

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

# **Ejektor pro odsávání inertů a kondenzátu z odparky**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Tauer</b>	Jméno: <b>Jakub</b>	Osobní číslo: <b>409119</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta strojní</b>		
Zadávací katedra/ústav:	<b>Ústav procesní a zpracovatelské techniky</b>		
Studijní program:	<b>Strojní inženýrství</b>		
Studijní obor:	<b>Procesní technika</b>		

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Ejektor pro odsávání inertů a kondenzátu z odparky**

Název diplomové práce anglicky:

**Ejector for evacuation of inerts and condensate from evaporator**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte vodou hnaný ejektor pro odsávání kondenzátu a inertních plynů z odparky o známých parametrech tlaku, teploty a požadovaného výkonu. V rámci práce zpracujte kompletní výpočty ejektoru, na jejichž základě budou určeny základní rozměry ejektoru, a vytvořte kompletní výkresovou dokumentaci ejektoru tak, aby bylo možno vyrobit laboratorní ejektor s modifikovatelnými základními rozměry (proměnnými parametry by měly být průměr a tvar dýzy, vzdálenost dýzy od směšovací komory, délka směšovací komory). Pro navržený ejektor vytvořte numerický model, s jehož pomocí bude možné provést numerické výpočty a jejich výsledky pak porovnat s výsledky experimentálních měření na reálném zařízení, případně optimalizovat navržený ejektor.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

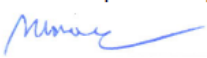
**Ing. Jiří Moravec, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**


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


\_\_\_\_\_

Datum zadání diplomové práce: **23.10.2017**      Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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


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

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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.

**31 -10- 2017**  
\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

  
\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## **Anotační list**

<b>Jméno autora:</b>	Jakub
<b>Příjmení autora:</b>	Tauer
<b>Název práce česky:</b>	Ejektor pro odsávání inertů a kondenzátu z odparky
<b>Název práce anglicky:</b>	Ejector for evacuation of inerts and condensate from evaporator
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 65 počet obrázků: 40 počet tabulek: 6 počet příloh: 7
<b>Akademický rok:</b>	2017/2018
<b>Jazyk práce:</b>	čeština
<b>Ústav:</b>	Ú 12 118 – Ústav procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Strojní inženýrství – Procesní technika
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Jiří Moravec, PhD.
<b>Oponent:</b>	Ing. Martin Dostál, PhD.
<b>Konzultant práce:</b>	
<b>Zadavatel:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12118

### **Anotace:**

Hlavním cílem této práce je navrhnout ejektor, který bude schopen odsávat kondenzát a inertní plyny z odparky a také stanovit provozní podmínky. Práce obsahuje teoretické odvození návrhových vztahů, popis návrhu experimentálního ejektoru, výsledky experimentů s ním provedených a jeho CFD simulace.

**Klíčová slova:** ejektor, proudové čerpadlo, odsávání odparky, vytváření podtlaku

### **Abstract:**

The main objective of this thesis is to design an ejector, which will be able to evacuate condensate and inert gases from the evaporator and also to establish an operating conditions. The thesis contains theoretical derivation of design relationships, description of experimental ejector design, results of experiments and its CFD simulation.

**Key words:** ejector, jet pump, evacuation of evaporator, creation of vacuum

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího Ing. Jiřího Moravce, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

V Praze dne .....

.....  
Jakub Tauer

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Moravcovi, Ph.D. za jeho podporu, ochotu, trpělivost a za všechny udělené rady k této diplomové práci a také své rodině za jejich podporu při jejím psaní.

## Obsah

1. Úvod .....	8
2. Využití ejektorů .....	9
3. Princip ejektoru .....	12
4. Součásti ejektoru.....	13
5. Teoretický základ návrhu ejektoru.....	15
Tlakový poměr $N$ .....	16
Poměr objemových průtoků $M$ .....	16
Účinnost zařízení .....	16
Poměr průřezů $R$ .....	16
Poměr délky směšovací komory vůči jejímu průměru $Z$ .....	17
Charakteristická křivka .....	17
Odvození vztahů.....	18
Ztráty .....	19
Rovnice pro výpočet celkových tlaků .....	20
Účinnost .....	22
Tlakový poměr.....	23
Průměr ústí trysky .....	24
Výpočet kavitací .....	25
6. Návrh pracovních podmínek a parametrů ejektoru .....	27
Určení hodnot ztrátových součinitelů.....	28
Stanovení tlakového, průtokového poměru a poměru průřezů .....	31
Stanovení charakteristické křivky.....	32
Výpočet účinnosti.....	33
Dopočítání zbývajících parametrů.....	33
Kontrola vzniku kavitací .....	34
Konečný design .....	35
7. Konstrukční návrh zařízení .....	37
Přívod hnací látky .....	37
Tryska .....	38
Směšovací komora .....	39
Směšovací trubice .....	39
Přívod sekundární látky .....	40
Difuzor .....	40
8. Experiment.....	42
Měření pro různé polohy trysky .....	42

Měření pro různé hodnoty průtoku při umístění trysky v poloze D .....	47
9. Numerická simulace .....	50
Geometrie a popis sítě .....	54
Popis simulace .....	56
Výsledky simulace .....	57
10. Závěr .....	61
11. List veličin .....	62
12. Zdroje a literatura .....	65

## 1. Úvod

V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na snižování nákladů na provoz zařízení, jsou ejektory využívány ve stále širším spektru oborů. Cílem této diplomové práce je navrhnout ejektor pro odsávání kondenzátu a inertních plynů z odparky pracující za nízkého tlaku.

V úvodní části lze najít základní seznámení s ejektory, možnosti jejich využití a základní součásti. Dále následuje výpočet pro návrh ejektoru typu kapalina-kapalina pro odsávání odparky v provozním stavu. Parametry jsou navrženy na základě dat stanovených při experimentech prováděných pro velké množství ejektorů o široké škále rozměrů typu kapalina-kapalina, které bylo možné získat na základě literární rešerše.

V další části jsou vypočtené parametry modifikovány pro návrh experimentálního ejektoru s možností řízení polohy trysky, sledování chování kapaliny ve směšovací komoře a jeho napojení na laboratorní hydraulickou trať. Byla zpracována jeho kompletní výkresová dokumentace.

Navržený ejektor byl dále experimentálně vyzkoušen pro různé polohy trysky ve směšovací komoře a různé hodnoty průtoku pro dosažení potřebného tlaku v odsávané uzavřené nádobě. Cílem experimentu bylo ověřit teoretický výpočet ejektoru a jeho použitelnost pro odsávání kondenzátu z odparky.

Na základě geometrie zařízení byl vytvořen numerický model, s jehož pomocí byly provedeny numerické výpočty, které byly porovnány s výsledky experimentálních měření.



## 2. Využití ejektorů

Ejektory jsou zařízení, která využívají kinetickou energii hnací látky (primární tok) k rozpočívání přisávané látky (sekundární tok) přímým smícháním. Látky mohou být kapalné i plynné a látka v sekundárním toku nemusí nutně být stejná jako primární. V některých aplikacích je možné ejektory přisávat i látky obsahující pevné částice. Nejběžnějšími typy ejektorů jsou zařízení plyn-plyn, kapalina-plyn a kapalina-kapalina. Při různých aplikacích se rozměry, parametry i typy ejektorů diametrálně liší. Někdy se místo pojmu ejektor můžeme setkat i s názvem proudové čerpadlo.

Ejektory jsou využívány v širokém spektru průmyslových odvětví. Velkou výhodou je jejich flexibilita a jednoduchost celé operace, navíc jsou velmi snadno udržovány. Jsou hojně využívány v oblastech, kde máme k dispozici kapalinu s vysokou energií, např. jako vedlejší produkt jiného procesu. To však neznamená, že by se ejektory nevyužívaly i jinde. O příkladech využití ejektorů pojednává např. literatura [1].

### **Aerace**

Ejektor může být připojen k odstředivému čerpadlu za účelem aerace kapaliny. Např. v uhelných dolech, kde aerací důlní vody dochází k oxidaci sloučenin železa a zajištění jejich sražení ještě před vypuštěním vody.

### **Hlubkové čerpání**

Při čerpání ropy nebo vody z hlubinných zásob je nutné umístění čerpadla přímo do šachty. Místo odstředivého čerpadla můžeme využít i ejektor. Odstředivé čerpadlo je poté umístěno na povrchu a poskytuje hnací kapalinu menšímu ejektoru, který je umístěn v šachtě. Velkou výhodou je, že není třeba do šachty umísťovat žádné pohyblivé součásti, není třeba téměř žádná údržba a odstředivé čerpadlo můžeme postavit na pohodlné místo. Stejný systém může být použit i při vyčerpávání nákladu z velkých tankerů pro libovolné medium. Pro svou jednoduchost je tento systém často využívá k čerpání užitkové vody, zejména v USA a v Kanadě.

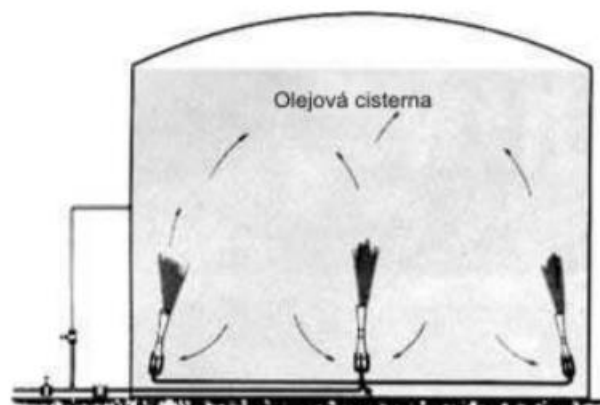
### **Mazání**

Jednoduchost a nízká váha jsou důvodem využití ejektorů v mazacích systémech, zejména v leteckém průmyslu. Hlavní výhodou je absence mechanické hnací soustavy, která je

nezbytná u konvenčních čerpadel. Problém může nastat kvůli kavitacím, ke kterým dochází ve velkých výškách letu-

### **Míchání olejů**

Pomocí ejektorů a čerpadla můžeme promíchávat látky s velkou viskozitou. Jako hnací médium zapojíme látku odebíranou z horní části nádrže, kterou pomocí čerpadla vháníme do ejektorů. V nich důsledkem vzniku podtlaku dochází k přisávání látky z dolní části nádrže a jejímu cirkulování [3], viz obrázek č. 1:



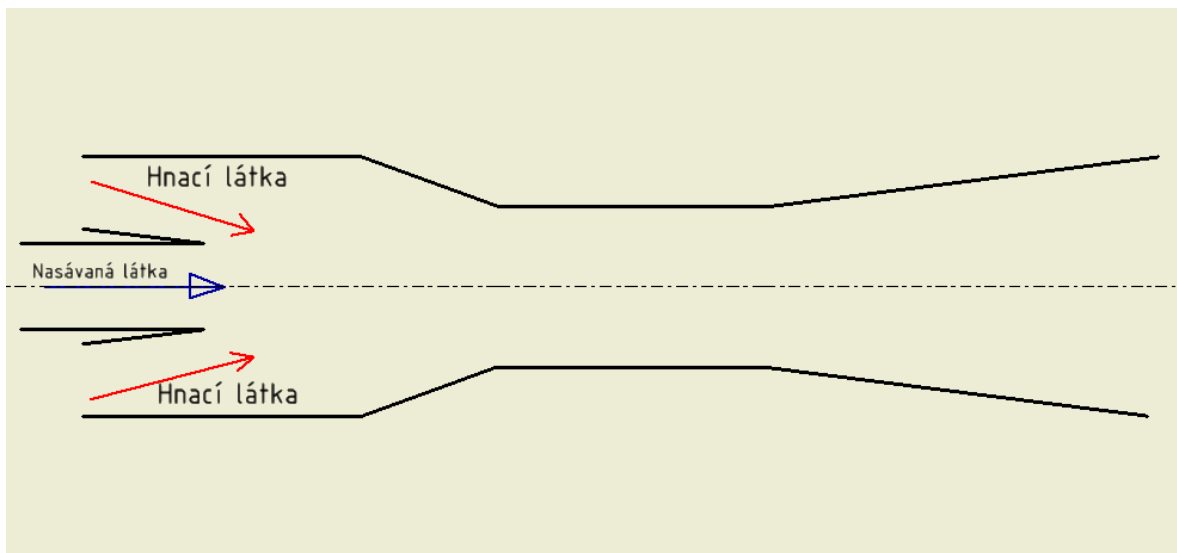
Obrázek 1 - Míchání oleje [3]

### **Jaderný průmysl**

Ejektory jsou často používány v jaderném průmyslu k přepravě radioaktivních materiálů a suspenzí nebo k vytvoření podtlaku. Mohou být také využity jako recirkulační zařízení pro pohon chladiva v jádru reaktoru, čímž můžeme snížit počet recirkulačních smyček, množství potrubí a ventilů [1]. Hlavní výhodou je vysoká spolehlivost a nízká potřeba údržby.

### **Přeprava pevných látek**

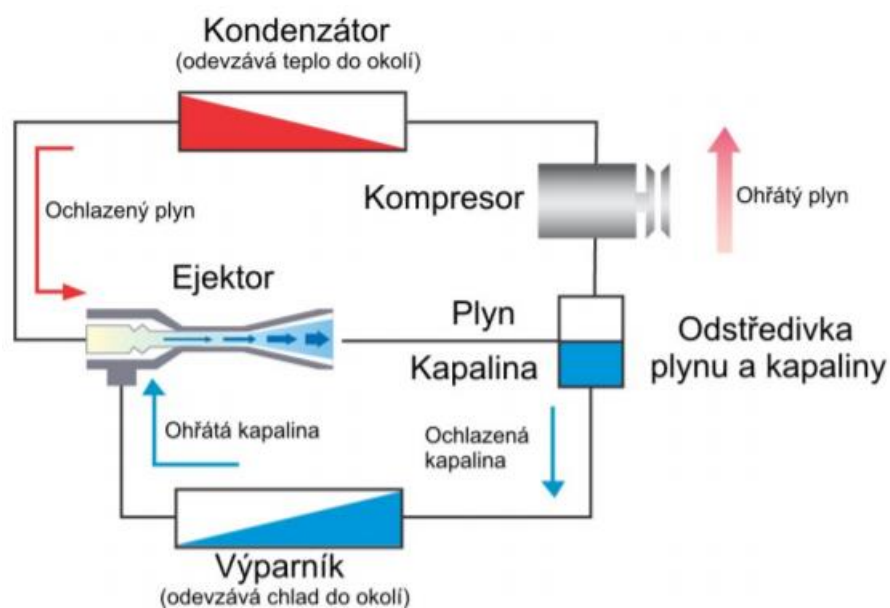
Plynové ejektory lze využít jako pohony pro dopravu pevných látek v potrubí (uhlí, písek, popel, radioaktivní materiály, potravinářský průmysl). Zde se využívají zejména prstencové ejektory, kde jsou pevné částice přiváděny středem zařízení. Dochází tak jen k minimálnímu kontaktu se stěnami směšovací komory, čímž předcházíme abrazi nebo poškození citlivých materiálů. Princip prstencového ejektoru je vidět na obrázku č. 2.



Obrázek 2 - Prstencová tryska

### Ejektorový chladicí systém

Ejektorový chladicí systém a jeho hlavní části můžeme vidět na obrázku č. 3.



Obrázek 3 - Ejektorový chladicí systém [2]

Celý chladicí systém pracuje tak, že kompresor přijímá plynné chladivo, které přivádí do kondenzátoru, kde dochází k přenosu tepla do okolí. Ochlazené plynné chladivo poté vstupuje do trysky ejektoru, kde na úkor snížení tlaku zvýší svoji rychlost. Vytvoří se podtlak na výstupu z trysky a dojde k přisávání kapalného chladiva z výparníku. Poté následuje

smíšení ve směšovací komoře a dále přes difuzor směs chladiva pokračuje do odstředivky, kde se odloučí plynné a kapalné chladivo a celý proces se opakuje.

Zužitkováním ejektoru v chladicím zařízení je možné využít energii, která se u konvenčních zařízení běžně ztrácí. Dále z odstředivky vychází plynné chladivo do kompresoru pod větším tlakem, jsme tedy schopni snížit příkon kompresoru až o 60-70% [2].

### Požární ejektor

Přenosné požární ejektory se používají k odčerpávání vody z těžko přístupných prostor nebo z větších hloubek (výtláčná výška kolem 20 m). K pohonu se využívá tlaková voda, kterou obstarává hydrant nebo hasičský vůz. V dnešní době už na ně ale kvůli novějším výkonnějším ponorným čerpadlům příliš nenarazíme. Na obrázku č. 4 je vidět stojatý a ležatý požární ejektor [3].



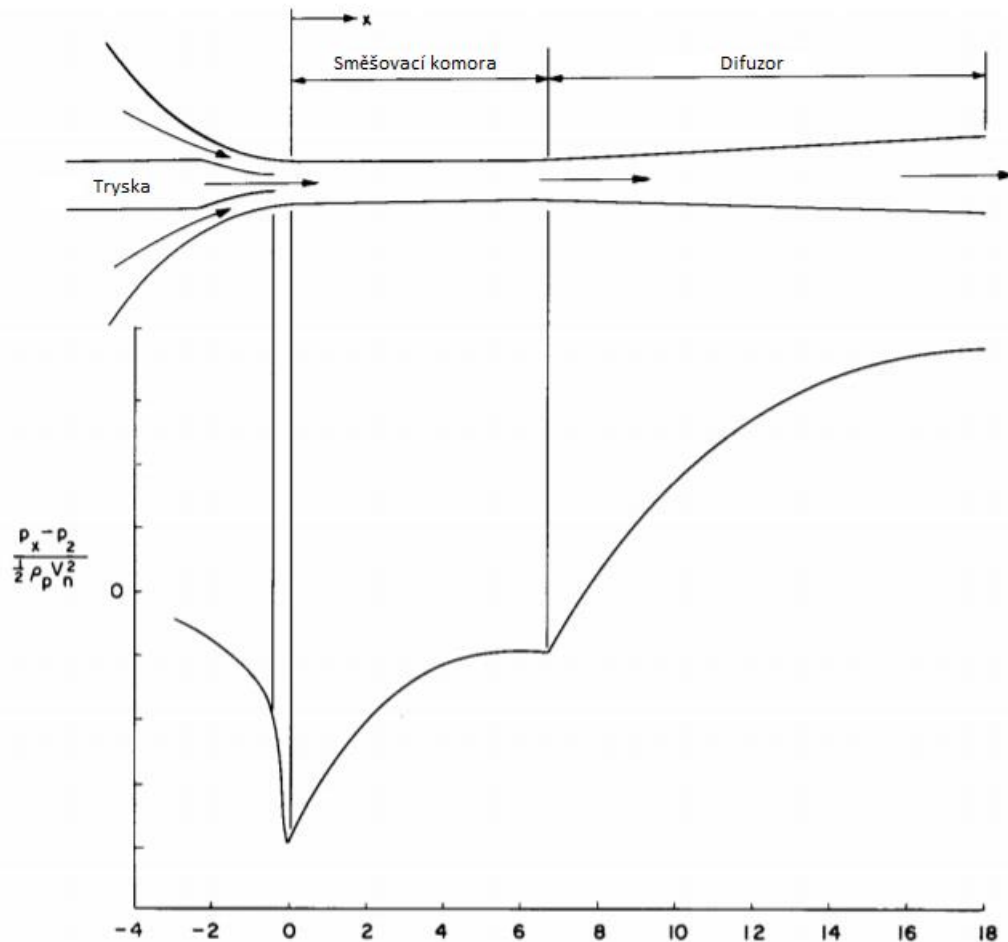
Obrázek 4 - Požární ejektor stojatý (vpravo) a ležatý [3]

### 3. Princip ejektoru

Ejektor je zařízení, ve kterém je kinetická energie hnacího (primárního) proudu využívána k pohonu sekundárního proudu. Obvykle dochází k akceleraci hnací kapaliny v trysce, přes kterou dochází k vstupu do prostoru se sekundární látkou. Pokles tlaku na výstupu z trysky indukují proud sekundární látky ve směru toku látky hnací. Sekundární látka je unášena díky viskóznímu tření dále do směšovací komory, kde dochází díky turbulentnímu směšování k přenosu energie a hybnosti z primární látky na látku sekundární. Kvůli míšení

dvou látek s rozdílnou rychlostí dochází ke ztrátě kinetické energie. Na konci směšovací komory by měl být přenos hybnosti ukončen a smíchaná látka pokračuje přes difuzor k vypuštění ze zařízení. V difuzoru dochází k částečné obnově statického tlaku.

Obecné schéma ejektoru s typickým rozložením statického tlaku je vidět na obrázku č. 5.



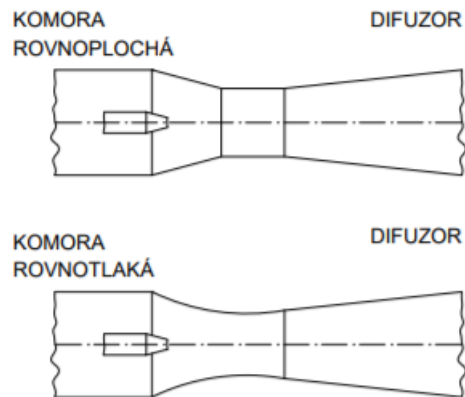
Obrázek 5 - Rozložení statického tlaku v ejektoru [1]

#### 4. Součásti ejektoru

Existuje mnoho různých druhů ejektorů v rozdílných provedeních pro různé aplikace. Součásti, které je ale bez výjimky charakterizují, jsou směšovací komory. V této součásti dochází k turbulentnímu smíšení primárního a sekundárního proudu, což je základní princip fungování každého ejektoru.

Můžeme se setkat se dvěma typy směšovacích komor - rovnoplochou nebo rovnotlakou. Rovnoplochá se vyznačuje tím, že má konstantní vnitřní průměr, rovnotlaká tím, že ve směšovací komoře je stálý tlak. Obvykle se pro ejektory typu kapalina-kapalina volí komora

rovnoplochá, neboť konstrukční návrh je výrazně jednodušší než u rovnotlaké. Zároveň je také výrobně výrazně jednodušší a levnější [8]. Rovnotlaká komora se využívá více u zařízení typu plyn-plyn. Provedení obou variant komor je znázorněno na obrázku č. 6.



Obrázek 6 - Dva základní typy směšovací komory [8]

Použití všech ostatní komponent záleží na aplikaci ejektoru. Při jeho návrhu je třeba zvážit využití následujících možností.

a) Primární tryska

Téměř ve všech případech je využíváno trysky ke vstřiku hnacího media do směšovací komory, dochází k ekonomicky výhodnému urychlení kapaliny.

Jako alternativu klasické trysky lze umístit trysku prstencovou, jejíž princip můžeme vidět na obrázku č. 2. Směšovací komory pro tyto trysky jsou kratší a dochází zde k rychlejšímu mísení. Naopak se zde ale objevují značné třecí ztráty.

Pro jednu směšovací komoru můžeme zapojit více hnacích trysek. Použitím většího množství vstupů můžeme opět zkrátit délku směšovací komory nebo zabraňovat vzniku kavitací. Taková zařízení se nazývají vícetrysková.

Umístěním více ejektorů do série (vícestupňová zařízení) můžeme docílit přísávání většího množství sekundární látky. Tím, že rozdělíme přísávání sekundární látky mezi více ejektorů, můžeme zamezit vzniku kavitací, které se objevují při vysokých rychlostech na vstupu sekundární látky. Ejektory lze umístit i paralelně. Např. při odsávání nádoby dokážeme paralelním zapojením více ejektorů rychleji dosáhnout požadovaného tlaku.

b) Pozice trysky

Na účinnost a celkovou funkci ejektoru má značný vliv poloha trysky. Její pozici můžeme měnit axiálně nebo trysku umístit zcela mimo osu. Tím můžeme dosáhnout lepšího rozstříku hnacího media do směšovací komory [1].

c) Difuzor

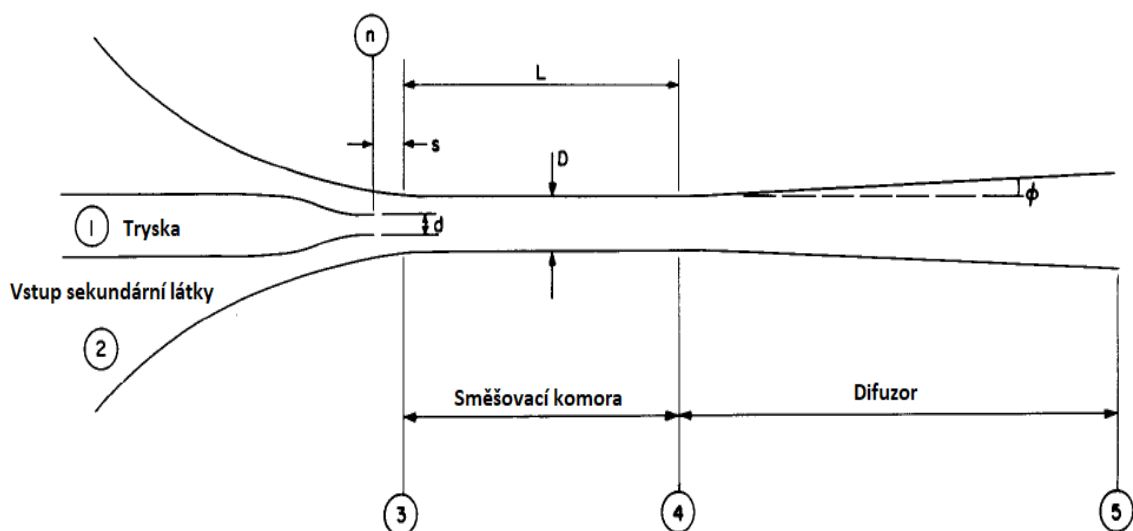
Využití difuzoru není vždy potřeba, zvláště pokud rychlost kapaliny na výstupu ze směšovací komory je přijatelná pro dané potrubní síť a průměr směšovací komory se od průměru potrubí příliš neliší.

d) Vstup sekundární látky

Vstup hnané látky může být radiální, axiální nebo i pod určitým úhlem. Záleží na využití ejektoru.

## 5. Teoretický základ návrhu ejektoru

Cílem návrhu je vytvořit takový ejektor, který bude pro zadané hodnoty tlaků a průtoků pracovat s co nejvyšší účinností. Na obrázku č. 7 můžeme vidět obecné schéma s indexy v klíčových místech využívaných pro návrh zařízení. Použitý postup je převzatý zejména z literatury [1].



Obrázek 7 - Obecné schéma pro návrh ejektoru [1]

V tomto případě budou návrhové parametry ejektoru nejčastěji vyjádřeny bezrozměrnými poměry, které popisují geometrii nebo pracovní podmínky v zařízení. Pět nejzákladnějších poměrů lze definovat níže uvedenými parametry, které jsou odvozeny později v této kapitole.

#### **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.

#### **Účinnost zařízení**

$$\eta = \frac{Q_s \cdot (P_5 - P_2)}{Q_p \cdot (P_1 - P_5)} = M \times N \quad (5.3)$$

#### **Poměr průřezů R**

$$R = \frac{A_n}{A_m} \quad (5.4)$$

Tento poměr je jedním z nejdůležitějších návrhových parametrů, funguje podobně jako specifická rychlost u odstředivých čerpadel. Vyjadřuje poměr průřezu v místě ústí trysky vůči průměru směšovací komory.



Malý poměr průřezů ( $R = 0,1$ ) je charakteristický pro nízkotlaká zařízení s vysokým poměrem průtoků. Naopak vysoké hodnoty ( $R = 0,6$ ) jsou typické pro vysokotlaká zařízení s nízkým průtokovým poměrem.

#### **Poměr délky směřovací komory vůči jejímu průměru $Z$**

$$Z = \frac{L}{D} \quad (5.5)$$

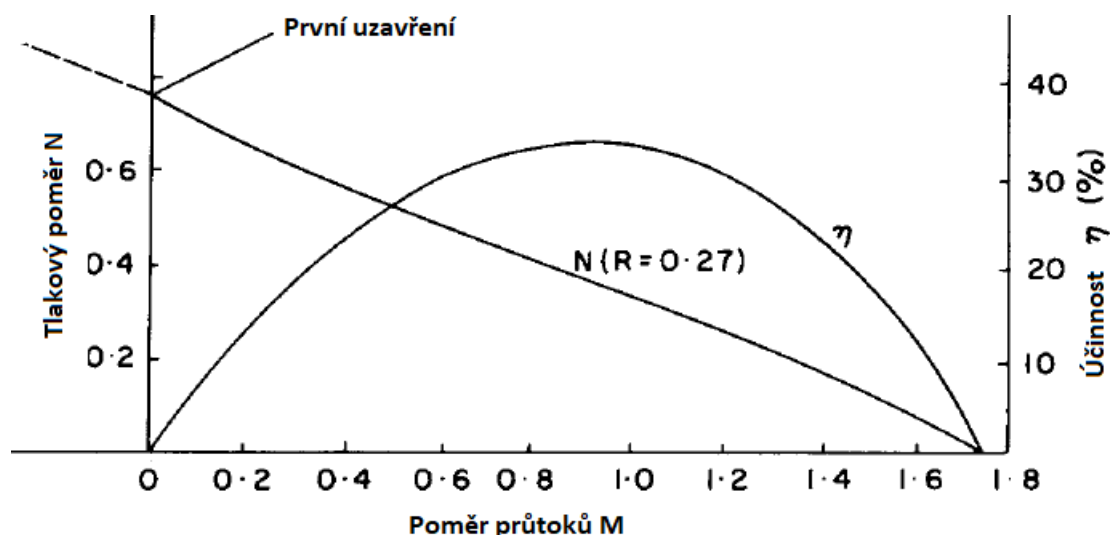
Poměr délky směřovací komory vůči jejímu průměru je většinou určen polohou trysky. Existuje více možností pro návrh délky směřovací komory. Pro trysku v ose zařízení ji lze stanovit jako sedminásobek průměru [1]. Vždy je zapotřebí, aby se proud vycházející z trysky rozpadal před koncem směřovací komory, jinak by docházelo ke zbytečným ztrátám.

Účinnost ejektoru definovaná rovnicí (5.3) je v reálném případě snížena o tření, ztráty, škracení na přívodu sekundární látky nebo ztrátu kinetické energie kvůli míšení ve směřovací komoře. Nejvyšší hodnoty, kterých lze v praxi dosáhnout, se pohybují mezi 30-40% [1].

Nejlepší účinnost ejektoru není většinou závislá na jeho velikosti, výjimkou jsou velice malá zařízení s vysokou viskozitou pracovních látek. Zde dochází kvůli velmi malým Reynoldsovým číslům k narušení procesu míšení. Pro nízká Reynoldsova čísla se rapidně zvyšuje ztrátový součinitel trysky  $K_p$ , je tedy naší snahou vyhnout se laminární oblasti proudění [1].

#### **Charakteristická křivka**

Charakteristická křivka ejektoru popisuje jeho chování v kompletní škále pracovních podmínek. Využijeme závislost tlakového poměru na poměru objemových průtoků pro určitou hodnotu poměru průřezů. Charakteristickou křivku typickou pro ejektory doplněnou o účinnost si můžeme prohlédnout na obrázku č. 8.



Obrázek 8 - Charakteristická křivka ejektoru [1]

Pokud zvyšujeme tlak na výstupu z difuzoru  $P_5$ , postupně dojde k tomu, že do směšovací komory začne vstupovat pouze primární (hnací) proud. Tento stav, kdy  $M = 0$  a  $N = N_0$  nazýváme prvním uzavřením. Je to zároveň stav, kdy při dalším zvýšení tlaku  $P_5$  dojde ke zpětnému sekundárnímu toku a k vytékání části hnacího média vstupem sekundárního média ( $M$  nabývá záporných hodnot). Hodnoty  $N_0$  a  $M_0$  jsou takové hodnoty poměrů, při kterých charakteristická křivka protíná jednu nebo druhou osu.

Naopak, pokud snižujeme tlak  $P_5$  (tedy i tlakový poměr  $N$ ), průtokový poměr roste, dokud nedosáhne hodnoty  $M = M_0$ . Obvykle ještě před dosažením tohoto stavu dojde ke vzniku významných kavitací, ve speciálních případech lze pracovat při podmínkách, kdy tlak  $P_5$  je nižší než tlak  $P_2$  (tlak na vstupu sekundární látky) a tlakový poměr  $N$  tedy dosahuje záporných hodnot.

Normální pracovní stav ejektoru se nachází zhruba uprostřed charakteristické křivky. Na obrázku č. 8 si také můžeme všimnout účinností, jejichž hodnoty lze snadno dopočítat ze vztahu (5.3).

### Odvození vztahů

Při návrhu ejektoru je třeba nejdříve omezit podmínky, které pro daný návrh budou platit. Předpoklady návrhu ejektoru v této práci jsou následující:

- 1) Ejektor je navrhován pro provozní podmínky pro odsávání kondenzátu. Primární a sekundární proud jsou tedy nestlačitelné kapaliny.
- 2) Jedná se o jednodimensionální proudění s výjimkou směšovací komory.
- 3) Rovina na výstupu z trysky se shoduje s rovinou směšovací komory.
- 4) Míšení látek je ukončeno ještě před vstupem do difuzoru.
- 5) Směšovací komora je rovnoplochá (má konstantní průřez).
- 6) Tloušťku stěny ústí trysky uvažujeme nulovou.

### Ztráty

Ztráty v jednotlivých částech ejektoru vyjadřujeme bezrozměrnými ztrátovými součiniteli. Ztráty, ke kterým dochází před a za ejektorem, při výpočtu neuvažujeme a měl by se na ně brát zřetel při návrhu hnacího systému.

### Primární tryska

Ztrátový součinitel může být vyjádřen na základě tlakové difference v trysce:

$$K_p = \frac{P_1 - p_n}{\frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot V_n^2} - 1 \quad (5.6)$$

P vyjadřuje absolutní tlak, p tlak statický, ρ hustotu média a V rychlost. Jednotlivé indexy pak značí místa dle obrázku č. 7.

### Vstup sekundární látky

Ztráty vyjádříme stejným způsobem, jako pro primární trysku:

$$K_s = \frac{P_2 - p_3}{\frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_3^2} - 1 \quad (5.7)$$

### Směšovací komora

Ztrátový součinitel ve směšovací komoře je definován:

$$K_m = \frac{4 \cdot f \cdot L}{D} \quad (5.8)$$

kde f je třecí faktor, který lze spočítat:

$$f = \frac{\Delta p}{2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot V_4^2} \quad (5.9)$$

### Difuzor

Ztrátový součinitel v difuzoru je definován:

$$K_d = \frac{P_4 - p_5}{\frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot V_4^2} \quad (5.10)$$

Pro vyjádření ztrát lze využít i koeficient obnovy statického tlaku  $C_{pr}$ :

$$C_{pr} = \frac{p_5 - p_4}{\frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot V_4^2} \quad (5.11)$$

Poté můžeme ztrátový součinitel v difuzoru vyjádřit:

$$K_d = 1 - \left(\frac{A_4}{A_5}\right)^2 - C_{pr} \quad (5.12)$$

### Rovnice pro výpočet celkových tlaků

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

$$P_1 = p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot V_n^2 + p_{zt} \quad (5.13)$$

$$P_2 = p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_3^2 + p_{zs} \quad (5.14)$$

$$P_5 = p_4 + \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot V_4^2 + p_{zd} \quad (5.15)$$

kde  $p_{zt}$ ,  $p_{zs}$  a  $p_{zd}$  představují tlakovou ztrátu trysky, sekundárního vstupu a difuzoru. Po dosazení za tlakové ztráty:

$$p_{zx} = K_x \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_x \cdot V_x^2\right) \quad (5.16)$$

dostáváme vztahy pro výpočet tlaků:

$$P_1 = p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot V_n^2 \cdot (1 + K_p) \quad (5.17)$$

$$P_2 = p_3 + \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_3^2 \cdot (1 + K_s) \quad (5.18)$$

$$P_5 = p_4 + \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot V_4^2 \cdot (1 + K_d) \quad (5.19)$$

Rovnici kontinuity pro ejektor lze zapsat:

$$\rho_p \cdot Q_p + \rho_s \cdot Q_s = \rho_d \cdot Q_d \quad (5.20)$$

Využitím poměru objemových průtoků  $M$  a poměru průřezů  $R$ , které jsou definovány vztahy (5.2) a (5.4), lze vyjádřit rychlost na vstupu do difuzoru  $V_4$  a rychlost na vstupu sekundární látky  $V_3$ , jako funkci rychlosti v ústí trysky  $V_n$ :

$$V_4 = R \cdot (1 + M) \cdot V_n \quad (5.21)$$

$$V_3 = \frac{M \cdot R}{1 - R} \cdot V_n \quad (5.22)$$

Pokud do následujícího vztahu pro zachování hybnosti ve směšovací komoře:

$$p_3 \cdot A_3 + \rho_p \cdot Q_p \cdot V_n + \rho_s \cdot Q_s \cdot V_3 = p_4 \cdot A_4 + \rho_m \cdot Q_m \cdot V_4 + p_{z\tau} \quad (5.23)$$

kde  $p_{z\tau}$  představuje ztráty třením ve směšovací komoře, které vyjádříme pomocí  $K_m$  a dosazením rychlostí  $V_3$  a  $V_4$  ze vztahů (5.21) a (5.22), dostáváme:

$$(p_4 - p_3) \cdot A_4 = \rho_p \cdot A_n \cdot V_n^2 - \rho_s \cdot (A_3 - A_n) \cdot \left(\frac{MR}{1-R}\right)^2 \cdot V_n^2 - \rho_d \cdot A_4 \cdot R^2 \cdot (1+M)^2 \cdot V_n^2 - \rho_d \frac{4 \cdot f \cdot L}{D} \cdot R^2 \cdot (1+M)^2 \cdot \frac{V_n^2}{2} \quad (5.24)$$

Celkový rozdíl tlaků mezi vstupem sekundární látky a difuzorem lze zapsat využitím rovnic (5.18) a (5.19):

$$P_5 - P_2 = p_4 - p_3 + (1 + K_d) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot V_4^2 - (1 + K_s) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_3^2 \quad (5.25)$$

Dosažením vztahu (5.24) a poměru hustot  $C = \rho_s/\rho_p$  dostáváme výsledný vztah pro celkový rozdíl tlaků:

$$P_5 - P_2 = \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \left[ 2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1 - K_m - K_d)(1 + CM)(1 + M) - C(1 + K_s) \left(\frac{MR}{1-R}\right)^2 \right] \quad (5.26)$$

Stejný postup využijeme pro rozdíl tlaků mezi vstupem do trysky a výstupem z difuzoru. Dostaneme výsledný vztah:

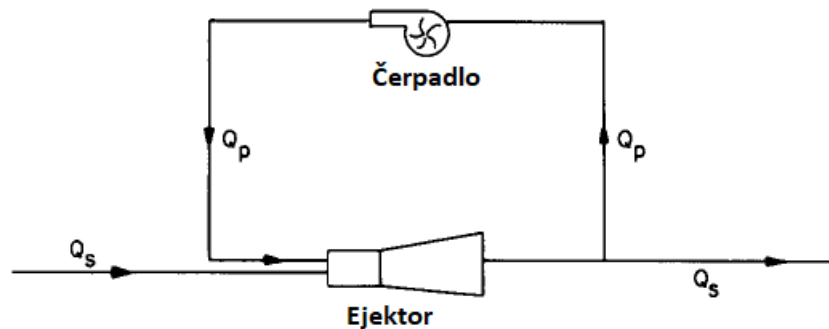
$$P_1 - P_5 = \frac{1}{2} \rho_p V_n^2 \left[ -2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1 + K_m + K_d)(1 + CM)(1 + M) + (1 + K_p) \right] \quad (5.27)$$

## Účinnost

Účinnost není z funkčního hlediska příliš důležitým parametrem, protože se ejektory často využívají ve spojení s dalšími zařízeními (např. čerpadla), jejichž účinnost je z energetického hlediska zásadnější. I přesto je pro nás výpočet účinnosti ejektoru důležitý pro jeho správný návrh.

Účinnost jakéhokoliv zařízení lze obecně definovat jako poměr energie užitečné (např. práce vykonaná strojem) k celkové energii dodané do systému. Pokud toto aplikujeme na typický ejektor, který můžeme vidět na obrázku č. 9, kde  $P_{ref}$  je referenční tlak, vůči kterému počítáme tlakovou diferencí, dostáváme vztah:

$$\frac{(Q_p + Q_s) \times (P_5 - P_{ref})}{Q_p(P_1 - P_{ref}) + Q_s(P_2 - P_{ref})} \quad (5.28)$$



Obrázek 9 - Schéma oběhu ejektoru

Pro náš případ můžeme použít tlak  $P_2$  jako referenční. Po roznásobení čitatele a přičtení a odečtení  $P_5$  ve jmenovateli dostaneme:

$$\frac{Q_p(P_5 - P_2) + Q_s(P_5 - P_2)}{Q_p(P_5 - P_2) + Q_p(P_1 - P_5)} \quad (5.29)$$

Změna energie kapaliny, která recirkuluje, je minimální, můžeme tedy člen  $Q_p(P_5 - P_2)$  zanedbat. Výsledný vztah pro účinnost ejektoru, uvedený ve vztahu (5.3), tedy je:

$$\eta = \frac{Q_s(P_5 - P_2)}{Q_p(P_1 - P_5)}$$

### Tlakový poměr

S rovnicí (5.3) souvisí vztah pro tlakový poměr  $N$ , uvedený vztahem (5.1):

$$N = \frac{P_5 - P_2}{P_1 - P_5}$$

Pokud do tohoto vztahu dosadíme z rovnic (5.26) a (5.27), dostáváme vztah:

$$N = \frac{2R + \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d) - \frac{CM^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)}{(1+K_p) - 2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} + R^2(1+CM)(1+M)(1+K_m+K_d)} \quad (5.30)$$

Pokud je hustota primárního a sekundárního proudu stejná ( $C=1$ ), což můžeme využít pro ejektor typu voda-voda, lze vztah pro tlakový poměr vyjádřit:

$$N = \frac{2R + \frac{2M^2R^2}{1-R} - R^2(1+M)(1+M)(1+K_m+K_d) - \frac{M^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)}{(1+K_p) - 2R - \frac{2M^2R^2}{1-R} + R^2(1+M)^2(1+K_m+K_d)} \quad (5.31)$$

### Průměr ústí trysky

Z rovnic pro výpočet tlaků  $P_1$  a  $P_2$  lze také získat vztah pro průměr ústí trysky. Spojením rovnic (5.17) a (5.18) dostaneme:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho_p V_n^2(1+K_p) - \frac{1}{2}\rho_s V_3^2(1+K_s) \quad (5.32)$$

Vyjádřením rychlosti na vstupu do sekundárního proudu  $V_3$  pomocí rychlosti na výstupu z trysky  $V_n$  ze vztahu (5.22) a zapojením poměru hustot  $C$ , získáme rovnici:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho_p V_n^2 \left[ (1+K_p) - C(1+K_s) \left( \frac{MR}{1-R} \right)^2 \right] \quad (5.33)$$

Rychlost na výstupu z trysky nyní vyjádříme pomocí objemového průtoku přes průřez, čímž přejde rovnice (5.33) do tvaru:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho_p \left( \frac{Q_p}{A_n} \right)^2 \left[ (1+K_p) - C(1+K_s) \left( \frac{MR}{1-R} \right)^2 \right] \quad (5.34)$$



Výsledný vztah získáme vyjádřením průřezu:

$$A_n = Q_p \left[ \frac{(1 + K_p) - C(1 + K_s) \left( \frac{MR}{1 - R} \right)^2}{\frac{(P_1 - P_2)}{\frac{1}{2} \rho_p}} \right]^{1/2} \quad (5.35)$$

### Výpočet kavitací

Parametr (index) pro předpověď kavitací můžeme získat aplikací principů zachování hybnosti a energie na vstupu sekundární látky. Nejdříve upravíme vztah (5.18):

$$\frac{P_2 - p_3}{\frac{1}{2} \rho_s V_3^2} = 1 + K_s \quad (5.36)$$

A definujeme index kavitací jako:

$$\sigma = \frac{P_2 - p_n}{\frac{1}{2} \rho_s V_3^2} \quad (5.37)$$

Pokud předpokládáme, že dochází k rušení tlakového růstu kvůli vzniku kavitace, můžeme říct, že statický tlak na výstupu z trysky  $p_n$  se rovná tlaku sytých par kapaliny  $p_v$ . Můžeme tedy napsat vztah pro mezní hodnotu  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{P_2 - p_v}{\frac{1}{2} \rho_s V_{3c}^2} = 1 + K_s \quad (5.38)$$

Je třeba vzít v úvahu, že ztrátový součinitel na vstupu sekundární látky je definován pouze pro podmínky bez kavitací. Využitím vztahu (5.22) a přidáním poměru hustot  $C$  lze tento součinitel eliminovat:

$$\sigma = (P_2 - p_v) \frac{1}{\frac{1}{2} C \rho_p} \left( \frac{1 - R}{M_c R V_n} \right)^2 \quad (5.39)$$

kde  $M_c$  je limitní hodnota poměru průtoků pro vznik kavitací. Můžeme ji vyjádřit:

$$M_c = \frac{1-R}{R} \left[ \frac{P_2 - p_v}{\frac{1}{2} \rho_p V_n^2 C \sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.40)$$

Jako alternativu pro limitní hodnoty poměru průtoků můžeme využít minimální tlak sekundárního média k zamezení vzniku kavitací  $P_{2req}$ :

$$P_{2req} = \frac{1}{2} \rho_s V_3^2 \sigma + p_v \quad (5.41)$$

$$P_{2req} = \frac{1}{2} \rho_p C \sigma \left( \frac{MR V_n}{1-R} \right)^2 + p_v \quad (5.42)$$

$$P_{2req} = \frac{1}{2} \rho_p C \sigma \left( \frac{Q_p}{A_n} \frac{MR}{1-R} \right)^2 + p_v \quad (5.43)$$

Při návrhu každého ejektorového zařízení je třeba porovnat tlak  $P_2$  s minimálním tlakem  $P_{2req}$ , aby nedocházelo v zařízení ke vzniku kavitací.

## 6. Návrh pracovních podmínek a parametrů ejektoru

Cílem této práce je navrhnout vodou hnaný ejektor pro odsávání kondenzátu a inertních plynů z odparky se známým výkonem, tlakem i teplotami. Tyto hodnoty jsou zapsány v tabulce č. 1. Navržený ejektor musí být schopen dostat odparku do provozního stavu odsáváním vzduchu.

Vzhledem k tomu, že ejektor bude většinu času odsávat kondenzát, návrh bude probíhat pro typ kapalina-kapalina, resp. voda-voda. Cílem je navrhnout kompaktní ejektor, který lze ověřit experimentem pro odsávání vzduchu z uzavřené nádoby.

Tabulka 1 - Parametry odparky

Pracovní teplota	40	[°C]
Pracovní tlak	7,1	[kPa]
Objem zařízení	1,3	[m <sup>3</sup> ]
Požadovaný výkon	6000	[kg/den]
Množství odsávaného kondenzátu	0,00007	[m <sup>3</sup> /s]
Maximální tlak v oběhu ejektoru	6	[bar]

Výsledkem návrhu s využitím vztahů z kapitoly č. 5 jsou základní parametry ejektoru, kterými jsou průměr ústí trysky, pracovní tlaky  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_5$ , průměr a délka směšovací komory a průtok hnací vody. Nejdříve stanovíme hrubé hodnoty pracovních parametrů, které poté upravíme iterační metodou. Ke stanovení hodnot ztrátových součinitelů a poměrů v ejektoru využijeme zejména grafy, které jsou převzaty ze zdroje [1] a jejich hodnoty jsou vyneseny na základě laboratorních experimentů s ejektory o známých parametrech.

V tabulce č. 2 můžeme vidět základní parametry ejektoru, které jej zcela specifikují. Před samotným návrhem je třeba jasně stanovit klíčová kritéria pro návrh. Např. u ejektoru, kde známe průtoky, snadno stanovíme poměr průtoků a tlaky na vstupech primární a sekundární látky. Pro návrh našeho ejektoru je klíčové množství odsávaného kondenzátu, tedy průtok sekundární látky  $Q_s$  a tlak sekundární látky  $P_2$ , kterého je třeba dosáhnout, aby docházelo k odpařování při 40°C. Zároveň je třeba nepřekročit maximální dovolený tlak v oběhu ejektoru.

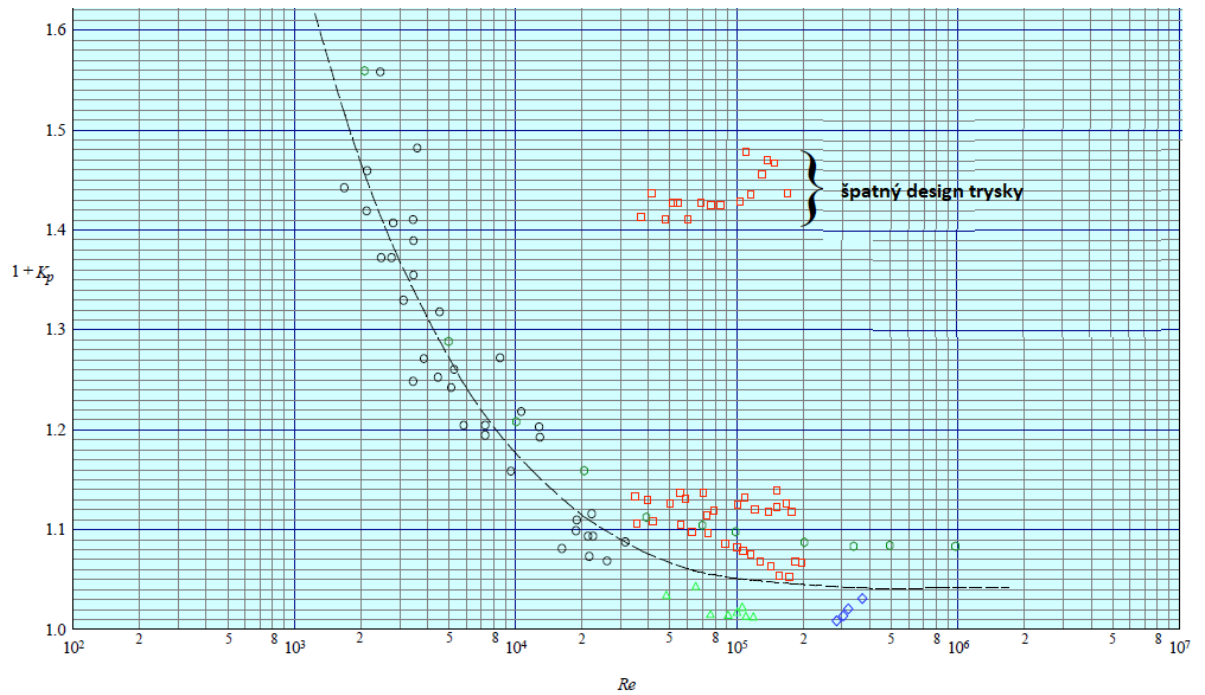
Tabulka 2 – Základní parametry pro návrh

Parametr	Vztah
Tlak na vstupu primární látky	$P_1 = [P_5(N + 1) - P_2]/N$
Tlak na vstupu sekundární látky	$P_2 = P_5 - N(P_1 - P_5)$
Tlak na výstupu z difuzoru	$P_5 = (NP_1 + P_2)/(N + 1)$
Tlakový poměr	$N = (P_5 - P_2)/(P_1 - P_5)$
Primární průtok	$Q_p = Q_s/M$
Sekundární průtok	$Q_s = Q_p \cdot M$
Poměr průtoků	$M = Q_s/Q_p$
Průměr směšovací komory	$D$
Délka směšovací komory	$L = 7D$
Průměr trysky	$d = D \cdot \sqrt{R}$
Sklon difuzoru	$2\Phi$
Hustota primární látky	$\rho_p$
Hustota sekundární látky	$\rho_s$
Poměr hustot	$C = \rho_s/\rho_p$
Kavitační index	$\sigma = (P_2 - p_v)/\frac{1}{2}\rho_s V_3^2$
Ztrátový součinitel na vstupu pr. látky	$K_p$
Ztrátový součinitel na vstupu sek. látky	$K_s$
Ztrátový součinitel směšovací komory	$K_m$
Ztrátový součinitel difuzoru	$K_d$

### Určení hodnot ztrátových součinitelů

V první řadě je třeba určit hodnoty ztrátových součinitelů.

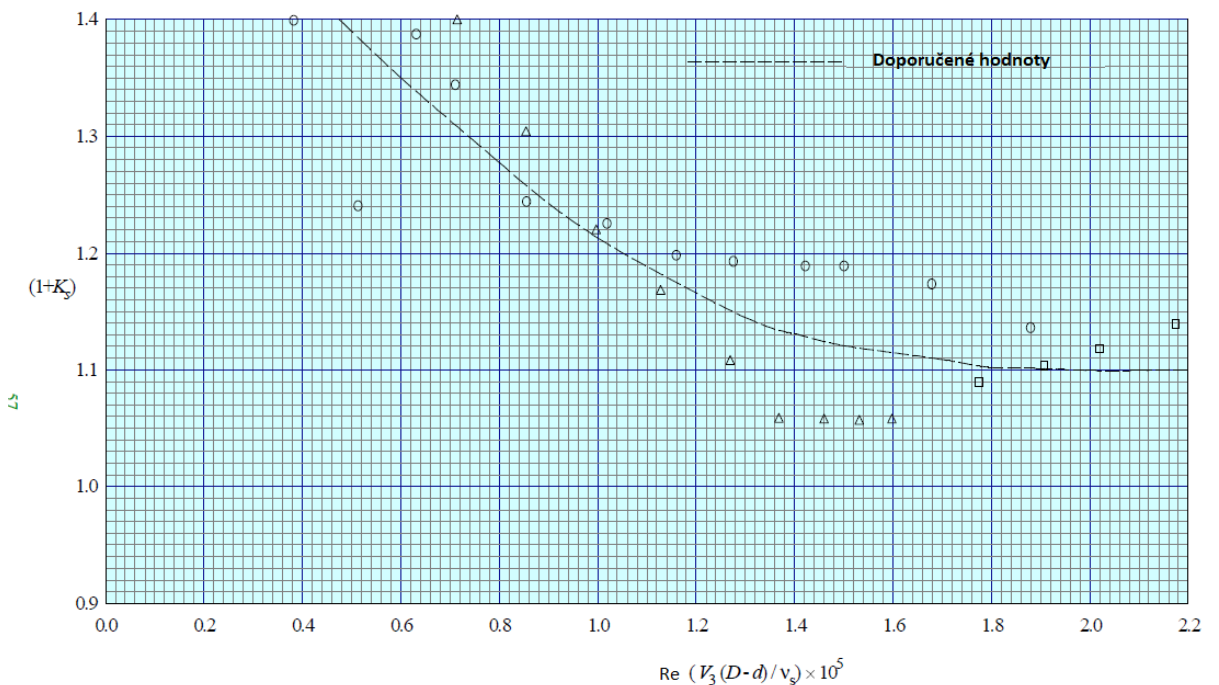
Ztrátový součinitel primární trysky  $K_p$  určíme z grafu na obrázku č. 10. Dle informací ve zdroji [1] se ve většině ejektorů pohybuje hodnota Reynoldsova čísla v oblasti od  $10^4$  až  $10^6$ . Pro první návrh použijeme hodnotu Reynoldsova čísla  $Re = 10^5$ . Hodnoty, které můžeme vidět vynesené v grafu na obrázku č. 10, jsou určeny pro různé geometrie trysky s kruhovou dírou. Tyto hodnoty lze aplikovat i pro jiné trysky, hodnota ztrátového součinitele by se neměla lišit o více než 15%.



Obrázek 10 - Závislost ztrátového součinitele primární trysky na Reynoldsově čísle [1]

Odečtením ztrátového součinitele pro  $Re = 10^5$  získáme hodnotu  $K_p = 0,05$ .

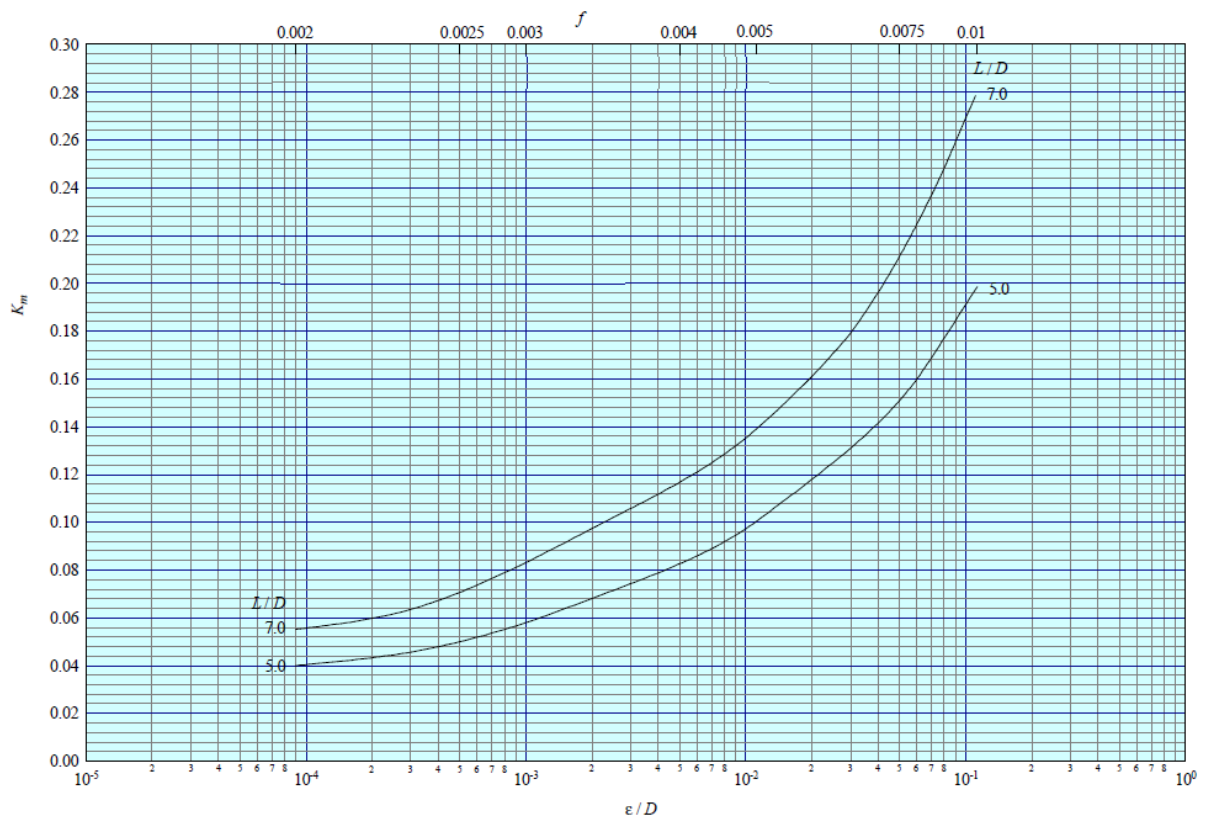
Ztrátový součinitel na vstupu sekundární látky  $K_s$  můžeme určit z grafu na obrázku č. 11:



Obrázek 11 - Závislost ztrátového součinitele na vstupu sekundární látky na Reynoldsově čísle [1]

Vzhledem k tomu, že zatím neznáme průměr vstupu přísávané látky, tedy ani její rychlost nebo Reynoldsovo číslo, tak zvolíme hodnotu doporučenou pro první aproximaci  $K_s = 0,1$ .

Pro určení ztrátového součinitele směšovací komory  $K_m$  je třeba znát hodnotu relativní drsnosti  $\varepsilon/D$ . Poté můžeme ztrátový součinitel určit z obrázku č. 12.



Obrázek 12 - Závislost ztrátového součinitele směšovací komory na relativní drsnosti [1]

Abychom získali relativní drsnost směšovací komory, musíme hodnotu drsnosti oceli  $\varepsilon_r = 0,045$  mm (předpokládaný výrobní materiál) podělit průměrem směšovací komory. Ten odhadneme jako  $D = 30$  mm. Dostáváme tedy  $\varepsilon/D = 0,0015$  a odečteme ztrátový součinitel směšovací komory  $K_m = 0,09$ .

Ztrátový součinitel difuzoru  $K_d$  lze vypočítat podle vztahů (5.10), (5.11) nebo (5.12). Vzhledem k tomu, že zatím neznáme tlaky nebo průřezy a sklon difuzoru, stanovíme hodnotu  $K_d = 0,12$ , která odpovídá standardnímu difuzoru se sklonem  $2\Phi = 8^\circ$ .

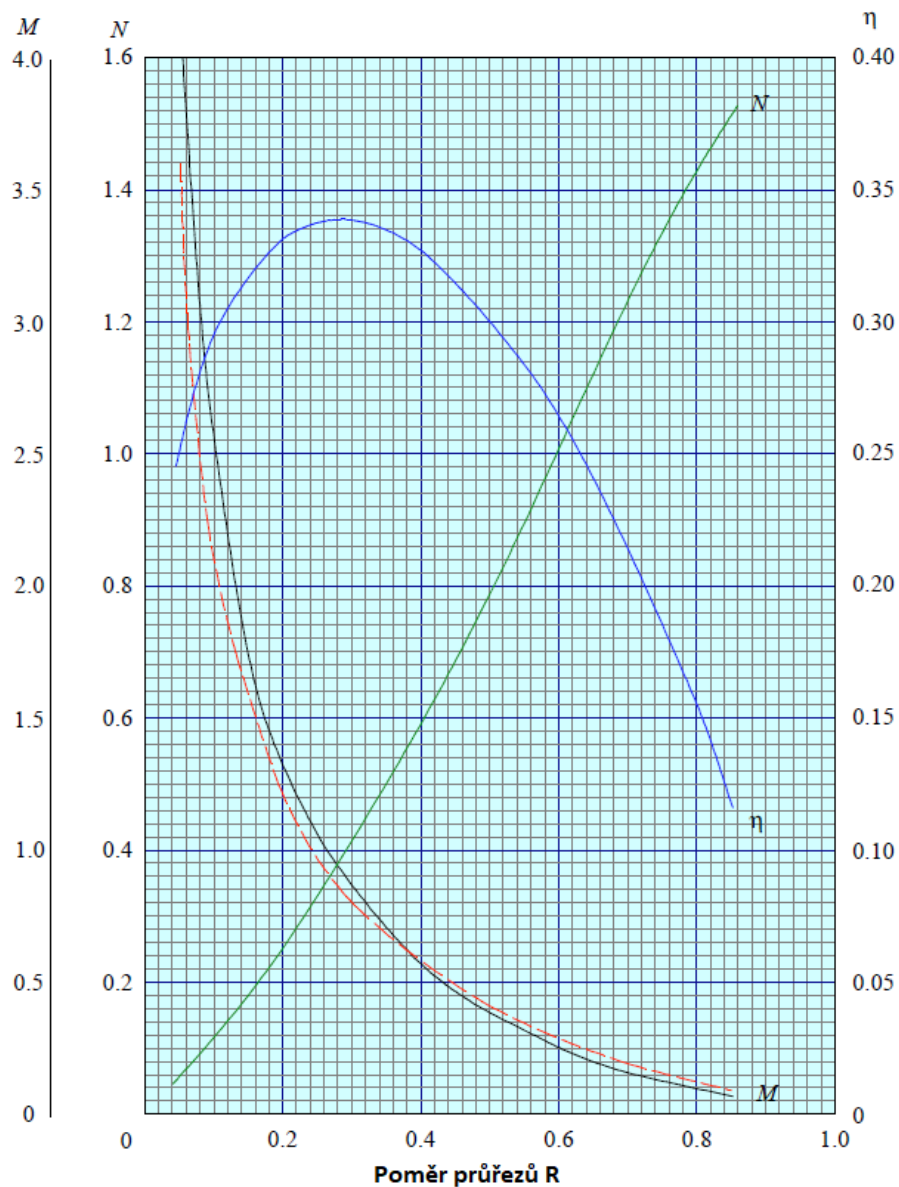
Pro návrh ejektoru jsou nejdůležitější hodnoty  $K_d$  a  $K_m$ , které nejvíce ovlivňují charakteristickou křivku.  $K_p$  a  $K_s$  mají pouze malý, ale nezanedbatelný vliv. První odhad ztrátových součinitelů ejektoru můžeme vidět v tabulce č. 3:

Tabulka 3 - První hodnoty ztrátových součinitelů

$K_p$	$K_s$	$K_m$	$K_d$
0,05	0,1	0,09	0,12

### Stanovení tlakového, průtokového poměru a poměru průřezů

Nyní je nutné stanovit správnou hodnotu poměru průřezů  $R$ , poměru tlaků  $N$  a průtoků  $M$  tak, aby docházelo k optimálnímu fungování ejektoru. Vzhledem k tomu, že neznáme ani poměr tlaků, ani poměr průtoků, stanovíme hodnotu doporučenou ve zdroji [1] pro široké spektrum geometrií  $R \approx 0,27$ , která odpovídá nejvyšší účinnosti ejektoru (viz obrázek č. 13).



Obrázek 13 - Závislost poměru průřezů na poměru tlaků a průtoků pro poměr hustot  $C=1$  [1]

Závislost z obrázku č. 13 můžeme použít, protože ejektor slouží k odsávání kondenzátu o hustotě  $\rho_s = 993 \text{ kg/m}^3$ . Jako hnací médium je použita voda o hustotě  $\rho_p = 998 \text{ kg/m}^3$ . Můžeme tedy říct, že poměr hustot  $C \approx 1$ . Z grafu odečteme hodnoty poměru tlaků  $N = 0,37$  a poměr průtoků  $M = 0,95$ . Tyto hodnoty mohou být opět později upraveny iterací.

### Stanovení charakteristické křivky

Vynesením charakteristické křivky ejektoru jsme schopni určit pracovní bod a dále upravit hodnoty poměrů průtoků a průřezů. Pro  $R$  menší než 0,4 a větší než 0,75 můžeme charakteristickou křivku aproximovat přímkou. Nejdříve stanovíme hodnoty  $M_0$  a  $N_0$ , kde příмка protne osy. Vycházíme ze vztahu (5.30).

Když  $M=0$ :

$$N_0 = \frac{2R - R^2(1 + K_m + K_d)}{(1 + K_p) - 2R + R^2(1 + K_m + K_d)} \quad (6.1)$$

Když  $N=0$ , kvadratickou rovnicí pro  $M_0$  lze vyjádřit:

$$M_0 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.2)$$

kde

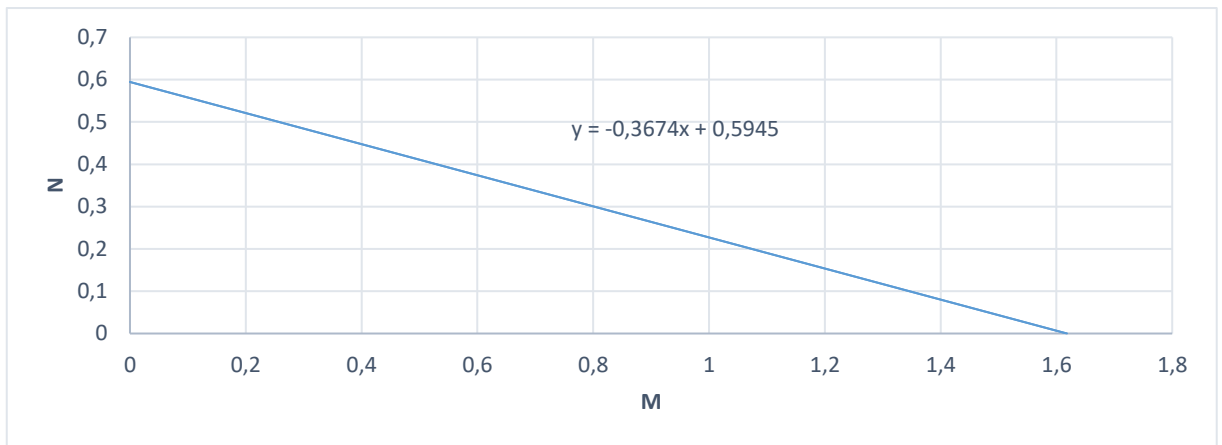
$$a = \frac{2CR^2}{1 - R} - CR^2(1 + K_m + K_d) - C \left( \frac{R}{1 - R} \right)^2 (1 + K_s) \quad (6.3)$$

$$b = -R^2(1 + C)(1 + K_m + K_d) \quad (6.4)$$

$$c = 2R - R^2(1 + K_m + K_d) \quad (6.5)$$

Po dosazení dostáváme hodnoty  $N_0 = 0,755$  a  $M_0 = 1,829$ . Charakteristickou křivku vidíme na obrázku č. 14.





Obrázek 14 - Charakteristická křivka ejektoru

Z rovnice přímky dopočítáme novou hodnotu tlakového poměru pro  $M = 0,95$ , tedy  $N = 0,363$ .

### Výpočet účinnosti

Ze vztahu (5.3) můžeme nyní dopočítat účinnost ejektoru. Jelikož jsme  $R$  stanovili pro maximální účinnost z grafu na obrázku č. 13, měla by se účinnost pro první odhad blížit  $\eta_{\max} \approx 0,4$ . Dosazením do vztahu (5.3) získáme hodnotu  $\eta = 0,348$ .

### Dopočítání zbývajících parametrů

Nyní je třeba dopočítat zbývající parametry z tabulky č. 2.

Průtok sekundární (nasávané) látky je daný  $Q_s = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Ze vztahu pro poměr průtoků (5.2) můžeme dopočítat průtok primární (hnací) látky:

$$Q_p = \frac{Q_s}{M} = 7,37 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6.6)$$

Tlak na vstupu sekundární látky  $P_2 = 7,1 \text{ kPa}$ , zvolíme tlak na výstupu z difuzoru  $P_5 = 120 \text{ kPa}$ , tak aby byl větší než atmosférický a pokryl ztráty mezi difuzorem a hladinou v zásobníku nádrže. Na základě těchto dvou tlaků můžeme dopočítat tlak na vstupu hnací látky úpravou vztahu (5.1):

$$P_5 = \frac{P_5(N + 1) - P_2}{N} = 431 [\text{kPa}] \quad (6.7)$$

Tento tlak nepřesahuje maximální dovolený tlak v oběhu zařízení.

Dále je třeba stanovit průřez trysky ze vztahu (5.35):

$$A_n = Q_p \left[ \frac{(1 + K_p) - C(1 + K_s) \left( \frac{MR}{1 - R} \right)^2}{\frac{(P_1 - P_2)}{\frac{1}{2} \rho_p}} \right]^{1/2} = 75,5 [mm^2] \quad (6.8)$$

Z průřezu trysky lze už snadno stanovit rozměry ústí trysky. Bude použita tryska s čtvercovým průřezem z důvodu rozšíření proudu, díky němuž dosáhneme lepší účinnosti směšování.

$$a_t = \sqrt{A_n} \doteq 8,69 [mm] \quad (6.9)$$

Protože známe hodnotu poměru průřezů  $R = 0,27$ , můžeme snadno dopočítat průřez směšovací komory  $A_m$  ze vztahu (5.4) :

$$A_m = \frac{A_n}{R} = 279,6 [mm^2] \quad (6.10)$$

Z průřezu lze snadno dopočítat průměr směšovací komory:

$$D = \sqrt{\frac{4A_m}{\pi}} = 18,9 [mm] \quad (6.11)$$

A nyní pro centrální polohu trysky i délku směšovací komory:

$$L = 7D = 132 [mm] \quad (6.12)$$

### Kontrola vzniku kavitací

Přesto, že návrh ještě není hotový, je třeba provést kontrolu vzniku kavitací. Tu provedeme výpočtem minimálního tlaku na vstupu sekundární látky podle rovnice (5.43):

$$P_{2req} = \frac{1}{2} \rho_p C \sigma \left( \frac{Q_p}{A_n} \frac{MR}{1 - R} \right)^2 + p_v = 3180 [Pa] \quad (6.13)$$

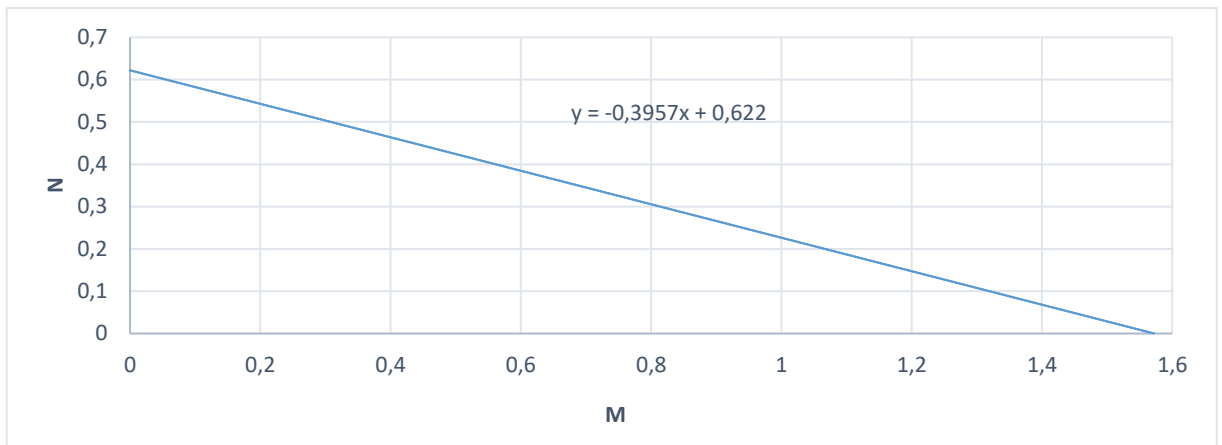
## Konečný design

Po dopočítání všech zbývajících parametrů z tabulky č. 2 je třeba se vrátit zpět ke ztrátovým součinitelům a znovu je určit pro nově spočítané hodnoty. Nyní už můžeme z průtoků vypočítat rychlosti proudění a z nich Reynoldsova čísla. Po odečtení nových ztrátových součinitelů opakujeme celý postup z kapitoly č. 6, dokud nedosáhneme uspokojivých výsledků (hodnoty ztrátových součinitelů a poměrů N, M, R se příliš nemění, hodnota účinnosti je v rozumných mezích).

Výsledné vypočtené hodnoty pro návrh našeho ejektoru můžeme vidět v tabulce č. 4 a jeho výslednou pracovní křivku a na obrázku č. 15.

*Tabulka 4 - Výsledné návrhové parametry ejektoru*

Parametr	Jednotky	První odhad	Výsledná hodnota
Tlak na vstupu primární látky	$P_1$ [Pa]	431019	575785
Tlak na vstupu sekundární látky	$P_2$ [Pa]	7100	7100
Tlak na výstupu z difuzoru	$P_5$ [Pa]	120000	120000
Tlakový poměr	N [-]	0,37	0,27
Primární průtok	$Q_p$ [m <sup>3</sup> /s]	0,0000737	0,0000737
Sekundární průtok	$Q_s$ [m <sup>3</sup> /s]	0,00007	0,00007
Poměr průtoků	M [-]	0,95	0,95
Průměr směšovací komory	D [mm]	18,9	19,5
Délka směšovací komory	L [mm]	132	136,5
Průměr trysky	d [mm]	9,8	10,1
Sklon difuzoru	$2\phi$ [°]	8	8
Hustota primární látky	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	998	998
Hustota sekundární látky	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	993	993
Poměr hustot	C [-]	0,995	0,995
Kavitační index	$\sigma$ [-]	1,35	1,35
Ztrátový součinitel na vstupu pr. látky	$K_p$ [-]	0,05	0,18
Ztrátový součinitel na vstupu sek. látky	$K_s$ [-]	0,1	0,35
Ztrátový součinitel směšovací komory	$K_m$ [-]	0,09	0,1
Ztrátový součinitel difuzoru	$K_d$ [-]	0,12	0,1



Obrázek 15 - Charakteristická křivka navrženého ejektoru

Z charakteristické křivky můžeme zjistit, jak se bude ejektor chovat pro různé poměry průtoků nebo tlaků. Účinnost námi navrženého ejektoru je podle vztahu (5.3)  $\eta = 0,25$ . Nedosahujeme sice optimálních hodnot, ale kritickým faktorem je pro nás schopnost odsávat kondenzát. Z energetického hlediska bude mít na spotřebu energie větší vliv účinnost hnacího čerpadla.

Navržený ejektor je optimalizovaný pro provozní vztah odparky, ale s ohledem na rychlost najíždění bude zřejmě třeba zvýšit průtok hnací kapaliny, protože hustota odsávaného plynu je několikanásobně menší než hustota kondenzátu. Na ustavení odparky do provozní stavu a z něj plynoucí vyšší průtoky musí být brán zřetel při návrhu čerpadla pro hnací okruh.

## **7. Konstrukční návrh zařízení**

Nyní je třeba na základě parametrů vypočítaných v kapitole č. 7 navrhnout geometrii ejektoru, vytvořit 3D model a výkresovou dokumentaci. Je potřeba zajistit snadné zapojení ejektoru do školní hydraulické měřicí trati, na které bude provedena experimentální část. Aby bylo možné sledovat chování kapaliny ve směšovací komoře, bude směšovací komora vyrobena z průhledného plexiskla. Zbytek zařízení bude vyroben z nerezové oceli 17 240.

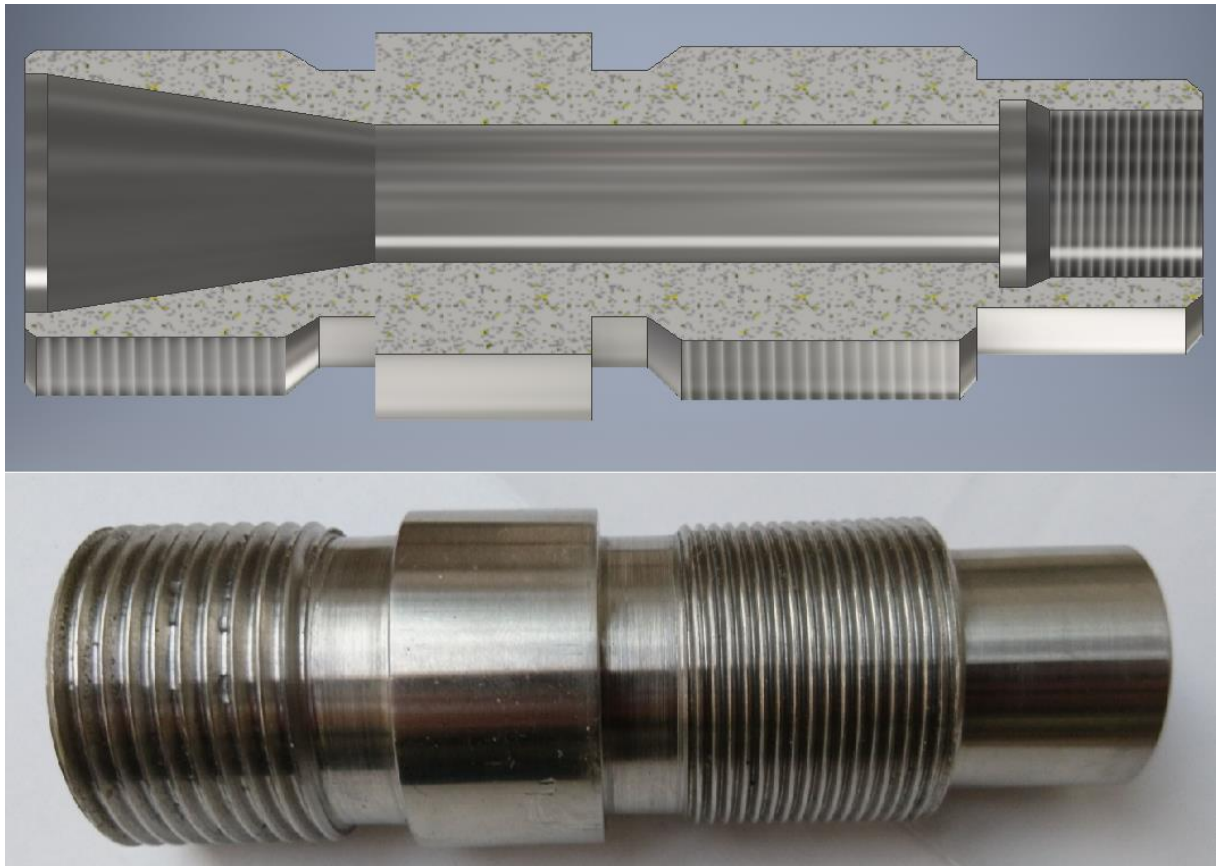
Pro tvorbu CAD modelu a výkresové dokumentace byl použit program Autodesk Inventor Profesional se studentskou licencí. Veškerá výkresová dokumentace je přiložena v příloze diplomové práce.

### **Přívod hnací látky**

Přívod hnací látky můžeme vidět na obrázku č. 16 a na výkrese DP 001 v příloze diplomové práce.

Tato součást zajišťuje přívod hnacího média do ejektoru, musí být zajištěno její připojení na měřicí trať, proto byl zvolen palcový závit G1. Aby bylo zařízení dostatečně těsné, připojení ke směšovací komoře zajišťuje jemný závit M32x1,5. Vnitřní průměr přívodu je zkosením snížen hned na vstupu látky na 15 mm (dochází k prvnímu urychlení kapaliny), tj. na stejný průměr jako je vnitřní průměr trysky. Tryska je připojena pomocí jemného závitu M20x1.

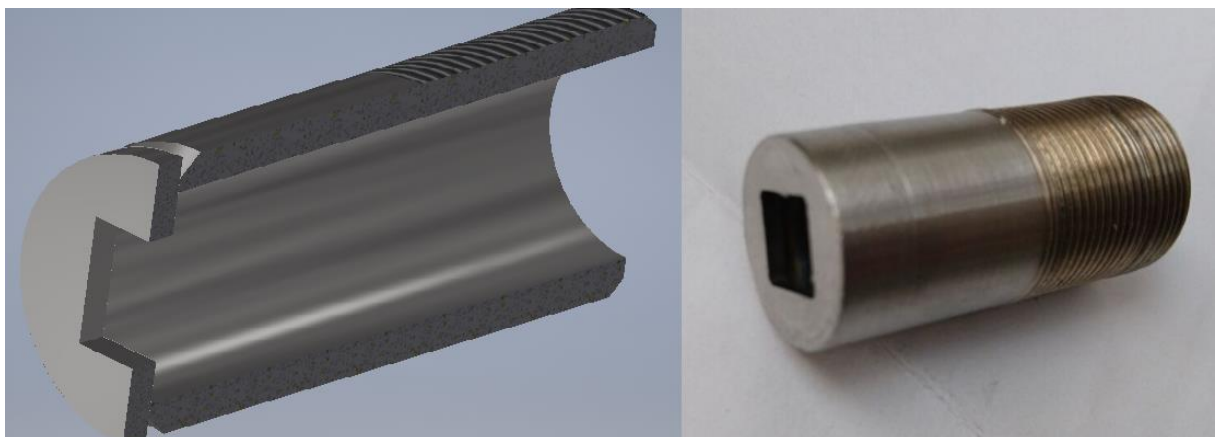
Poslední důležitou částí přívodu hnací látky je prostor pro distanční kroužky, kterými je řízena poloha trysky v ejektoru. Na vnější průměr 25g6 lze umístit distanční kroužky o délce až 18 mm a měnit tak axiální polohu trysky ve směšovací komoře.



Obrázek 16 - Přívod hnacího média - 3D model a vyrobená součást

### Tryska

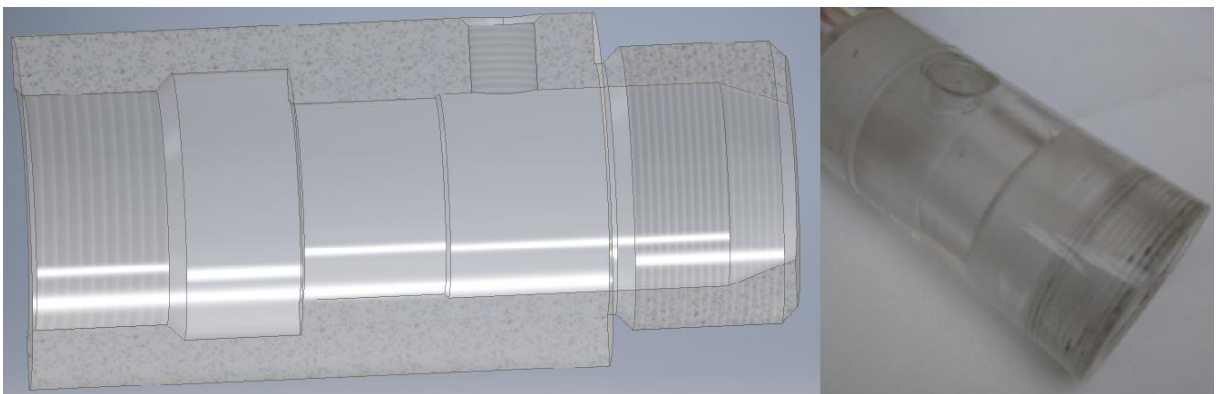
Pro rozstřík do směšovací komory byla na základě vypočteného průřezu trysky v kapitole č. 7 zvolena čtvercová díra o straně 9 mm a hloubce 2 mm. Otvor trysky bude k tělu trysky, které zajišťuje přívod hnacího média, připojen svářením. Připojení k přívodu hnacího média je provedeno jemným závitem M20x1 o délce 20mm. Trysku lze vidět na obrázku č. 17 a na výkresu DP 002 v příloze diplomové práce.



Obrázek 17 - Řez modelu a vyrobená tryska

### **Směšovací komora**

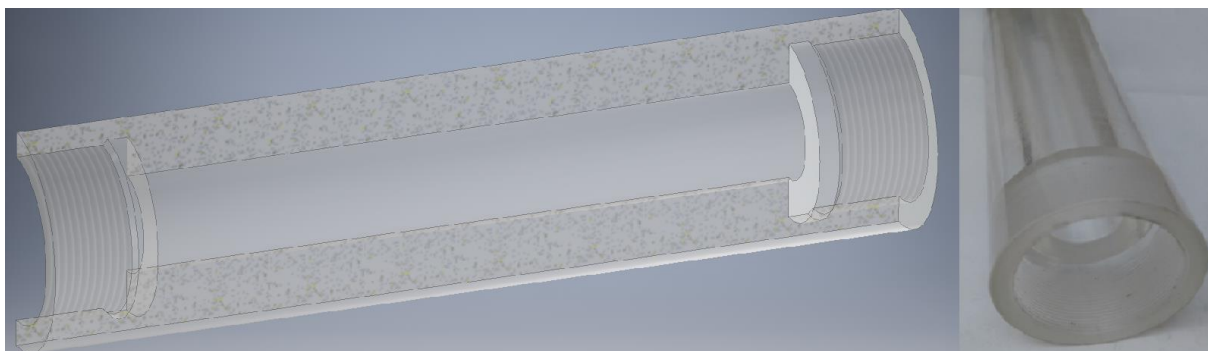
Směšovací komora je první součást vyrobená z plexiskla, aby bylo možné sledovat chování kapaliny v ejektoru. Pro připojení přívodu sekundární látky slouží díra se závitem M8x1, která je umístěna radiálně kolmo na osu komory. Závit M32x1,5 zajišťuje spojení s přívodem hnacího média a prostor za závitem slouží pro distanční kroužky. V prostoru o průměru 26 mm dochází k vytváření podtlaku a přisávání sekundární látky, průměr je navržen tak, aby při obtékání vnějšího průměru trysky měla přisávaná látka dostatek prostoru a nedocházelo ke zbytečným ztrátám. Poté následuje zkosení na průměr vypočtený v kapitole č. 7 a připojení směšovací trubice pomocí vnějšího závitu M36x1 (jemný závit pro zajištění těsnosti). Řez 3D modelem směšovací komory a fotku vyrobeného dílu můžeme vidět na obrázku č. 18. Výkres směšovací komory DP 003 si lze prohlédnout v příloze diplomové práce.



*Obrázek 18 - Směšovací komora*

### **Směšovací trubice**

Směšovací trubice je stejně jako směšovací komora vyrobena z plexiskla. Vnitřní průměr 20mm a délka 180mm jsou stanoveny dle parametrů vypočtených v kapitole č. 7. Pro napojení na směšovací komoru a pro připojení difuzoru slouží jemné vnitřní závity M36x1 pro zajištění těsnosti. Směšovací trubici můžeme vidět na obrázku č. 19 a na výkrese DP 005 v příloze diplomové práce.



Obrázek 19 - Směšovací trubice

### **Přívod sekundární látky**

Pro odsávání vzduchu při experimentu byl zvolen přívod hadičkou o průměru 6 mm. Hadička je k ejektoru připojena pomocí rychlospojky, která je se směšovací komorou spojena závitem M10x1. Pro zajištění těsnosti závitu je přidáno pryžové těsnění. Přívod si můžeme prohlédnout na obrázku č. 20.



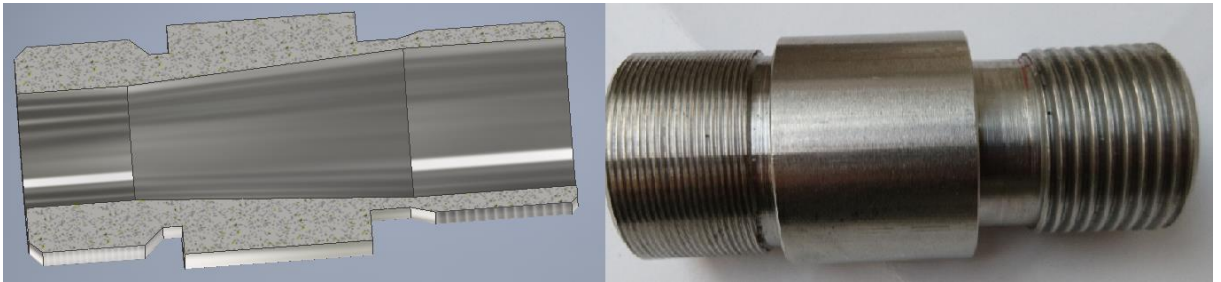
Obrázek 20 - Přívod sekundární látky

### **Difuzor**

Difuzor slouží k odvodu veškeré látky z ejektoru zpět do okruhu měřicí trati. Vzhledem k tomu, že rychlost na výstupu z ejektoru je přijatelná pro potrubí měřicí tratě, není třeba umísťovat zkosení pro vyrovnání rychlostí, aby však na sebe součásti dobře navazovaly, je zde krátké zkosení pod úhlem  $4^\circ$  z průměru 20mm na průměr 26mm. Pro připojení ke směšovací trubici slouží opět jemný závit M36x1 a pro připojení k měřicí trati palcový závit



G1. Součást je vyrobena z nerezové oceli 17 240, můžeme ji vidět na obrázku č. 21 a její výkres DP 006 v příloze diplomové práce.



Obrázek 21 - Difuzor

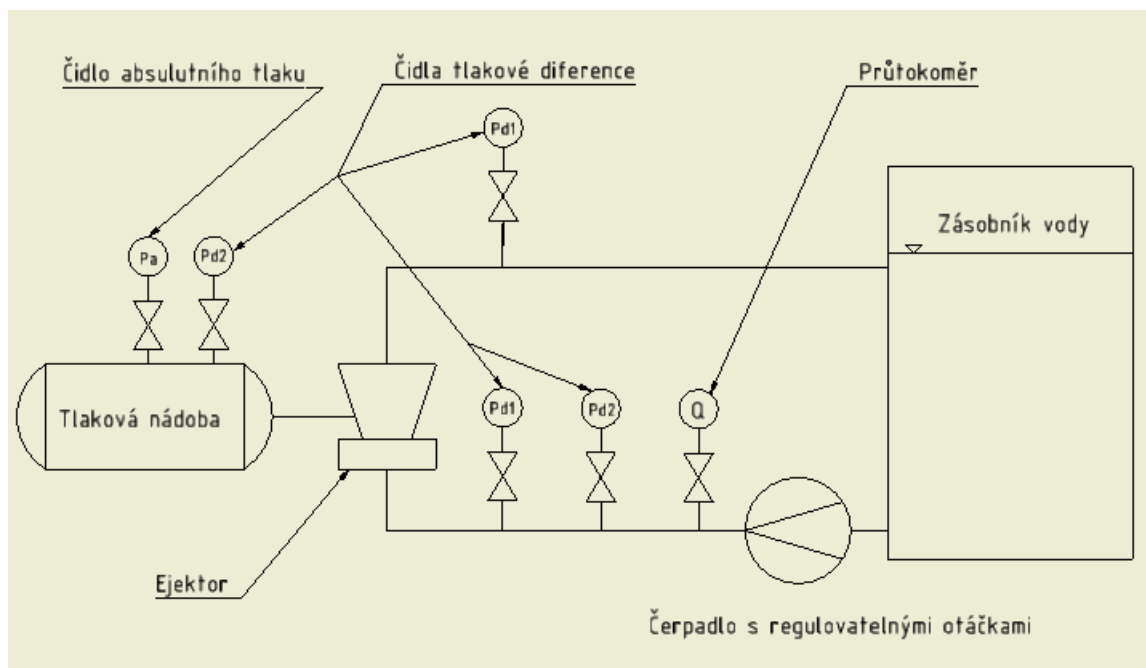
Celou sestavu ejektoru si můžeme prohlédnout na obrázku č. 22 a v příloze práce na výkrese DP SESTAVA.



Obrázek 22 - Sestava ejektoru

## 8. Experiment

Cílem experimentu bylo ověřit fungování navrženého ejektoru pro odsávání vzduchu z uzavřené nádoby a simulovat tak proces dosažení provozního podtlaku v odparce. Experiment se uskutečnil v laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky ČVUT v Praze na hydraulické měřicí trati. Schéma experimentu si můžeme prohlédnout na obrázku č. 23.



Obrázek 23 - Zjednodušené schéma experimentu

Při experimentu bylo provedeno celkem sedm měření. Čtyři měření při konstantním průtoku pro různé polohy trysky, kdy byla tryska posouvána v axiálním směru pomocí distančních kroužků o 5 mm, 10 mm a 15 mm. Poté byla provedena další tři měření pro vybranou polohu trysky při různých hodnotách průtoku hnací kapaliny.

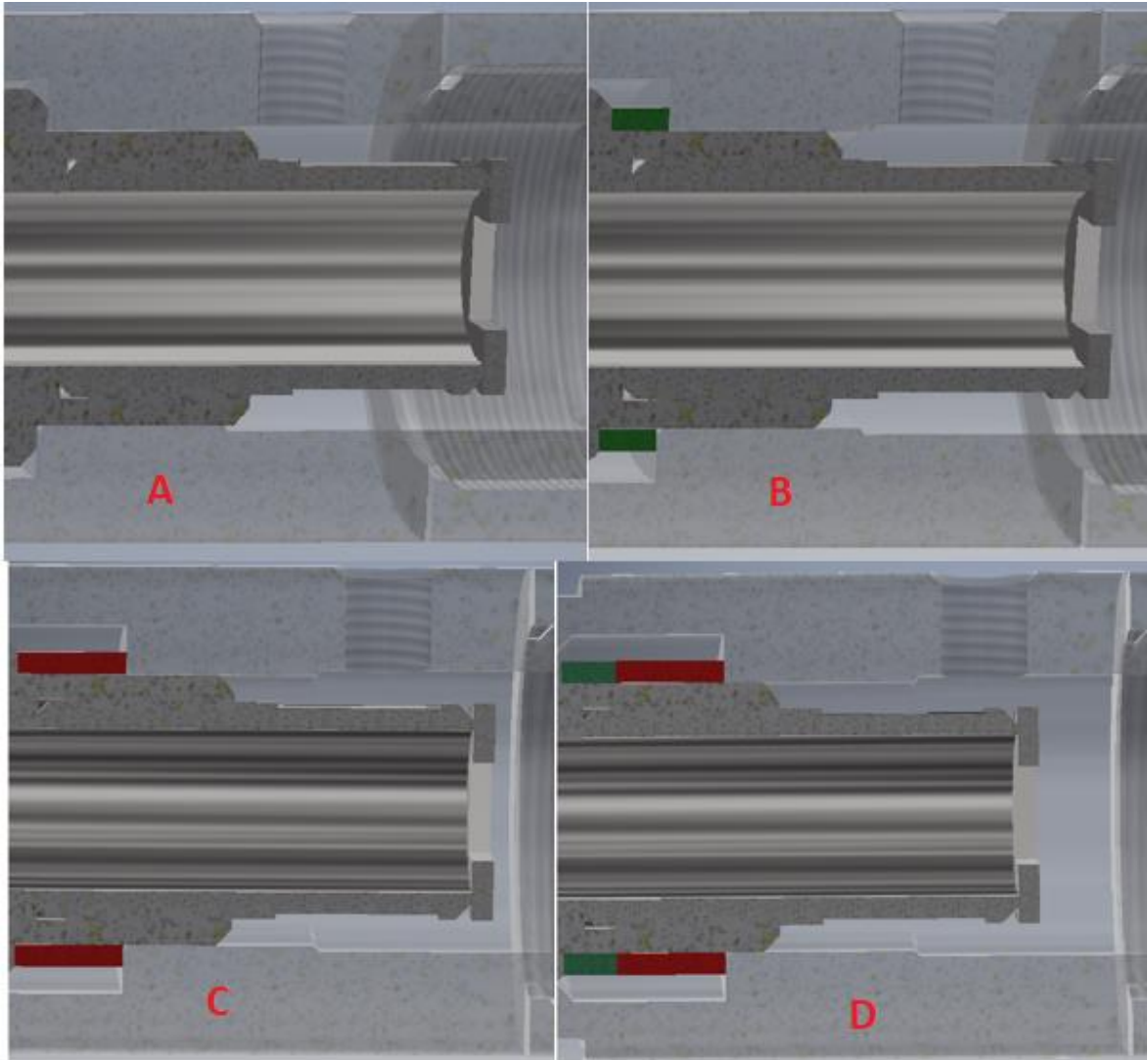
### Měření pro různé polohy trysky

Cílem těchto měření je popsat chování ejektoru pro 4 různé polohy trysky:

- A) Tryska v původní poloze bez distančního kroužku
- B) Tryska o 5 mm blíž otvoru pro přisávání plynu (využití 5mm distančního kroužku)
- C) Tryska o 10 mm blíž otvoru pro přisávání plynu (využití 10mm distančního kroužku)
- D) Tryska o 15 mm blíž otvoru pro přisávání plynu (využití 5mm + 10mm distančních kroužků)

Při měření byly každých 30 sekund odečítány tlaky ze dvou snímačů tlakových diferencí. První měřil tlakovou diferencí  $P_1 - P_2$ , tedy rozdíl tlaku na vstupu do ejektoru a tlaku v nádobě, druhý pak diferencí  $P_1 - P_5$ , rozdíl mezi tlakem na vstupu do ejektoru a tlakem za difuzorem. Dále byl odečítán absolutní tlak v nádobě  $P_2$  a průtok hnacího média  $Q$ . Tlaky byly odečítány v barech, průtok v  $m^3/hod.$

Trysku v různých polohách můžeme vidět na obrázku č. 24.



Obrázek 24 - pozice trysky

Průtok vody pro tento experiment byl stanoven na zhruba 70% výkonu čerpadla na  $3,48 m^3/hod.$  Měření byla prováděna, dokud nebylo dosaženo stavu rovnováhy mezi ejektorem a odsávanou nádobou (nemění se tlak v nádobě  $P_2$ ).

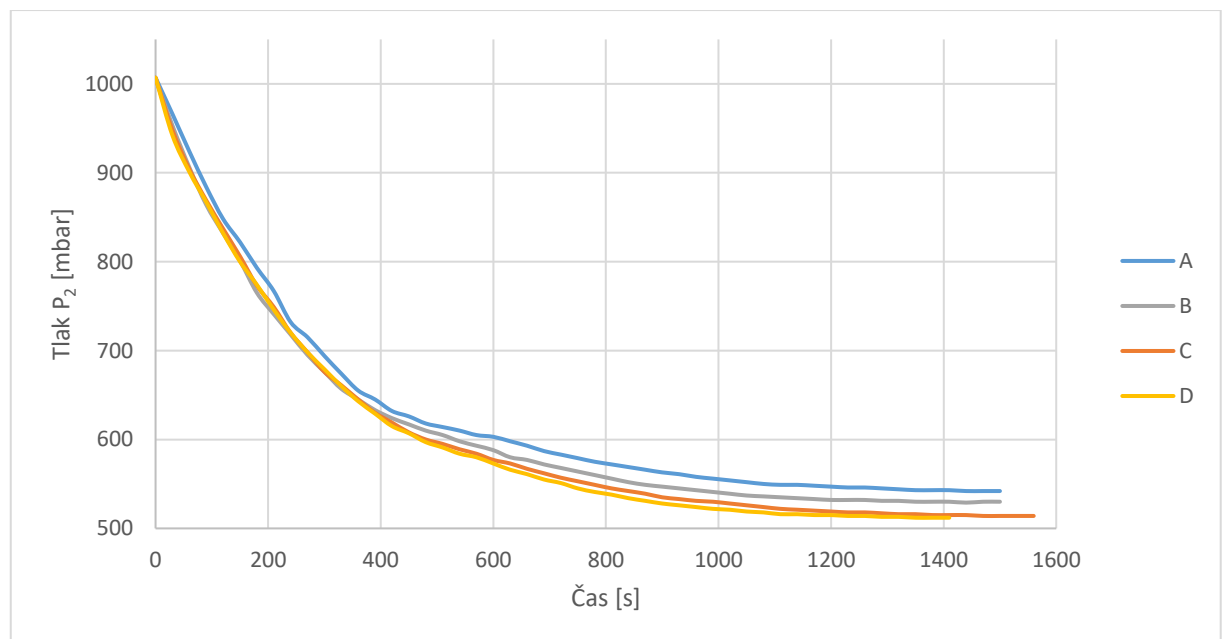
## Výsledky

V tabulce č. 5 můžeme vidět tlaky, kterých bylo dosaženo v odsávané nádobě a časy, po kterých bylo dosaženo rovnováhy:

Tabulka 5 - Hodnoty dosažené při experimentu

Experiment	A	B	C	D
Tlak v nádobě [mbar]	542	530	514	512
Čas dosažení rovnováhy [s]	1500	1500	1560	1470
Průtok po dosažení rovnováhy [m <sup>3</sup> /hod]	4,01	4,07	4,11	4,11

Průběh absolutního tlaku v odsávané nádobě je vidět v grafu na obrázku č. 25.



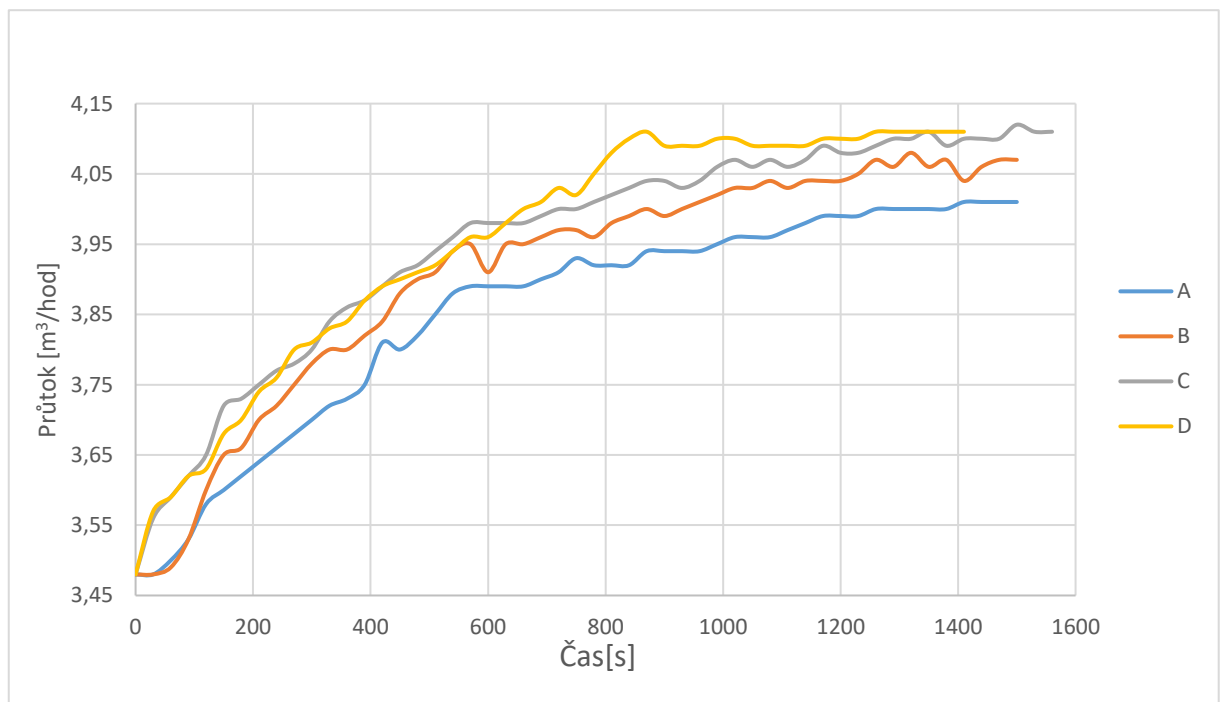
Obrázek 25 - Závislost tlaku v nádobě na čase

Z grafu a z tabulky č. 5 můžeme vidět, že nejlepší výsledků je dosahováno pro polohu trysky D, kdy je tryska nejbližší přívodu nasávaného vzduchu. V odsávané nádobě jsme dosáhli nejnižších hodnot tlaku za nejkratší čas. Můžeme říct, že čím je kratší vzdálenost mezi výstupem z trysky a vstupem sekundární látky, tím nižšího tlaku jsme v nádobě schopni dosáhnout. Důvodem je snižování vzdálenosti, kterou musí vzduch překonat, než dojde ke

smíchání s hnací látkou a tedy ke snížení ztráty. Je třeba však dát pozor, aby nebyla tryska až za otvorem a nedocházelo k porušování hlavního proudu.

Vliv polohy na dobu potřebnou pro ustálení není výrazný, kromě varianty D bylo rovnováhy dosaženo za přibližně stejně dlouhou dobu.

Z grafu na obrázku č. 26 můžeme vyčíst, že ačkoli se výkon čerpadla nemění, průtok hnací látky s časem roste. K nejrychlejšímu růstu objemového průtoku dochází u polohy trysky D, u které bylo i nejrychleji dosaženo podtlaku v nádobě. U polohy trysky A, kde bylo odsávání vzduchu nejpomalejší, je tomu naopak. Průtok vody roste v závislosti se snižováním množství vzduchu přisátého do směšovací komory ejektoru. Čím nižší je v nádobě tlak, tím menší množství vzduchu je nasáváno do ejektoru, snižuje se množství vírů vzniklých při směšování vzduchu a kapaliny a dochází k menším ztrátám ve směšovací trubici.

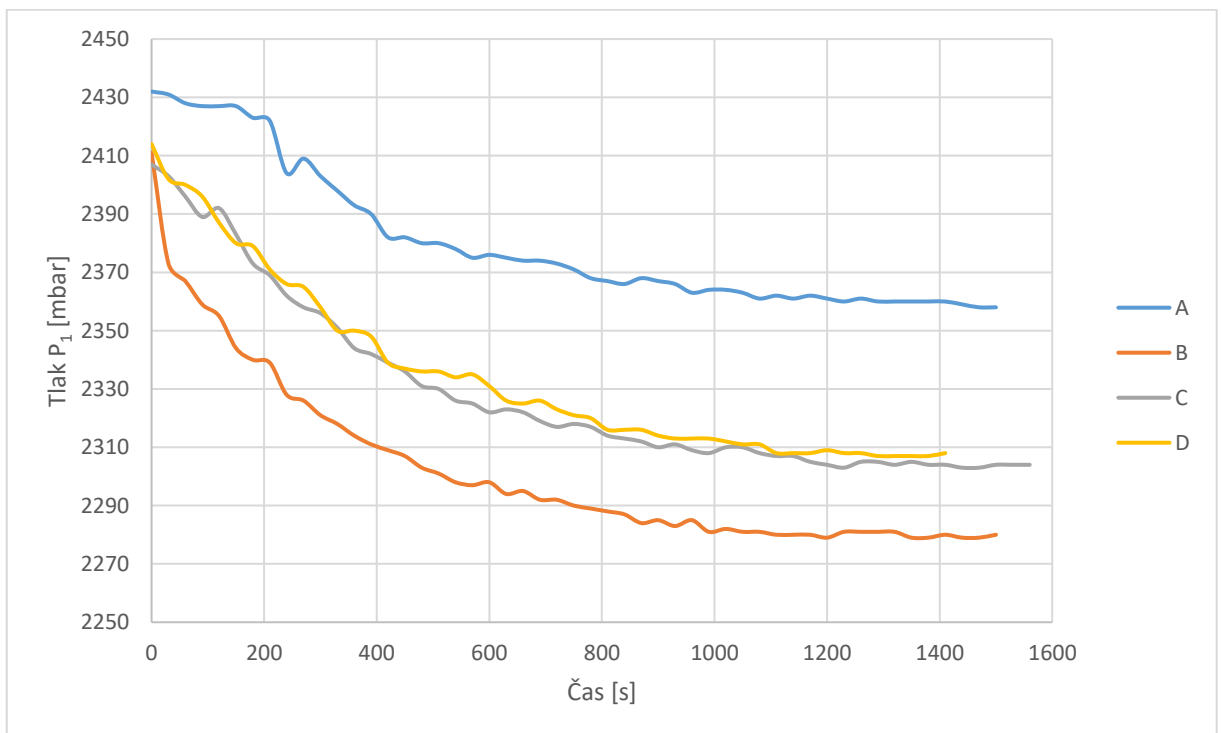


Obrázek 26 - Průběh průtoku v závislosti na čase

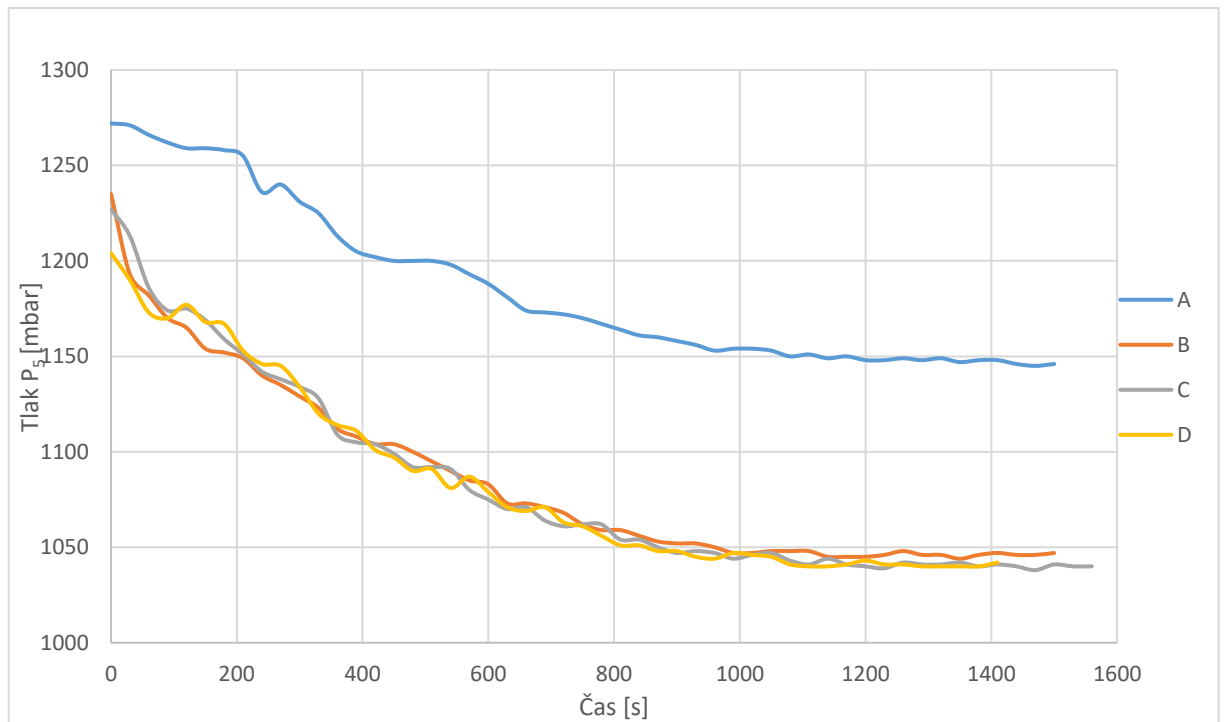
Jak můžeme vidět v tabulce č. 5, nejvyšších konečných průtoků bylo dosaženo při poloze trysky C a D, kdy bylo dosaženo i nejnižších tlaků v nádobě.

Vzhledem k tomu, že známe absolutní tlak v nádobě, můžeme si z hodnot odečtených z čidel pro měření tlakových diferencí dopočítat tlak  $P_1$  před vstupem do ejektoru a tlak  $P_5$  na výstupu z difuzoru. Jejich závislost na čase si lze prohlédnout na obrázcích č. 27 a č. 28.

S rostoucím časem, tedy se zvyšujícím se průtokem klesají tlaky před i za zařízením. Poloha trysky sama o sobě nemá na tyto tlaky vliv, ovlivňuje však množství průtoku hnací kapaliny zařízením, na kterém jsou tlaky  $P_1$  a  $P_5$  závislé. Můžeme si všimnout, že hodnoty tlaku  $P_1$  pro polohu trysky B a tlaku  $P_5$  pro polohu trysky A neodpovídají zcela trendu, který můžeme vyčíst pro ostatní varianty měření. Je možné, že z čidel byly odečteny nepřesné hodnoty tlakových diferencí. To mohlo být způsobeno nedostatečným utěsněním čidel nebo vniknutím bubliny vzduchu do odběrové trubice.



Obrázek 27 - Závislost tlaku na vstupu do ejektoru na čase



Obrázek 28 -Závislost tlaku na výstupu z difuzoru na čase

Díky průhledné směšovací trubici bylo možné velmi dobře pozorovat rozpad hnacího proudu ve směšovací komoře. Na začátku každého experimentu se proud vycházející z trysky rozpadal až u konce směšovací komory, zatímco krátce před dosažením stavu rovnováhy docházelo k rozpadu proudu ihned za tryskou. Z tohoto jevu můžeme usuzovat, že délka směšovací komory byla navržena správně.

Při dosažení stavu rovnováhy došlo k „vyčištění“ proudu, kdy už nebyl nasáván žádný vzduch z nádoby a směšovací komorou proudila pouze čirá voda.

Ze všech čtyř vyzkoušených poloh trysky se jako nejlepší jeví poloha D, kdy byly použity rozpěrné kroužky o délce 15 mm a výstup trysky je nejbližší vstupu nasávaného vzduchu. V této poloze bylo při průtoku  $3,48 \text{ m}^3/\text{hod}$  dosaženo v nádobě nejnižšího tlaku 512 mbar za nejkratší čas 23,5 minuty. Při konstantním výkonu čerpadla bylo také dosaženo nejvyššího průtoku při dosažení stavu rovnováhy  $4,11 \text{ m}^3/\text{hod}$ . Pro tuto polohu tedy budeme dosahovat nejvyšší účinnosti.

#### Měření pro různé hodnoty průtoku při umístění trysky v poloze D

Druhé měření bylo provedeno pro další tři různé hodnoty průtoku, když byla tryska v nejuhodnější poloze, tedy v poloze D. Při tomto měření bohužel nebylo možné měřit

tlakové diference, protože pro vysoký průtok jsme se dostali mimo rozsah čidel. Bylo tedy pouze sledováno chování ejektoru a odečítán tlak v odsávané nádobě v závislosti na čase.

Tlak byl odečítán pro průtoky:

- A) 1,86 m<sup>3</sup>/hod,
- B) 2,48 m<sup>3</sup>/hod
- C) 3,48 m<sup>3</sup>/hod
- D) 5,25 m<sup>3</sup>/hod

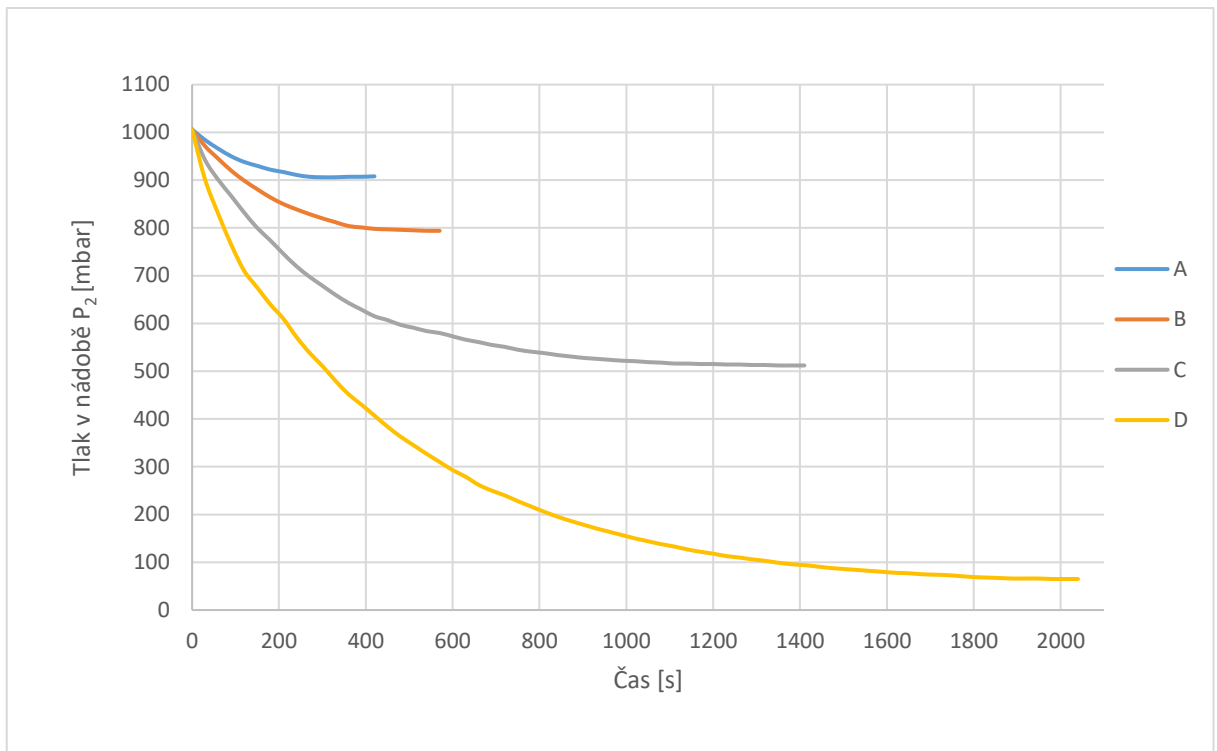
Tlaky, kterých bylo v nádobě dosaženo pro jednotlivé průtoky, můžeme vidět v tabulce č. 6:

*Tabulka 6 - Dosažené tlaky*

Varianta	A	B	C	D
Průtok [m <sup>3</sup> /hod]	1,86	2,48	3,48	5,25
Tlak [mbar]	908	794	512	65
Čas [s]	420	570	1430	2040

Pro průtoky A a B však nebylo dosaženo stavu rovnováhy, ale došlo zahlcení k směšovací komory a vniknutí vody do trubice pro odsávání vzduchu. Zahlcení je způsobeno příliš nízkým průtokem hnací kapaliny, kdy její energie není schopna překonat tlak na výstupu z ejektoru a dojde k úplnému zaplnění směšovací komory. Průběhy tlaků v závislosti na čase si můžeme prohlédnout v grafu na obrázku č. 29.





Obrázek 29 - Vývoj tlaku v nádobě pro různé průtoky

Pro průtok  $5,25 \text{ m}^3/\text{hod}$  jsme dosáhli tlak 65 milibarů, můžeme tedy s jistotou říct, že navržený ejektor je schopný dostat odparku do provozního stavu, který je 71 milibarů. Pro dosažení nízkých tlaků za kratší čas by bylo třeba ještě většího průtoku.

Čím je průtok hnacího média větší, tím nižšího tlaku jsme schopni v odsávaném zařízení dosáhnout. Pro ustavení rovnovážného stavu je ale potřeba více času, v našem případě to bylo 34 minut. Pokud by při vysokém průtoku docházelo k rozpadu proudu až v prostoru difuzoru nebo až v odvodovém potrubí, je zapotřebí zvážit použití většího ejektoru, neboť by docházelo ke zbytečným ztrátám.

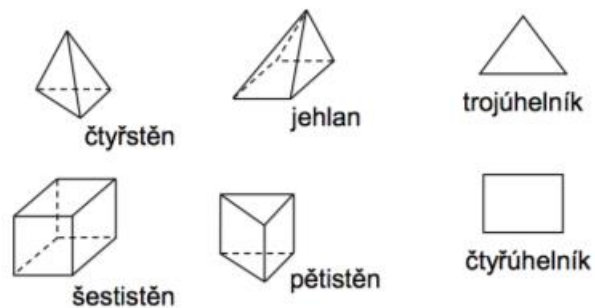
## 9. Numerická simulace

### Simulace turbulentního proudění

Při turbulentním proudění dochází ke vzniku turbulentních vírů, které se rozpadají na menší, dokud nedojde k přeměně energie na teplo. U turbulentního proudění jsou složky proměnných, jako jsou rychlost, tlak nebo teplota, představovány okamžitými hodnotami náhodných nestacionárních veličin. Pro uzavřenou soustavu veličin musí tedy být použit správný model turbulence.

V našem případě se proudění nachází pouze v turbulentní oblasti, důležitým krokem numerické simulace je proto správný výběr výpočtového modelu. Neexistuje žádný model, který by byl univerzálně použitelný pro všechny úlohy. Základní metody pro řešení turbulentních úloh jsou DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large Eddy Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) [6].

Základem většiny dnes využívaných simulací je metoda konečných objemů. Řešená oblast je rozdělena na velký počet malých kontrolních objemů (buněk), které mají definovaný tvar. U dvourozměrných úloh se nejčastěji jedná o trojúhelníky a čtyřúhelníky, u trojrozměrných úloh pak o různé mnohostěny. Příklady využívaných buněk můžeme vidět na obrázku č. 30.



Obrázek 30 - Buněk metody konečných objemů [7]

Z těchto buněk se vytvoří výpočetní síť pro numerický výpočet a v každém kontrolním objemu jsou řešeny diferenciální rovnice kontinuity, pohybové rovnice atd. U metody konečných objemů nepřechází přenos informace přes uzlové body, jako u metody konečných diferencí, ale přes stěny jednotlivých buněk.

## Metody modelování turbulence

### Metoda DNS – Přímá numerická simulace (Direct Numerical Simulation)

Tato metoda přímo provádí výpočet Navier-Stokesovy rovnice. Jedná se o velice přesný výpočet, který má ale obrovské nároky na výpočetní síť (velmi malé buňky), z čehož plynou velké nároky na výpočetní zařízení. Tato metoda se využívá spíše při vědeckých pracích než pro běžné inženýrské úlohy [5].

### Metoda LES – Simulace pohybu velkých vírů (Large Eddy Simulation)

Tato metoda v první řadě odfiltruje příliš malé víry, které později řeší pomocí tzv. subgrid modelů (je pro ně možné snadněji najít universální model řešení). Pro velké víry provádí přímou numerickou simulaci. Oproti metodě DNS není třeba použít tak jemné a náročné sítě, přesto je výpočet oproti metodě RANS výrazně delší [5].

### Metoda RANS – Středování Navier-Stokesových rovnic (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)

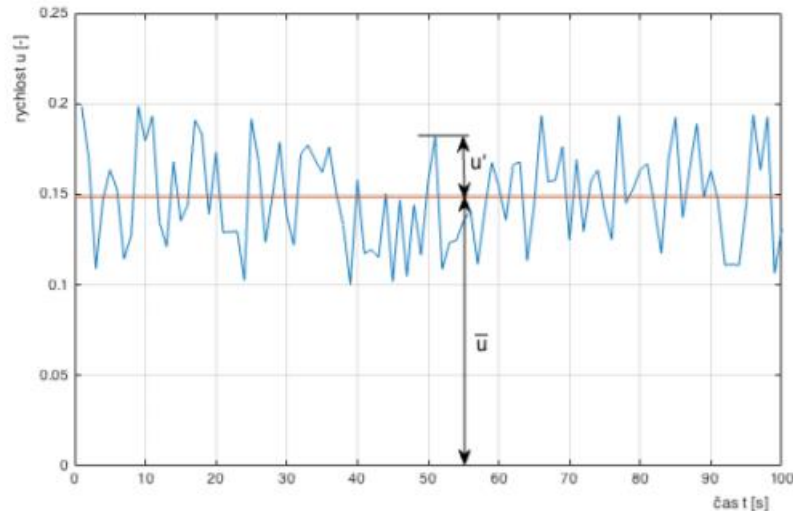
Metoda RANS řeší Navier-Stokesovy rovnice pro všechny velikosti vírů v turbulentním proudění. Aby byl výpočet jednodušší, nepoužívá okamžité hodnoty veličin (rychlost, tlak, teplota...), ale hodnoty časově středované s odpovídající flukтуаční složkou (viz. obrázek č. 31). Např. okamžitá rychlost je rozdělena na dvě složky, střední a flukтуаční:

$$u = \bar{u} + u' \quad (9.1)$$

Předpokládáme, že flukтуаční složky jsou ve všech směrech stejné a mění se pouze střední hodnoty. Při nedodržení může docházet k značným rozdílům mezi numerickou simulací a experimentem [4].

RANS je u inženýrských úloh nejvyužívanější, protože je díky časovému průměrování méně náročná na výpočetní kapacitu.

Soustava zprůměrovaných rovnic není uzavřená a musí být doplněna (uzavřena) o rovnice popisující vztahy mezi flukтуаčními složkami. Tyto rovnice nazýváme modely turbulence a existuje jich velké množství. Pro jejich řešení je třeba odhad turbulentní viskozity [4].



Obrázek 31 - Fluktuální a střední složky rychlosti při turbulentním proudění [7]

## Turbulentní modely

Jak už bylo řečeno výše, existuje mnoho druhů turbulentních modelů pro metodu RANS. Existují algebraické modely a jednorovnicové modely, mezi nejpoužívanější patří dvourovnicové a třírovnicové modely [7]. V naší práci bude numerická simulace provedena pomocí dvourovnicových turbulentních modelů k-ε a k-ω.

### Standardní model k - ε

Tento model počítá se dvěma transportními rovnicemi. Modelová transportní rovnice pro turbulentní energii je definována:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{U}_j k)}{\partial x_i} = p_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \bar{\rho}\varepsilon \quad (9.2)$$

Tato rovnice ale obsahuje velmi mnoho těžko aproximovatelných neznámých korelačních turbulentních veličin. Využíváme raději modelovou transportní rovnici, která slouží jako ekvivalent a je odvozena ve tvaru:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{U}_j \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} p_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 2} \bar{\rho}\varepsilon \quad (9.3)$$

$P_k$  značí produkci turbulentní energie a  $\mu_t$  turbulentní viskozitu, za kterou můžeme dosadit:

$$\mu_t = C_\mu \bar{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9.4)$$

Turbulentní energie  $k$  je dosazována do rovnice turbulentní viskozity ve tvaru:

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (9.5)$$

Rychlost disipace je odvozena následovně:

$$\varepsilon = \frac{u_\tau^3}{ky} \quad (9.6)$$

kde  $u_\tau$  značí třecí rychlost a  $y$  souřadnici.

Tento model obsahuje pět empirických konstant  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  a  $C_\mu$ , které jsou stanoveny experimentálně pro typové příklady proudění.

### Standardní model $k - \omega$

Modely  $k - \omega$  pracují také se dvěma diferenciálními rovnicemi – rovnicí kinetické turbulence  $k$  a rovnicí specifické disipace energie  $\omega$ . Tento model je vhodné využívat v blízkosti stěn, kde je velice přesný, dále od stěn jeho přesnost klesá. Diferenciální rovnice kinetické energie turbulence a specifické disipaci energie mají tvar:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (9.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9.8)$$

kde  $S_k$  a  $S_\omega$  jsou uživatelem definované zdrojové členy,  $\Gamma_k$  a  $\Gamma_\omega$  jsou efektivní difuzivity pro  $k$  a  $\omega$ ,  $Y_k$  a  $Y_\omega$  jsou disipace vlivem turbulence,  $G_k$  je generace kinetické energie turbulence  $k$  a  $G_\omega$  je generace specifické disipace energie  $\omega$ .

Model na rozdíl od  $k$ - $\epsilon$  nevyužívá přímo turbulentní viskozitu, ale tzv. efektivní difuzivitu, která je odvozena pro kinetickou energii turbulence a specifickou hodnotu disipace:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (9.9)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (9.10)$$

S turbulentní viskozitou, která má následující tvar, počítají až zmíněné efektivní difuzivity:

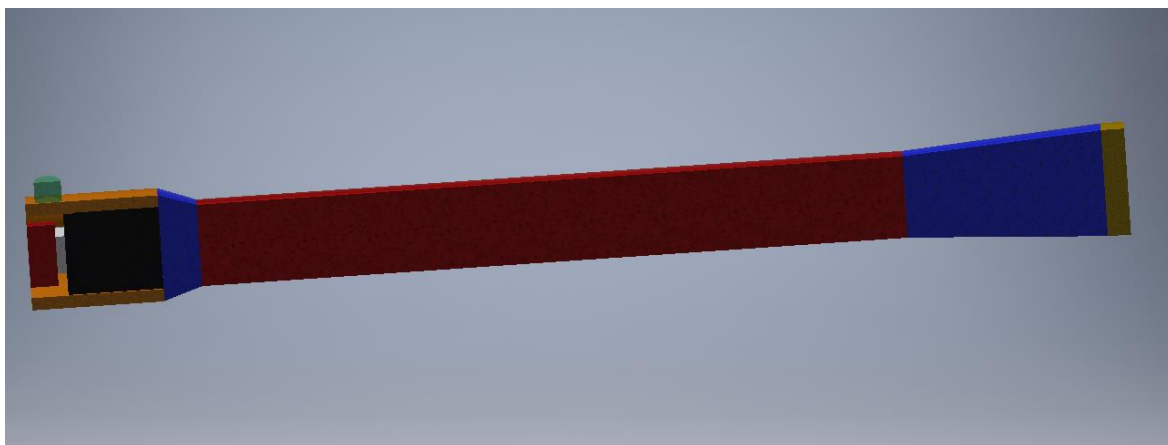
$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (9.11)$$

Koeficient  $\alpha^*$  tlumí turbulentní viskozitu z důvodů nízkých Reynoldsových čísel. Pokud je  $Re$  vysoké, koeficient se rovná jedné. Podobně jako u standardního  $k - \epsilon$  je zde několik konstant, které byly určeny pomocí jednoduchých typových případů jako obtékání na desce apod.

### **Geometrie a popis sítě**

Nejprve je třeba vytvořit model ejektoru pro tvorbu výpočtové sítě. V programu Autodesk Inventor 2017 byl vymodelován vnitřek zařízení bez stěn, tedy prostor, ve kterém bude probíhat numerická simulace. Stěny budou určeny pouze okrajovou podmínkou. Model byl vytvořen pro polohu trysky  $D$  uvedenou v kapitole č. 8 na obrázku č. 24, pro kterou jsme při experimentu dosahovali nejlepších výsledků.

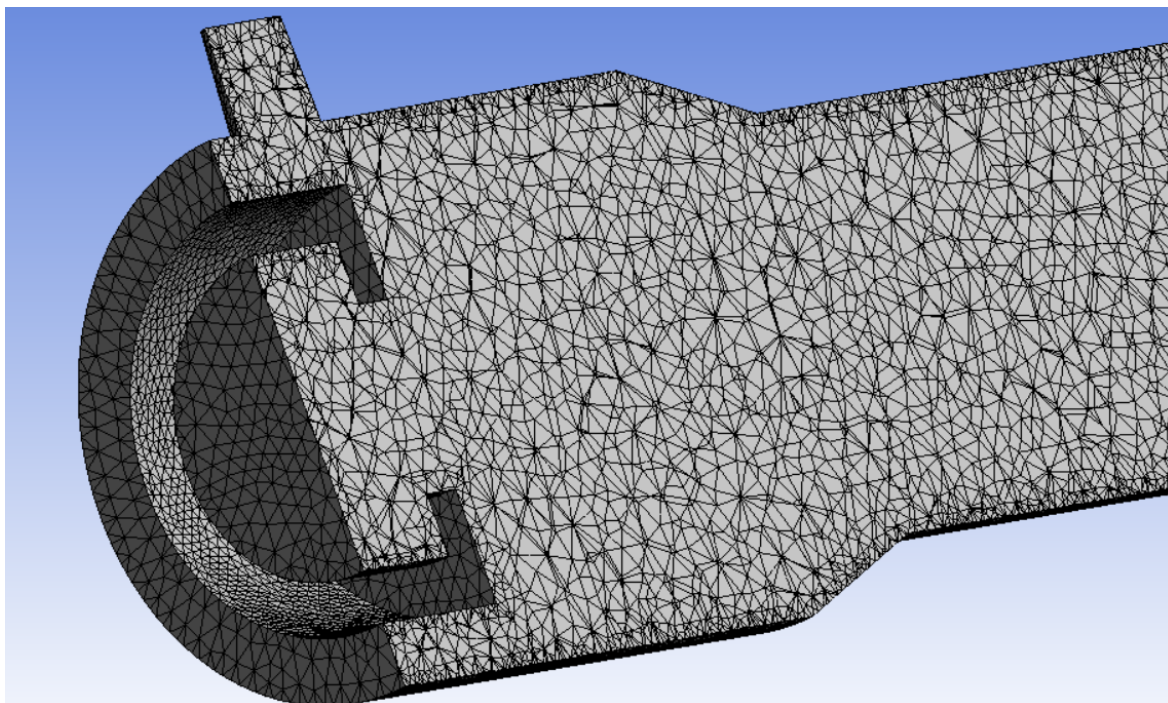
Z důvodu jednodušší tvorby sítě se model skládá z 9 dílčích částí, které si lze prohlédnout na obrázku č. 32. Jeho rozměry jsou shodné s rozměry vyrobeného experimentálního ejektoru.



Obrázek 32 - Model pro numerickou simulaci ejektoru

Tento model byl poté převeden ve formátu .STEP do DesignModeleru programu ANSYS Workbench 18.2, ve kterém byly definovány pomocí funkce Named Selection jednotlivé plochy pro vstup hnací, resp. přísávané látky a výstup z difuzoru.

Výpočtová síť (MESH) byla vytvořena v Meshing editoru programu ANSYS. Snahou bylo vytvořit co nejjemnější síť v celém ejektoru (s ohledem na využití studentské verze ANSYS bylo limitem 500 000 buněk). Síť nesmí obsahovat zdegenerované prvky, u kterých hodnoty křivosti (skewness) přesahují 0,9. Část navržené sítě lze vidět na obrázku č. 33:



Obrázek 33 - Ukázka výpočtové sítě

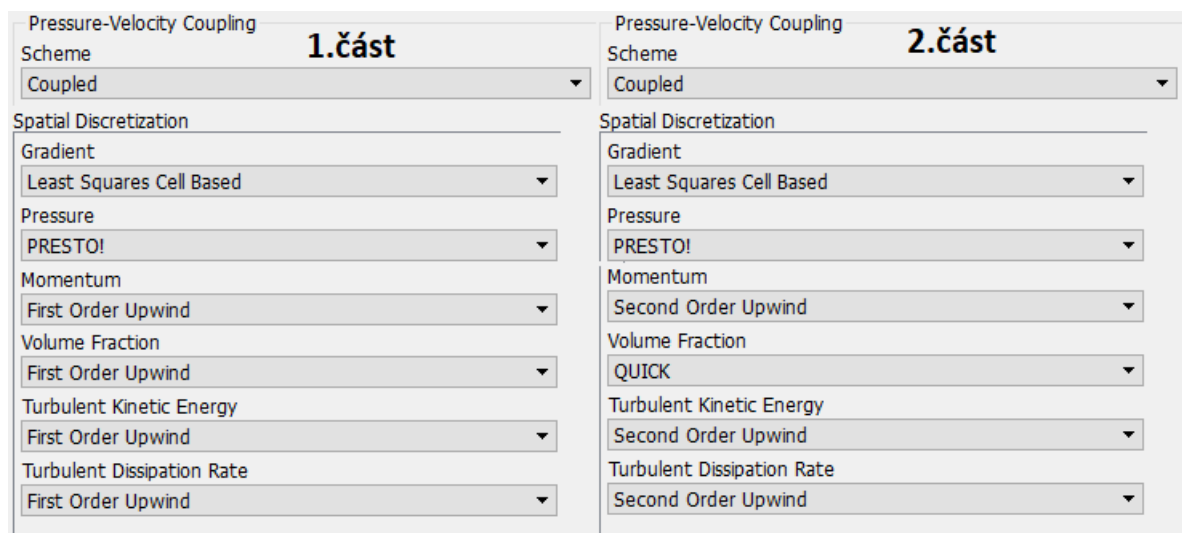
Po dlouhém experimentování bylo dosaženo nejlepších výsledků při použití prismatické sítě v jednotlivých částech ejektoru s maximální velikostí hrany 1 mm. Celkově síť obsahuje 498 935 prvků, při průměrné křivosti 0,37, maximální křivost dosahuje hodnot 0,74.

### Popis simulace

Simulace byla provedena v programu Fluent pro stacionární proudění. Pro všechny numerické simulace bylo použito stejné základní nastavení s vícefázovým modelem mixture, kde jako první fáze byl určen vzduch, který odsáváme z nádoby a jako druhá fáze hnací voda. Byly zkoušeny výpočtové modely  $k-\epsilon$  a  $k-\omega$ .

Na vstupu hnací látky byla nastavena okrajová podmínka Mass Inlet, pomocí které byl určen hmotnostní průtok hnací vody a na vstupu přisávaného vzduchu Pressure Inlet pro specifikaci tlaku v odsávané nádobě. 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. Pro všechny stěny byla nastavena okrajová podmínka Wall.

Každá simulace byla vždy provedena ve dvou fázích. V první fázi byl program nastaven pro výpočet s nižší přesností a ve druhé fázi s vyšší přesností vycházel z již vypočtených hodnot. Nastavení obou fází si lze prohlédnout na obrázku č. 34.

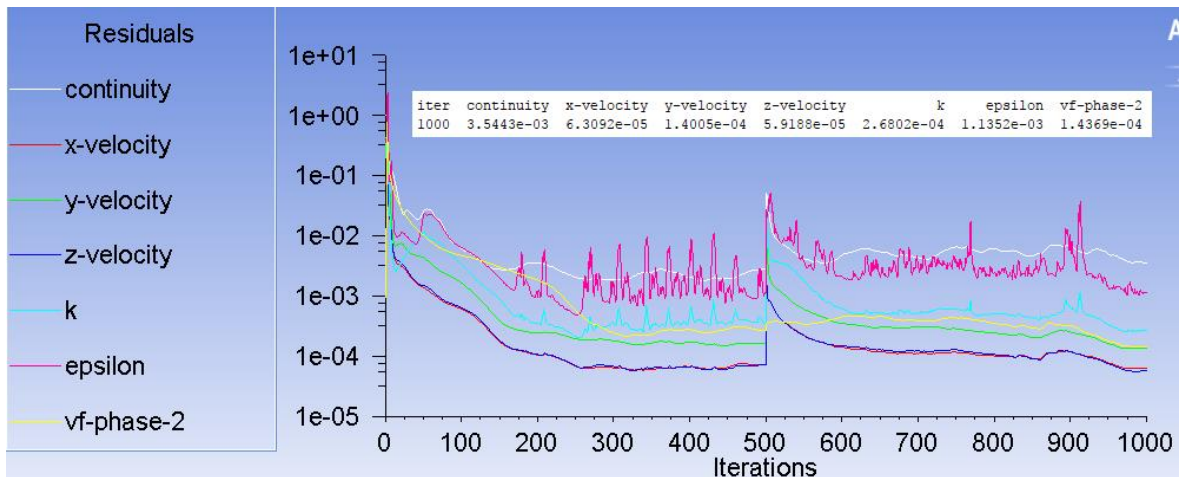


Obrázek 34 - Nastavení výpočtu v programu Fluent



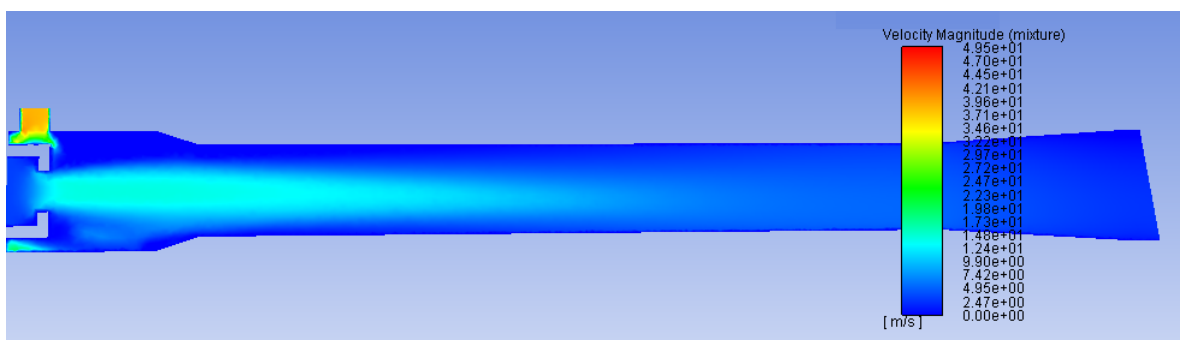
## Výsledky simulace

Simulace byla provedena na 500 iterací pro každý krok. Byly prováděny simulaci pro i mnohem více iterací, ale nedocházelo k výrazným změnám konvergence. Na obrázku č. 35 můžeme vidět průběh residuí kontinuity, rychlostí v jednotlivých směrech (y – osa ejektoru, x-osa přívodu plynu), k a  $\epsilon$  numerické simulace pro průtok  $3,48 \text{ m}^3/\text{h}$  a tlak v odsávané nádobě  $96 \text{ kPa}$  s využitím standardního k- $\epsilon$  modelu.



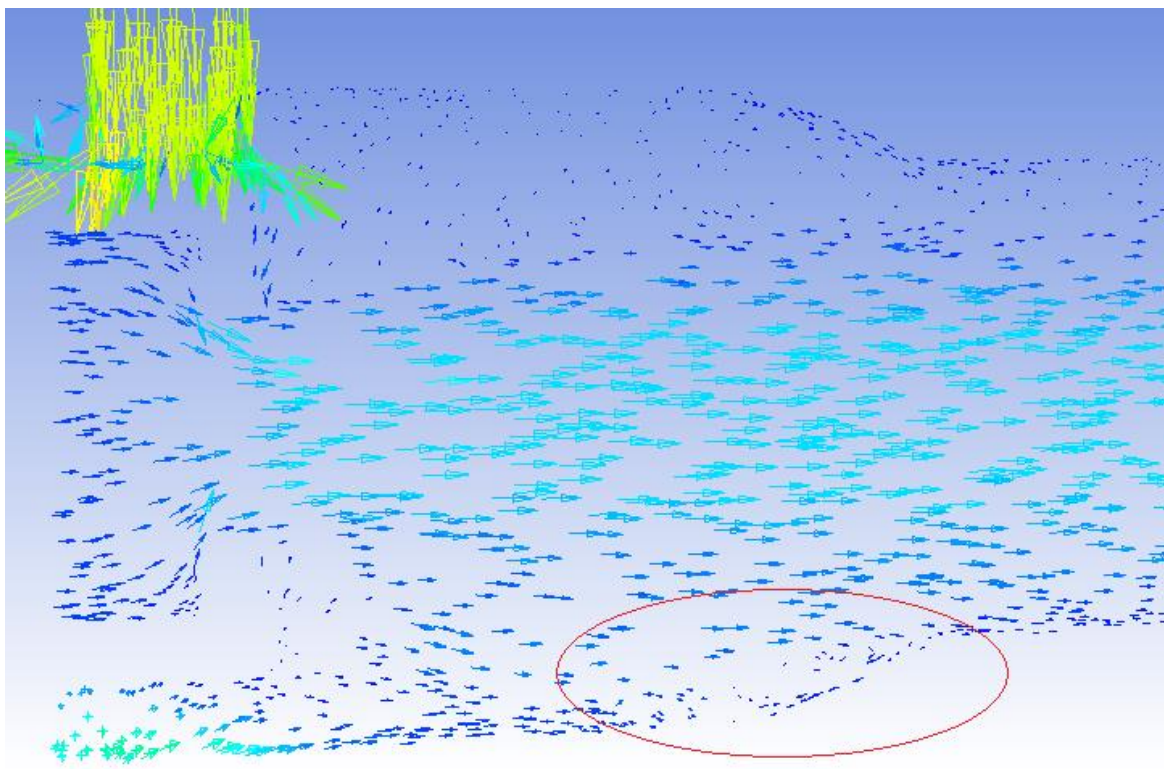
Obrázek 35 - Průběh iterací numerické simulace

Na obrázku č. 36 můžeme vidět nasimulované rychlosti v ejektoru. Lze si všimnout, že největší rychlosti nedosahuje v zařízení voda na výstupu z trysky, ale vzduch přisávaný do směšovací komory. V důsledku jeho vysoké rychlosti vzduchu cirkuluje kolem trysky a dochází k mísení s hnacím proudem po celém jeho obvodu.



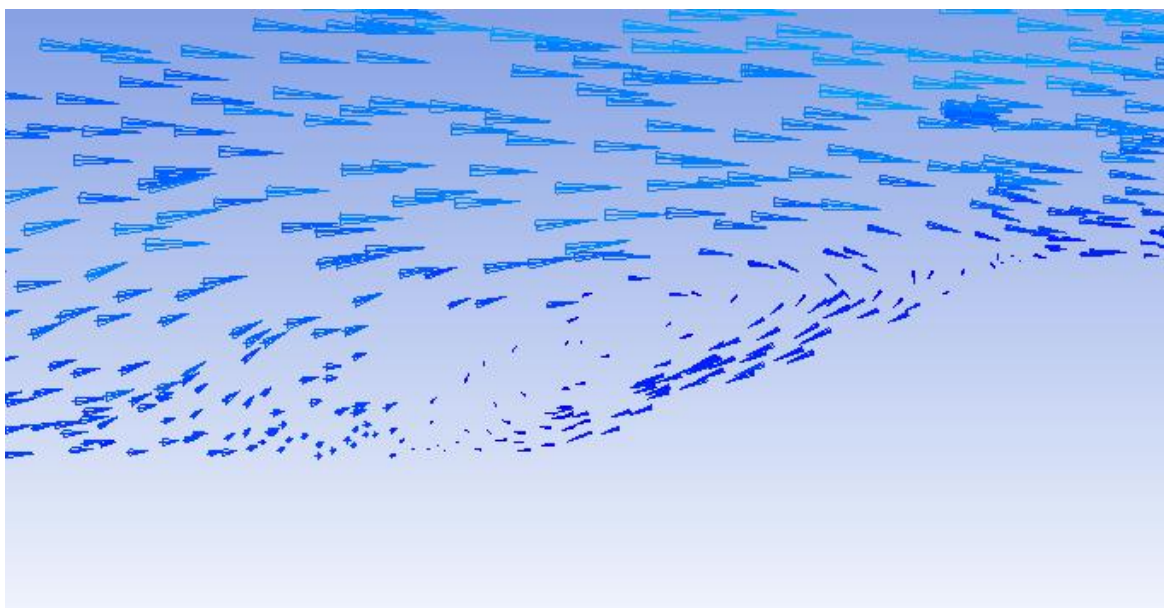
Obrázek 36 - Rozložení rychlostí v ejektoru

Na základě numerické simulace lze zjistit vektory směru rychlosti v jednotlivých místech ejektoru, lze je vidět na obrázku č. 37.



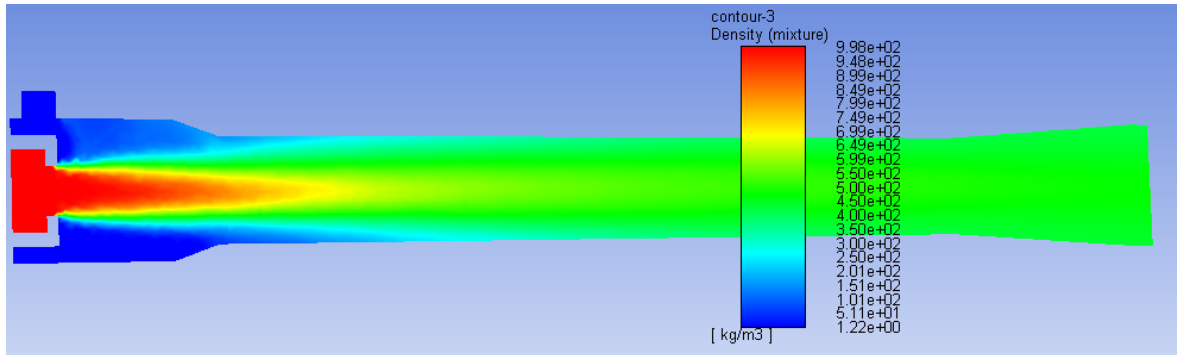
Obrázek 37 - Vektory rychlostí ve směšovací komoře

Lze si všimnout, že v místě zúžení (detail na obrázku č. 38) dochází k otáčení směru proudu. Tím, že byla tryska původně navržena do polohy A (viz kapitola č. 8), docházelo k rozšíření proudu až ve směšovací trubici. Při návrhu ejektoru s polohou trysky D by bylo vhodné zkrátit směšovací komoru a přiblížit přechod do směšovací trubice výstupu z trysky tak, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám.



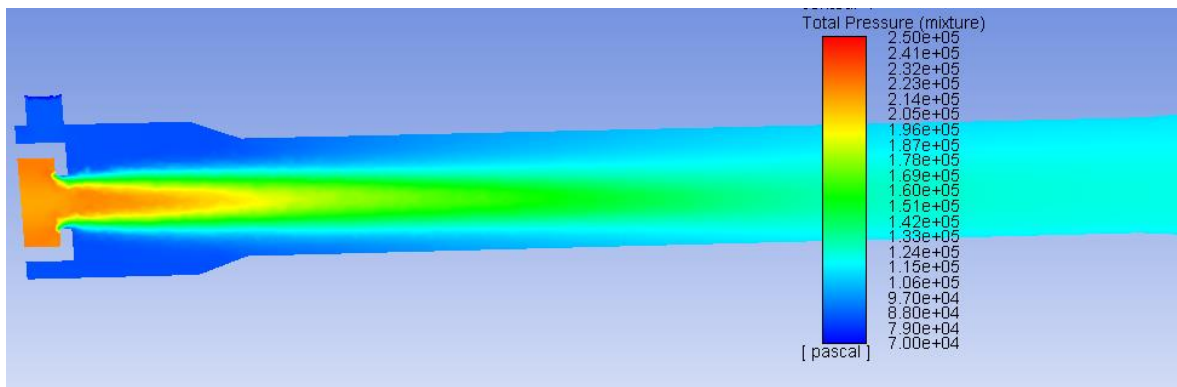
Obrázek 38 – Detail zúžení směšovací komory

Pro pozorování směřování vzduchu s vodou dobře poslouží průběh hustot směsi v ejektoru, který si lze prohlédnout na obrázku č. 39. Můžeme vidět, jak se postupně mění hustota hlavního proudu, tím že do něj postupně vstupuje více a více vzduchu. Zhruba v polovině směřovací trubice jsou látky téměř plně smíšeny a hustota se již nemění.



Obrázek 39 - Hustota směsi v ejektoru

Na obrázku č. 40 můžeme vidět rozložení tlaků v ejektoru, ve směřovací komoře dosahujeme dle simulace pro zadaný průtok tlaku 70 kPa. Ten by se měl v průběhu odsávání nádoby ještě snížit, protože se zvýší průtok hnací látky na vstupu do ejektoru.



Obrázek 40 - Tlaky v ejektoru

Při simulaci bylo při hmotnostním průtoku vody 0,9683 kg/s přisáváno do zařízení 0,001338 kg/s vzduchu. Pokud odhadneme objem nádoby použité při experimentu na 0,6 m<sup>3</sup>, tak na základě experimentálně naměřených hodnot jsme při daném tlaku v nádobě odsávali přibližně 0,00143 kg/s vzduchu. Zvolený numerický model tedy odpovídá experimentálně naměřeným hodnotám.

Při simulacích pro vyšší hodnoty průtoku a nižší hodnoty tlaku v nádobě (kolem 65kPa) docházelo k částečnému zpětnému toku vody do prostoru pro vstup přisávaného vzduchu. Přitom však hodnoty odsávaného vzduchu stále přibližně odpovídaly hodnotám zjištěným

při experimentu. Problém může být způsoben špatnou kvalitou sítě v prostoru vstupu  
přisávaného vzduchu do ejektoru.

## 10. Závěr

Na základě rešerše byly vypočteny teoretické rozměry a pracovní podmínky ejektoru. Na základě hodnot byl vytvořen konstrukční návrh experimentálního ejektoru, jehož rozměry byly lehce modifikovány z výrobních důvodů. Byla vytvořena kompletní výkresová dokumentace a 3D model.

Při experimentu na hydraulické měřicí trati byl simulován proces stanovení provozních podmínek odparky odsáváním uzavřené tlakové nádoby pro různé hodnoty průtoku a 4 různé polohy trysky. Díky průhledné směšovací komoře a trubici bylo možné pozorovat chování proudu a směšování v ejektoru. Nejlepší výsledky byly naměřeny pro polohu trysky nejbližší vstupu sekundární látky. Pro stejné hodnoty průtoku jsme v nádobě dosáhli nejnižšího tlaku za nejkratší čas. Při maximálním průtoku hnací kapaliny, kterého jsme schopni na měřicí trati dosáhnout (5,25 m<sup>3</sup>/hod), jsme v odsávané tlakové nádobě dosáhli tlaku 65 mbar, který je nižší než požadovaný provozní tlak odparky (71 mbar).

Pro CFD simulace byl vytvořen i numerický model ejektoru a provedeny výpočty odpovídající vybraným bodům z experimentálního měření. Ze simulace bylo možné sledovat vývoj rychlostí, tlaků a dalších parametrů uvnitř ejektoru. Výsledky provedených simulací se přibližně shodují s experimentálními výsledky.

Navržený ejektor lze využít pro odsávání odparky při požadovaných provozních podmínkách.

## 11. List veličin

A	průřez	[m <sup>2</sup> ]
a, b, c	koeficienty kvadratické rovnice	[-]
a <sub>t</sub>	délka strany čtvercové trysky	[m]
C	poměr hustot	[-]
C <sub>pr</sub>	koeficient obnovy statického tlaku	[-]
C <sub>ε1,2</sub> , C <sub>μ</sub>	empirická konstanta modelu k-ε	[-]
D	průměr směšovací komory	[m]
d	průměr trysky	[m]
f	třecí faktor	[-]
G <sub>k</sub>	generace kinetické energie	[-]
G <sub>ω</sub>	generace specifické disipace energie	[-]
k	turbulentní kinetická energie	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
K	ztrátový součinitel	[-]
L	délka směšovací komory	[m]
M	poměr objemových průtoků	[-]
M <sub>0</sub>	hodnota poměru, když N=0	[-]
N	tlakový poměr	[-]
N <sub>0</sub>	hodnota poměru, když M=0	[-]
P	celkový tlak	[Pa]
P <sub>ref</sub>	referenční tlak	[Pa]
P <sub>req</sub>	minimální tlak pro zabránění kavitacím	[Pa]
p	statický tlak	[Pa]
p <sub>k</sub>	produkce turbulentní energie	[Pa]
p <sub>v</sub>	tlak sytých par	[Pa]
p <sub>x</sub>	statický tlak v ose ejektoru	[Pa]
p <sub>z</sub>	tlaková ztráta	[Pa]
p <sub>zτ</sub>	ztráta třením	[Pa]
Δp	tlaková ztráta pro třecí faktor	[Pa]

Q	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
R	poměr průřezů	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S <sub>k,ω</sub>	uživatелеm definované zdrojové veličiny	[-]
t	čas	[s]
u	okamžitá rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\bar{u}$	střední rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
u'	flukтуаční rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
u <sub>t</sub>	třecí rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\bar{U}_j$	středovaná rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
V	rychlost v ejektoru	[m.s <sup>-1</sup> ]
X <sub>i,j</sub>	souřadnice	[m]
Y <sub>k,ω</sub>	disipace vlivem turbulence	[-]
Z	poměr délky směšovací komory k průřezu	[-]
α	koeficient tlumení turbulentní viskozity	[-]
ε	rychlost disipace turbulentní energie	[m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> ]
ε <sub>r</sub>	drsnost	[m]
ε/D	relativní drsnost	[-]
η	účinnost	[%]
σ	index kavitací	[-]
σ <sub>k,ε,ω</sub>	empirická konstanta modelu	[-]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s <sup>-1</sup> ]
μ <sub>t</sub>	turbulentní viskozita	[Pa.s <sup>-1</sup> ]
ρ	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\bar{\rho}$	středovaná hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
Γ <sub>k,ω</sub>	efektivní difuzivita	[-]
ω	specifická disipace energie	[s <sup>-1</sup> ]
φ	úhel sklonu difuzoru	[°]

## **Indexy**

1-5	pozice definované obrázkem č. 7
d	difuzor
m	směšovací komora
n	výstup z trysky
p	hnací proud
s	proud sekundární látky



## 12. Zdroje a literatura

- [1] ACADEMIA.EDU, *EJECTORS AND JET PUMPS - DESIGN AND PERFORMANCE FOR INCOMPRESSIBLE LIQUID FLOW*, [online] [cit. dne 27.11.2017], dostupné z [https://www.academia.edu/9013956/EJECTORS AND JET PUMPS - DESIGN AND PERFORMANCE FOR INCOMPRESSIBLE LIQUID FLOW](https://www.academia.edu/9013956/EJECTORS_AND_JET_PUMPS_-_DESIGN_AND_PERFORMANCE_FOR_INCOMPRESSIBLE_LIQUID_FLOW)
- [2] BÍLEK Martin, *Modelování proudění v ejektoru*, Brno, 2009. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
- [3] ZEJDA Vojtěch, *Ejektory a jejich využití v průmyslu*, Brno, 2013. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství
- [4] PŘÍHODA, Jaromír a Petr LOUDA. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 9788001036235
- [5] BENEŠOVÁ, Stanislava. *DES modelování turbulentního proudění*. Praha, 2014, 53 s. Diplomová práce. UK v Praze. Vedoucí práce Doc. RNDr. Josef Brechler, CSc.
- [6] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění*. Praha. ČVUT v Praze, 2013. Školitel Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. [online, cit. dne 20.12.2017], dostupné z <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>
- [7] TOMÁŠEK, Karel. *CFD Simulace v mechanicky míchané nádobě*, Praha, 2017. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav Procesní a zpracovatelské techniky
- [8] LUONG, Toan. *Návrh ejektoru na výrobu dusičnanu amonného*, Praha, 2017. Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav Procesní a zpracovatelské techniky