázek 54- Hustota směsi voda-vzduch na výstupu z ejektoru	62
Obrázek 55- Graf počet buněk – sledovaná veličina.....	63
Obrázek 56- Průměrná hustota směsi na výstupu z ejektoru – pulzování.....	65
Obrázek 57- Kruhová tryska – a) Celkový tlak, b) Rychlost, c) Hustota směsi	65
Obrázek 58- Čtvercová tryska – a) Celkový tlak, b) rychlost, c) hustota směsi	66
Obrázek 59- Elipsa – šířka – a) Celkový tlak, b) rychlost, c) hustota směsi.....	66
obrázek 60- Nasimulovaná charakteristická křivka ejektoru	68
obrázek 61- průměrná hustota směsi na výstupu	69

Obrázek 62- Čtvercová tryska – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost.....	70
Obrázek 63- Čtvercová tryska – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost.....	70
Obrázek 64- Elipsa šířka – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost	71
Obrázek 65- Elipsa výška – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost.....	71
Obrázek 66- 7 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost	72
Obrázek 67- 9 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost	72
Obrázek 68- 13 děr – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost	73
Obrázek 69- Hvězda – a) celkový tlak, b) hustota směsi, c) rychlost	73
Obrázek 70 – Schéma měřící tratě	75
Obrázek 71- Ejektor měření	75
Obrázek 72- Průtokoměr + tlakový snímač.....	76
Obrázek 73- Testované průtočné plochy.....	76
Obrázek 74 - Zapojený ejektor.....	77
Obrázek 75 - Graf – Objemový průtok vody vs. Tlak na sání vzduchu.....	79
Obrázek 76 – Tlak na sání vzduchu vs. Tlaková ztráta ejektoru.....	79
Obrázek 77 - Experimentálně vytvořené charakteristiky ejektoru.....	82
Obrázek 78- Porovnání charakteristických křivek ejektoru – simulace vs experiment	83
Obrázek 79 - Uzavření sání vzduchu – průběh rychlostí	85
Obrázek 80 - uzavření sání vzduchu – průběh tlaků	85

13 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Závislost tlakové ztráty difuzoru na velikosti vrcholového úhlu [15]	30
Tabulka 2- Ztrátové koeficienty navržené různými teoriemi [21]	43
Tabulka 3- Citlivostní analýza	62
Tabulka 4- Výsledky prvních simulací	64
Tabulka 5- vliv průtoku.....	67
Tabulka 6- vliv tvaru trysky	68
Tabulka 7- Vliv pozice trysky sekundárního toku	74
Tabulka 8 - Experiment uzavření – kruhová tryska	78
Tabulka 9- Experiment uzavření - 7 děr.....	78
Tabulka 10 - Experiment uzavření – hvězda.....	78
Tabulka 11- Experiment – kruhová tryska 60%.....	80
Tabulka 12- Experiment – kruhová tryska 75%.....	80
Tabulka 13 - Experiment – kruhová tryska 85 %.....	80
Tabulka 14 - Experiment – 7 děr 75%	81
Tabulka 15- Experiment - 7 děr 85%	81
Tabulka 16- Experiment – 7 děr 95%	81
Tabulka 17 - Experiment – hvězda 60%	81
Tabulka 18 - Experiment – hvězda 75%	82
Tabulka 19 - Experiment – hvězda 85%	82
Tabulka 20- Ověření simulace – uzavření sání vzduchu.....	84
Tabulka 21 - Ověření simulace při otevření sání vzduchu.....	86